



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Avaliação experimental do fator de redução de perdas para espaços não úteis (ENU) na habitação

(Versão final após defesa pública)

João Barata Gouveia

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(Ciclo de Estudos Integrado)

Orientador: Prof. Doutor Miguel Costa Santos Nepomuceno
Coorientador: Prof. Doutor Jorge Manuel da Silva Carlos

Covilhã, outubro de 2016

Aos meus Pais

Agradecimentos

Esta dissertação contou com o apoio direto e indireto de algumas pessoas, as quais nos momentos de menos confiança me deram motivação para continuar e finalizar mais uma etapa.

Ao Prof. Doutor Miguel Nepomuceno quero agradecer profundamente por toda a disponibilidade demonstrada, partilha de conhecimentos ao longo da elaboração desta dissertação e a confiança demonstrada ao acreditar que seria possível a sua conclusão dentro de prazo.

Um agradecimento ao Prof. Doutor Jorge Carlos pelo facto de ter aceitado coorientar a dissertação e pelo apoio prestado.

Quero agradecer aos meus pais, avós e irmão que me apoiaram e me transmitiram confiança, incentivo e forças para continuar em momentos menos bons, não só na elaboração desta dissertação mas ao longo da vida.

Por último mas não menos importante, um especial agradecimento a todos os meus amigos de curso que me acompanharam, ajudaram e partilharam todo este percurso académico comigo.

Resumo

Esta dissertação tem como principal objetivo verificar se o valor do coeficiente de redução de perdas sugerido pelos diferentes regulamentos a estudar para diferentes espaços não úteis presentes em habitações coincidem ou pelo menos se serão próximos do valor real.

Foram escolhidas duas habitações unifamiliares nas quais estavam presentes espaços não úteis, com quatro espaços não úteis disponíveis para efetuar a verificação pretendida. Para obter o valor do coeficiente de redução de perdas de cada espaço não útil foram colocados equipamentos de medição de temperatura em diferentes divisões de cada habitação e no exterior de modo a obter perfis de temperatura e através destes calcular o valor desse mesmo coeficiente.

O valor do coeficiente de redução de perdas de cada espaço não útil em estudo foi comparado com o valor obtido através de métodos não simplificados, sendo eles um balanço energético detalhado e o valor obtido através da norma europeia (EN ISO 13789,2007). Seguidamente o valor real foi comparado com três regulamentações que sugerem algumas simplificações e diferentes abordagens no cálculo deste mesmo parâmetro, sendo estas, o Regulamento da Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE,2006), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH,2013) e a regulamentação irlandesa (BR 443,2006).

Por fim foram elaborados gráficos para cada espaço não útil com o valor real e os sugeridos pelos diferentes regulamentos e normas em estudo, a fim de verificar qual deles se aproxima mais do valor real e assim ser possível retirar conclusões. Teve também interesse científico constatar se a regulamentação nacional em vigor (REH), apresenta um valor plausível e coerente não só em comparação com o valor real do coeficiente em estudo mas também com as outras regulamentações em estudo.

Palavras-chave:

Habitações; Espaço não útil; Coeficiente de redução de perdas; Regulamento da Características de Comportamento Térmico dos Edifícios; Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação; Balanço energético;

Abstract

This dissertation has as main objective verify if the value of the reduction coefficient of thermal losses, as suggested by different regulations in study for different unheated spaces in housings, coincides with the experimental value or at least be near of it.

For the particular case study there were chosen two familiar houses, existing in both of them unheated spaces, and therefore providing four unheated spaces to measure the verification of the reduction coefficient of thermal losses. In order to obtain the real value of the referred coefficient for each unheated space, there were placed temperature measuring devices in each division of the two houses and also in the exterior of both of them, thus gathering temperature profiles. Therefore, with the data provided by them, the value of that particular coefficient could be calculated.

The value of the coefficient of loss reduction for each unheated space in study was compared to that obtained through non-simplified methods, such as a detailed energetic balance and the value obtained through the European regulation EN ISO 13789:2007. Next, the real value was compared with three regulations that suggest some simplifications and different approaches to calculate this same parameter, such as, the “*Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*” (RCCTE,2006), the “*Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação*” (REH,2013) and the Irish Regulation BR 443:2006.

Finally, there were elaborated graphics for each unheated space with the real value and that suggested by the different regulations in study, in order to verify witch one of them correlates the most to the real value and therefore provide information to take scientific based conclusions. There was also some scientific interest to elaborate whether applied national regulation presents a plausible figure not only when compared to the real value of the coefficient in the particular case study but also with the concurrent regulations that were analysed.

Keywords

Housing; unheated spaces; coefficient of thermal losses; Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE,2006); Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH,2013); Energetic balance;

Índice

1. Introdução	
1.1. Enquadramento do tema	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Justificação do tema	2
1.4. Organização da dissertação	2
2. Metodologias de análise dos espaços não úteis	
2.1. Introdução	5
2.2. Definição e tipos de espaços não úteis	5
2.3. Balanços energéticos em espaços não úteis	5
2.4. A Norma Europeia (EN ISO 13789:2007)	8
2.5. Simplificações da Norma Europeia (EN ISO 13789:2007)	10
2.5.1. Norma Irlandesa (BR 443:2006)	10
2.5.2. Reg. das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE:2006)	15
2.5.3. Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH:2013)	16
2.6. Síntese	17
3. Programa experimental	
3.1. Introdução	19
3.2. Caso de estudo 1	19
3.2.1. Descrição geral do edifício	19
3.2.2. Localização e dados climáticos	21
3.2.3. Definição da envolvente térmica e identificação dos espaços não úteis	21
3.2.4. Leituras efetuadas e condicionantes ao estudo	22
3.2.5. Metodologia adotada no tratamento de dados	22
3.3. Caso de estudo 2	23
3.3.1. Descrição geral do edifício	23
3.3.2. Localização e dados climáticos	24
3.3.3. Definição da envolvente térmica e identificação dos espaços não úteis	24
3.3.4. Leituras efetuadas e condicionantes ao estudo	25
3.3.5. Metodologia adotada no tratamento de dados	25
4. Análise e discussão dos resultados	
4.1. Introdução	27
4.2. Caso de estudo 1	27
4.2.1. Perfis de temperatura	27
4.2.2. Determinação experimental do fator de redução de perdas	28
4.2.3. Resultados dos modelos simplificados da BR 443, RCCTE e REH	29

4.2.4. Resultados do balanço energético detalhado e da Norma EN ISO 13789	30
4.2.5. Comparação e análise dos resultados obtidos	31
4.3. Caso de estudo 2	33
4.3.1. Perfis de temperatura	33
4.3.2. Determinação experimental do fator de redução de perdas	33
4.3.3. Resultados dos modelos simplificados da BR 443, RCCTE e REH	34
4.3.4. Resultados do balanço energético detalhado e da Norma EN ISO 13789:2007	34
4.3.5. Comparação e análise dos resultados obtidos	35
5. Conclusões e propostas para trabalhos futuros	
5.1. Conclusões	37
5.2. Propostas para trabalhos futuros	38
Referências bibliográficas	39

Índice de Figuras

2.1. Exemplos de espaços não úteis	5
2.2. Representação esquemática das trocas de calor num ENU	6
2.3. Representação esquemática da metodologia da BR 443	12
3.1. Corte da habitação e ilustração dos ENU's presentes no caso de estudo 1	19
3.2. Identificação dos ENU's e envolvente térmica	21
3.3. Equipamento Easylog EL-GFX-2	22
3.4. Localização de equipamentos na habitação	22
3.5. Corte a-a e respetiva envolvente térmica do caso de estudo 2	24
3.6. Corte b-b e respetiva envolvente térmica do caso de estudo 2	24
3.7. Localização de equipamentos na habitação	25
4.1. Perfil de temperatura ENU 1 (Arrumos)	27
4.2. Perfil de temperatura ENU 2 (Garagem)	27
4.3. Perfil de temperatura ENU 3 (Desvão)	28
4.4. Valor médio de b_{tr} para cada um dos três ENU's	28
4.5. Valores de b_{tr} segundo métodos simplificados para o ENU 1 (Arrumos)	29
4.6. Valores de b_{tr} segundo métodos simplificados para o ENU 2 (Garagem)	29
4.7. Valores de b_{tr} segundo métodos simplificados para o ENU 3 (Desvão)	29
4.8. Valores de b_{tr} segundo métodos não simplificados para o ENU 1 (Arrumos)	30
4.9. Valores de b_{tr} segundo métodos não simplificados para o ENU 2 (Garagem)	30
4.10. Valores de b_{tr} segundo métodos não simplificados para o ENU 3 (Desvão)	30
4.11. Comparação de valores de b_{tr} para o ENU 1 (Arrumos)	31
4.12. Comparação de valores de b_{tr} para o ENU 2 (Garagem)	31
4.13. Comparação de valores de b_{tr} para o ENU 3 (Desvão)	32
4.14. Perfil de temperatura do ENU presente no caso de estudo 2	33
4.15. Valor médio de b_{tr} para o ENU presente no caso de estudo 2	33
4.16. Valores de b_{tr} segundo métodos simplificados para o ENU do caso de estudo 2	34
4.17. Valores de b_{tr} segundo métodos não simplificados para ENU do caso de estudo 2	34
4.18. Comparação de valores de b_{tr} do ENU presente no caso de estudo 2	35

Índice de Tabelas

2.1. Valores propostos para taxa de renovação de ar por hora	9
2.2. Aplicação do ajustamento de U	11
2.3. Taxa de ventilação dos ENU de acordo com a BR 443:2006 (SEAI:2006)	12
2.4. Valores propostos pelo RCCTE:2006 para o coeficiente de redução de perdas (τ)	15
2.5. Valores propostos pelo REH:2013 para o coeficiente de redução de perdas (b_{tr})	17
3.1. Características dos ENU's presentes no caso de estudo 1	20
3.2. Parâmetros climáticos de referência e do caso de estudo 1	21
3.3. Características do ENU presente no caso de estudo 2	23
3.4. Parâmetros climáticos de referência e do caso de estudo 2	24

Siglas e acrónimos

UBI	Universidade da Beira Interior
EU	Espaço útil da habitação
ENU	Espaço não útil da habitação
EXT	Exterior
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
EPBD	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i>
SEAI	<i>Sustainable Energy Authority of Ireland</i>
SBEM	<i>Simplified Building Energy Model</i>

Simbologia

Alfabeto Latino

A_i	Área do elemento que separa o EU do ENU, em m^2
A_l	Área de todas as aberturas entre ENU e EXT, em cm^2
A_u	Área do elemento que separa o ENU do EXT, em m^2
b	Coefficiente de redução de perdas, segundo a EN ISO 13789:2007
B_i	Extensão das pontes térmicas lineares do elemento que separa o EU do ENU, em m
b_{tr}	Coefficiente de redução de perdas, segundo o REH
B_u	Extensão das pontes térmicas lineares do elemento que separa o ENU do EXT, em m
C_p	Capacidade calorífica do ar, em $Cal/Kg^{\circ}C$
f	ENU fracamente ventilado
F	ENU fortemente ventilado
GD	Número de graus-dias de aquecimento na base de $18^{\circ}C$ para a estação de aquecimento
G_{sul}	Energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a sul
H_{iu}	Coefficiente global de transferência de calor entre o EU e o ENU
$H_{iu,tr}$	Coefficiente de transferência de calor por transmissão entre o EU e o ENU
$H_{iu,vent}$	Coefficiente de transferência de calor por ventilação entre o EU e o ENU
H_{ue}	Coefficiente global de transferência de calor entre o ENU e o EXT
$H_{ue,tr}$	Coefficiente de transferência de calor por transmissão entre o ENU e o EXT
$H_{ue,vent}$	Coefficiente de transferência de calor por ventilação entre o ENU e o EXT
M	Duração da estação convencional de aquecimento
Q_1	Fluxo de calor entre o EU e o ENU, em $W/^{\circ}C$
Q_2	Fluxo de calor entre ENU e EXT, em $W/^{\circ}C$
R_{ph}	Taxa de renovação horária do ar interior do ENU por permuta com o EXT, em h^{-1}
R_u	Resistência térmica efetiva do ENU, em $(m^2.^{\circ}C)/W$
U_0	Coefficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente interior, em $W/(m^2.^{\circ}C)$
U_i	Coefficiente de transmissão térmica do elemento que separa o EU do ENU, em $W/(m^2.^{\circ}C)$
U_u	Coefficiente de transmissão térmica do elemento que separa o ENU do EXT, em $W/(m^2.^{\circ}C)$
V	Volume do ENU, em m^3
V_u	Volume do ENU, em m^3

Alfabeto grego

θ_i	Temperatura no EU, em $^{\circ}C$
θ_u	Temperatura no ENU, em $^{\circ}C$
θ_e	Temperatura no EXT, em $^{\circ}C$
Ψ_i	Coef. de transmissão térmica linear do elemento que separa o EU do ENU, em $W/(m.^{\circ}C)$
Ψ_u	Coef. de transmissão térmica linear do elemento que separa o ENU do EXT, em $W/(m.^{\circ}C)$
ρ	Massa volúmica do ar, em kg/m^3
τ	Coefficiente de redução de perdas, segundo o RCCTE

1. Introdução

1.1. Enquadramento do tema

Nas últimas décadas o consumo excessivo de combustíveis fósseis e de energia tem sido uma problemática mundial. Na evolução de todos os sectores da sociedade, além da preocupação com a evolução tecnológica é também tido em conta cada vez mais a redução do impacto ambiental dos produtos finais que irão estar presentes no mercado. O sector da construção civil não diferiu de todos os outros e seguiu também toda esta evolução, tendo como objetivo que o seu produto final seja cada vez mais eficiente energeticamente e seja conseqüentemente menos nocivo em termos ambientais. Querendo com isto dizer que os edifícios mais eficientes energeticamente vão despende menos energia e consumo de combustíveis fósseis para manter os seus utilizadores no devido nível de conforto térmico.

No espaço geográfico da União Europeia, através da diretiva comunitária relativa ao desempenho energético dos edifícios (*EPBD- Energy Performance of Buildings Directive*), do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro de 2002, foi introduzida a certificação energética de edifícios, para deste modo ser possível a classificação e diferenciação dos mesmos por classes energética segundo as necessidades de aquecimento durante o inverno, as necessidades de arrefecimento durante o verão e as necessidades de energia primária. Para cada fração autónoma de um edifício são estabelecidos os valores de referência de conforto térmico interior para as estações de aquecimento e de arrefecimento. Por outro lado, para cada localização são estabelecidos os dados climáticos exteriores para as duas estações. Com base nestes elementos, e conhecidas as características térmicas da envolvente exterior, é possível quantificar a transferência de calor através desses elementos. Contudo, alguns elementos da envolvente dos edifícios não confinam diretamente com o espaço exterior, mas com espaços interiores não climatizados, sendo designados de envolvente interior.

Falando especificamente de habitações, aquelas que possuam divisões, como por exemplo garagens, desvãos, divisões para arrumos, carecem de uma abordagem um pouco diferente. Estes espaços são exemplos de espaços não úteis da habitação para os quais o espaço útil da mesma irá perder calor na estação de aquecimento, e em alguns casos ocorre o oposto no verão. A dificuldade da análise destes espaços prende-se com o facto de que para ser possível o cálculo do fluxo de calor é necessário conhecer a temperatura do espaço não útil, temperatura esta que nem sempre é de fácil acesso.

A regulamentação internacional sugere um valor de conforto térmico para o espaço interior da habitação e o valor da temperatura exterior é um dado de fácil acesso, assim as trocas de calor entre o interior e o exterior obtêm-se facilmente. As habitações nas quais está presente algum tipo de espaço não útil é um pouco diferente, uma vez que não se conhece a temperatura desse mesmo espaço. Por simplificação, na legislação foi adotado um coeficiente de redução de perdas que toma diferentes valores segundo as características do espaço não útil e áreas de contacto

com o interior e exterior, sendo desta forma possível calcular a transferência de calor entre o interior e espaço não útil.

Em Portugal, esta temática foi desde o ano de 2006 regulamentada pelo Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE,2006). Este regulamento sugeria um método simplificado na análise de espaços não uteis no qual era especificado um valor do coeficiente de redução de perdas (τ) segundo uma tabela que tinha por base o tipo de espaço não útil e as suas áreas de contacto do espaço não útil com o interior e exterior. No ano de 2013 entra em vigor o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH,2013), continuando a aplicar um método simplificado no cálculo do coeficiente de redução de perdas. Este regulamento veio alterar a sigla do coeficiente de redução de perdas de “ τ ” para “ b_{tr} ” e propôs uma nova tabela com algumas alterações para obtenção deste mesmo parâmetro.

1.2. Justificação do tema

A certificação energética de habitações tem cada vez mais impacto na compra ou aluguer das mesmas, assim sendo estes certificados devem ser justos e corresponder com a realidade. As habitações que possuam espaços não úteis, como foi dito anteriormente, carecem de um coeficiente de redução de perdas para a sua análise, coeficiente este que segundo a norma portuguesa não é calculado mas sim arbitrado de forma algo vaga tendo por base alguns dados de entrada para uma tabela proposta. Durante a análise de algumas habitações com espaços deste tipo presentes, ao ser obtido o valor do coeficiente de redução de perdas pela regulamentação portuguesa em vigor e posterior cálculo de fluxo de calor surgiu o interesse do estudo deste mesmo coeficiente, uma vez que se suspeitava ter valores mais elevados que a realidade. Esta temática já despertou o interesse em outros investigadores uma vez que se encontram alguns artigos científicos e documentos focados neste mesmo tema, sendo eles, Carlos *et al.* (2012), Nepomuceno (2008), Nepomuceno (2014), European-Union (2016), Carlson (1997), Carlos (2016).

1.3. Objetivos

Tem-se como objetivo desta dissertação investigar se o valor do coeficiente de redução de perdas, calculado experimentalmente em alguns espaços não úteis presentes em duas habitações distintas, coincide com o valor do coeficiente de redução de perdas estimado com base na norma internacional EN ISO 13789 e de um balanço energético detalhado. Pretende-se também efetuar a mesma verificação por comparação com os valores obtidos por três regulamentações diferentes que sugerem métodos simplificados para a obtenção deste coeficiente. Tais constatações têm como fim verificar quais dos regulamentos e normas sugerem o valor mais próximo de real.

1.4. Organização da dissertação

A presente dissertação será dividida em 5 Capítulos distintos, incluindo este. Esses capítulos serão organizados da seguinte forma:

No Capítulo 2 é feita uma apresentação dos diferentes espaços não úteis que podem estar presentes nas habitações. Posteriormente é descrito o procedimento para efetuar um balanço energético detalhado de um ENU de uma habitação. É apresentada a norma EN ISO 13789 e a sua metodologia, norma esta na qual se baseiam os regulamentos nacionais de cada país europeu. Seguidamente são apresentados os três regulamentos simplificados que serão analisados nesta dissertação, dois destes nacionais, o RCCTE e o REH, e o restante trata-se da regulamentação irlandesa, a BR443.

No Capítulo 3 são apresentados os dois casos de estudo, ou seja, as duas habitações nas quais estão presentes espaços não úteis. Para cada um deles é feita uma descrição geral do edifício, é dada a conhecer a sua localização, dados climáticos e envolvente térmica. Neste capítulo é dada a conhecer a metodologia adotada durante estudo e as condicionantes ao mesmo.

No Capítulo 4 será descrito o procedimento experimental adotado no presente estudo. Neste capítulo serão apresentados os valores obtidos do coeficiente de redução de perdas segundo as diferentes regulamentações e normas referidas anteriormente para cada um dos casos de estudo.

No Capítulo 5 serão apresentadas as conclusões de todo o trabalho efetuado e as propostas para trabalhos futuros.

Por último são apresentadas todas as referências bibliográficas que de alguma maneira contribuíram para elaboração desta dissertação.

2. Metodologias de análise dos espaços não úteis

2.1. Introdução

Este capítulo inicia-se com a definição de espaço não útil (ENU) na habitação e identificação dos vários espaços deste tipo que podem estar presentes nas mesmas. De seguida descrevem-se as diferentes metodologias de análise dos ENU, desde a descrição mais detalhada baseada nos balanços energéticos, os procedimentos descritos na EN ISO 13789:2007, até às simplificações adotadas em diferentes regulamentos.

2.2. Definição e tipos de espaços não úteis

Entende-se por espaço não útil (ENU) de uma habitação, todas as divisões não climatizadas adjacentes à mesma ou nela inseridas, ventiladas ou não, acessíveis ou não. Estas divisões não climatizadas, para serem consideradas ENU da habitação têm que ter um ou mais elementos em contacto com a habitação, ou seja, o espaço útil da mesma. São exemplos de espaços não úteis presentes em habitações: as lavandarias não climatizadas contíguas à habitação, as varandas, marquises ou similares, os armazéns adjacentes à habitação, os espaços comuns a várias frações e adjacentes ao edifício em estudo, um espaço de comércio ou serviço adjacente e um edifício adjacente. A Fig. 2.1 ilustra esquematicamente alguns exemplos de espaços não úteis.

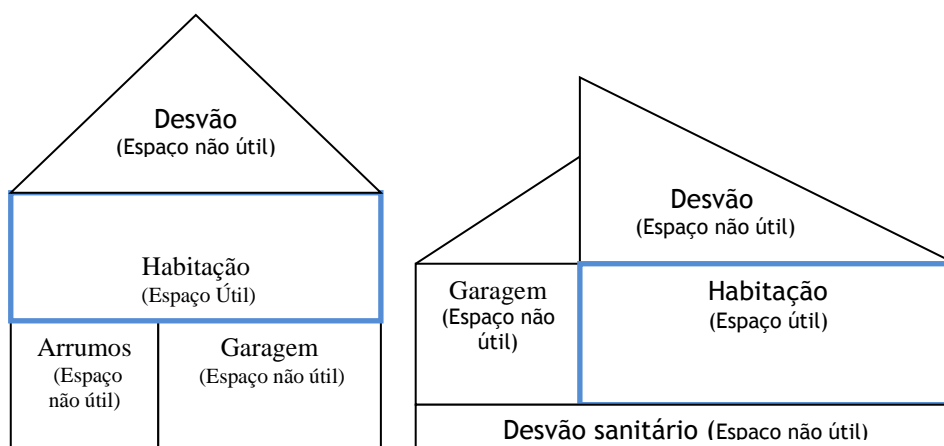


Figura 2.1. Exemplos de espaços não úteis

2.3. Balanço energético detalhado em espaços não úteis

O balanço energético num espaço não útil deve ter em conta as trocas de calor que ocorrem através dos elementos que separam o espaço útil (aquecido) do espaço não útil (não aquecido), bem como as trocas de calor entre os elementos que separam o espaço não útil do exterior. Para efeitos do cálculo do coeficiente de redução de perdas apenas se consideram as trocas de calor associadas ao gradiente térmico entre os diferentes espaços, o espaço útil, o espaço não útil e o exterior. Neste contexto, o balanço energético discutido neste subcapítulo não tem em conta os

ganhos por radiação solar, os ganhos internos nem o efeito resultante da inércia térmica interior do espaço não útil. Por outro lado, admite-se que o regime é permanente, com fluxo constante.

A Fig. 2.2 ilustra uma representação esquemática das trocas de calor associadas ao gradiente térmico que ocorrem entre o espaço não útil e os espaços envolventes e exteriores. De salientar que o “caminho” do fluxo de calor apresentado na imagem será para a estação de aquecimento, ou seja, no inverno. Admite-se ainda que não existem trocas de ar entre o EU e o ENU.

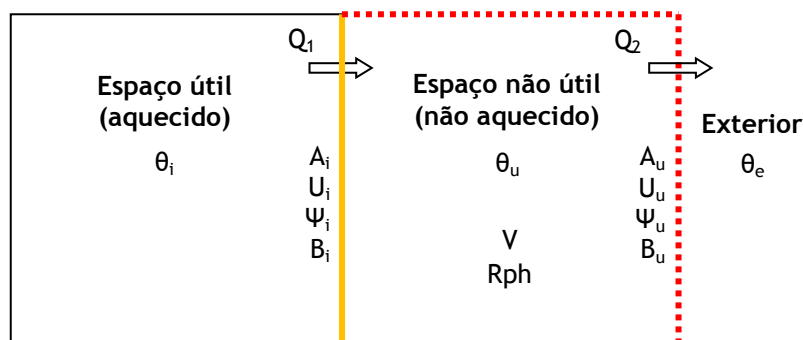


Figura 2.2. Representação esquemática das trocas de calor num ENU

Na Fig. 2.2 as variáveis apresentadas assumem o seguinte significado:

Quanto ao fluxo de calor:

Q_1 - Fluxo de calor entre o EU e o ENU,

Q_2 - Fluxo de calor entre ENU e o EXT;

Quanto às temperaturas:

θ_i - Temperatura no EU,

θ_u - Temperatura no ENU,

θ_e - Temperatura no EXT;

Quanto aos parâmetros térmicos e geométricos do elemento que separa o EU do ENU:

A_i - Área do elemento que separa o EU do ENU,

U_i - Coeficiente de transmissão térmica do elemento que separa o EU do ENU,

B_i - Extensão das pontes térmicas lineares do elemento que separa o EU do ENU,

Ψ_i - Coef. de transmissão térmica linear em torno do elemento que separa o EU do ENU;

Quanto aos parâmetros térmicos e geométricos do elemento que separa o ENU do EXT:

A_u - Área do elemento que separa o ENU do EXT,

U_u - Coeficiente de transmissão térmica do elemento que separa o ENU do EXT,

B_u - Extensão das pontes térmicas lineares do elemento que separa o ENU do EXT,

Ψ_u - Coef. de transmissão térmica linear em torno do elemento que separa o ENU do EXT;

Quanto à renovação do ar do ENU por permuta com o ar EXT:

V - Volume do ENU,

R_{ph} - Taxa de renovação horária do ar interior do ENU por permuta com o EXT.

O fluxo de calor Q_1 é calculado através da Equação 2.1, onde H_{iu} representa o coeficiente global de transferência de calor entre o EU e o ENU, expresso em $W/^\circ C$:

$$Q_1 = H_{iu} \times (\theta_i - \theta_u) \quad (2.1)$$

O coeficiente global de transferência de calor (H_{iu}) inclui as transferências de calor por transmissão ($H_{iu,tr}$) e as transferências de calor por ventilação ($H_{iu,vent}$), conforme se apresenta na Equação 2.2.

$$H_{iu} = (H_{iu,tr} + H_{iu,vent}) \quad (2.2)$$

Por convenção, assumiu-se que não existem trocas de ar entre o EU e o ENU. Desta forma, no coeficiente global de transferências de calor entre EU e ENU não é considerada a parcela das transferências por ventilação ($H_{iu,vent}$), tomando esta o valor nulo.

O coeficiente de transferência de calor por transmissão ($H_{iu,tr}$) entre o EU e o ENU é dado pela Equação 2.3.

$$H_{iu,tr} = \Sigma(A_i \times U_i) + \Sigma(\Psi_i \times B_i) \quad (2.3)$$

O fluxo de calor Q_2 é calculado através da Equação 2.4, onde H_{ue} representa o coeficiente global de transferência de calor entre o ENU e o EXT, expresso em $W/^\circ C$:

$$Q_2 = H_{ue} \times (\theta_u - \theta_e) \quad (2.4)$$

O coeficiente global de transferência de calor (H_{ue}) inclui as perdas por transmissão ($H_{ue,tr}$) e as perdas associadas à ventilação ($H_{ue,vent}$), conforme se apresenta na Equação 2.5.

$$H_{ue} = (H_{ue,tr} + H_{ue,vent}) \quad (2.5)$$

O coeficiente de transferência de calor por transmissão ($H_{ue,tr}$) entre o ENU e o EXT é dado pela Equação 2.6, enquanto o coeficiente de transferência de calor entre o ENU e o EXT associado à ventilação ($H_{ue,vent}$) é dado pela Equação 2.7.

$$H_{ue,tr} = \Sigma(A_e \times U_e) + \Sigma(\Psi_e \times B_e) \quad (2.6)$$

$$H_{ue,vent} = 0,34 \times Rph \times V \quad (2.7)$$

Tendo em conta que o regime é permanente e de fluxo constante, é legítimo afirmar que o fluxo de calor Q_1 toma o mesmo valor que o fluxo de calor Q_2 . Assim sendo, da igualdade das equações 2.1 e 2.4 é possível obter a Equação 2.8 através da qual se irá estimar a temperatura no ENU.

$$\theta_u = \frac{H_{iu} \times \theta_i + H_{ue} \times \theta_e}{H_{ue} + H_{iu}} \quad (2.8)$$

Considerando que o coeficiente de redução de perdas (b_{tr}) pode ser calculado pela Equação 2.9 e substituindo a temperatura do ENU pela Equação 2.8, obtém-se a Equação 2.10, onde as variáveis “ b_{tr} ”, “ H_{iu} ”, “ H_{ue} ” assumem o mesmo significado descrito anteriormente.

$$\begin{aligned}
 b_{tr} &= \frac{\theta_i - \theta_u}{\theta_i - \theta_e} & (2.9) \\
 &\equiv b_{tr} = \frac{\theta_i - \frac{H_{iu} \times \theta_i + H_{ue} \times \theta_e}{H_{ue} + H_{iu}}}{\theta_i - \theta_e} \\
 &\equiv b_{tr} = \frac{H_{ue} \times \theta_i + H_{iu} \times \theta_i - H_{iu} \times \theta_i - H_{ue} \times \theta_e}{(H_{ue} + H_{iu}) \times (\theta_i - \theta_e)} \\
 &\equiv b_{tr} = \frac{H_{ue} \times \theta_i - H_{ue} \times \theta_e}{(H_{ue} + H_{iu}) \times (\theta_i - \theta_e)} \\
 &\equiv b_{tr} = \frac{H_{ue} \times (\theta_i - \theta_e)}{(H_{ue} + H_{iu}) \times (\theta_i - \theta_e)} \\
 &\equiv b_{tr} = \frac{H_{ue}}{H_{ue} + H_{iu}} & (2.10)
 \end{aligned}$$

2.4. A Norma Europeia (EN ISO 13789:2007)

A EN ISO 13789:2007 especifica para o cálculo do coeficiente de redução de perdas a Equação 2.11 que é semelhante à Equação 2.10 uma vez que a norma em questão, tal como em 2.3, considera apenas as transferências de calor pelos elementos e despreza os ganhos por radiação e perdas pelo pavimento. Embora as Equações 2.10 e 2.11 sejam semelhantes a sua diferença reside no coeficiente de transferência de calor entre o ENU e o EXT, mais especificamente no cálculo das perdas por ventilação, ($H_{ue,vent}$).

$$b = \frac{H_{ue}}{H_{ue} + H_{iu}} \quad (2.11)$$

Onde:

H_{iu} - Coeficiente de transferência de calor entre o EU e o ENU

H_{ue} - Coeficiente de transferência de calor entre o ENU e o EXT

O coeficiente de transferência de calor entre ENU e EXT foi apresentado na Equação 2.5. A parcela das perdas por ventilação é agora dada pela Equação 2.12

$$H_{ue,vent} = \rho \times C_p \times n \times V \quad (2.12)$$

Onde:

ρ - Massa volúmica do ar, em (kg/m³)

C_p - Capacidade calorífica do ar, em (Cal/kg°C)

n - Renovação de ar por hora, em h⁻¹

V - Volume de ar do ENU, em m³

Para se obter a taxa de renovação de ar por hora do ENU a EN ISO 13789:2007 propõe a Tabela 2.1 e a Equação 2.13. O valor obtido pela Equação 2.13 será apenas uma base, uma vez que o valor definitivo de “n” a aplicar na Equação 2.12 será o valor da Tabela 2.1 mais próximo do obtido pela Equação 2.13.

Tabela 2.1. Valores propostos para taxa de renovação de ar por hora

Tipo de impermeabilidade ao ar	Rph (h ⁻¹)	Exemplos de espaços não aquecidos
Sem portas ou janelas, todas as uniões entre os elementos bem seladas, sem aberturas de ventilação.	0,1	Espaço interno sem elementos externos e sem ventilação
Todas as uniões entre elementos bem seladas, sem aberturas de ventilação.	0,5	Espaço com elementos externos, janelas e portas, mas bem fechados e sem aberturas de ventilação.
Todas as uniões bem seladas, pequenas aberturas ou aberturas de ventilação permanente.	1,0	Espaço com elementos externos, mas bem selados e com conduta passiva com grelhas controláveis entre o espaço não aquecido e o exterior.
Não estanque devido a algumas juntas abertas localizadas ou aberturas de ventilação permanentes.	3,0	Espaço com elementos externos e ventilador de parede com abertura permanente.
Não estanque devido a inúmeras juntas abertas, ou grandes ou numerosas aberturas de ventilação permanentes.	10,0	Parque de estacionamento com várias aberturas de ventilação permanentes

$$n = \frac{A_l}{10 \times V_u} \quad (2.13)$$

Onde:

A_l - Área de todas as aberturas entre ENU e EXT (cm²)

V_u - Volume do ENU (m³)

2.5. Simplificações da Norma Europeia (EN ISO 13789:2007)

2.5.1. A norma irlandesa (BR 443:2006)

A *Sustainable Energy Authority of Ireland (SEAI)* publicou um documento datado de outubro de 2013 (SEAI, 2013), com o propósito de descrever o procedimento para calcular o valor do coeficiente de transmissão térmica ponderado (U_0), em função da área dos elementos de contacto entre o espaço climatizado e não climatizado. Este valor de U_0 destina-se a ser utilizado no *Simplified Building Energy Model (SBEM)*.

O valor de U de elementos que confinam com algum tipo de ENU ou edifício adjacente deve ter em conta o efeito do espaço não útil, seja ele não climatizado ou fortemente ventilado. O procedimento para contabilizar o efeito do ENU na redução das perdas térmicas na envolvente interior é fornecido nos regulamentos irlandeses para edifícios não-domésticos que seguem o Anexo A da norma em estudo, que tem por base os ajustamentos no valor de U previstos na EN 13789 para elementos da envolvente interior.

A BR 443:2006 considera o ajustamento do valor de U tendo por base a resistência térmica do ENU, conforme a seguinte equação:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{U_0} + R_u} \quad (2.14)$$

onde:

U é o valor do coeficiente de transmissão térmica ajustado do elemento da envolvente interior, em $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

U_0 é o valor do coeficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente interior, calculado como se o ENU não existisse mas considerando $R_{se}=R_{si}$, expresso em $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

R_u é a resistência térmica efetiva do ENU, em $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$.

O cálculo detalhado dos valores de R_u é descrito no Anexo A da BR 443:2006, de acordo com a Equação 2.15:

$$R_u = \frac{A_i}{\sum(A_e \times U_e) + 0,33 \times n \times V} \quad (2.15)$$

Na Equação 2.15, todas as variáveis assumem o significado descrito anteriormente, exceto as renovações de ar por hora que, em vez de definidas pela variável “Rph”, são agora definidas pela variável “n”. A constante 0,33 representa a quantidade de energia que é necessária para elevar em 1 °C a temperatura de 1 m³ de ar, sendo o valor arredondado da expressão 2.16, expressa em $W/(m^3 \cdot ^\circ C)$. Note-se que este valor no regulamento português em vigor é arredondado para 0,34.

$$0,33 = \frac{\rho \times C_p}{3600} \quad (2.16)$$

Em que:

ρ - Massa volúmica do ar, em kg/m³

C_p - Calor específico do ar, em j/(kg.°C)

A metodologia descrita prevê situações onde o ajustamento do valor de U pode ser dispensado, nomeadamente se o impacto do ajustamento for pouco significativo ou negligenciável. Os ajustamentos podem ser ignorados nas situações indicadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Aplicação do ajustamento de U (BR 443:2006)

Valor de U inicial da envolvente interior (W/(m ² .°C))	% da diferença entre o valor de U inicial e o valor de U ajustado
<1	O ajustamento não é feito se ≤ 10%
1 a 3	O ajustamento não é feito se ≤ 5%
> 3	O ajustamento é sempre feito

Na aplicação da BR 443:2006, o valor de U ajustado é arredondado a duas casas decimais, se este for menor que 1, e a uma casa decimal se este for maior que 1.

A resistência térmica efetiva (R_u) de um ENU é baseada na transferência de calor dos elementos que separam os ENU do exterior e na taxa de renovação de ar do ENU. O valor ajustado de U do elemento da envolvente interior depende do valor original de U_0 do elemento da envolvente interior e do valor de R_u do ENU.

Os valores previstos na BR 443 para a estimativa da taxa de renovação de ar dos espaços não úteis ou não aquecidos são apresentados na Tabela 2.3, idêntica à Tabela 2.1. Na BR 443, é assumido por defeito um valor de R_{ph} de 3 h⁻¹ se não forem conhecidas as condições do ENU que permitam usar a referida tabela (Tabela 2.3).

Tabela 2.3. Taxa de ventilação dos ENU de acordo com a BR 443:2006 (SEAI:2006)

Tipo de impermeabilidade ao ar	Rph (h ⁻¹)	Exemplos de espaços não aquecidos
Sem portas ou janelas, todas as uniões entre os elementos bem seladas, sem aberturas de ventilação.	0,1	Espaço interno sem elementos externos e sem ventilação
Todas as uniões entre elementos bem seladas, sem aberturas de ventilação.	0,5	Espaço com elementos externos, janelas e portas, mas bem fechados e sem aberturas de ventilação.
Todas as uniões bem seladas, pequenas aberturas ou aberturas de ventilação permanente.	1,0	Espaço com elementos externos, mas bem selados e com conduta passiva com grelhas controláveis entre o espaço não aquecido e o exterior.
Não estanque devido a algumas juntas abertas localizadas ou aberturas de ventilação permanentes.	3,0	Espaço com elementos externos e ventilador de parede com abertura permanente.
Não estanque devido a inúmeras juntas abertas, ou grandes ou numerosas aberturas de ventilação permanentes.	10,0	Parque de estacionamento com várias aberturas de ventilação permanentes

Caso não se especifique o valor do coeficiente de transmissão térmica superficial (U) dos elementos que separam o ENU do exterior, a norma assume por defeito que $U=2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

A metodologia descrita não considera as perdas por pontes térmicas lineares nem as perdas pelos pavimentos térreos. Por outro lado, não utiliza o valor de b_{tr} , assumindo um valor de U para o elemento que separa o EU do ENU. Desta forma, não é determinado o valor da temperatura no ENU. Contudo os valores de b_{tr} e da temperatura podem ser determinados tendo por base o balanço energético. Resumidamente a metodologia descrita na presente norma pode ser interpretada com base na seguinte representação esquemática:

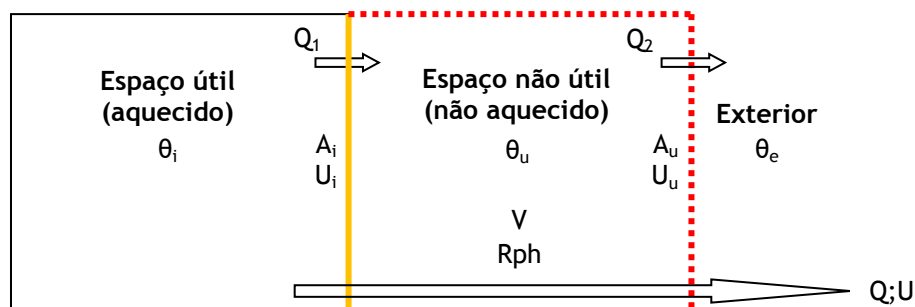


Figura 2.3. Representação esquemática da metodologia da BR 443:2006

Na Fig. 2.3 as variáveis apresentadas tomam o seguinte significado:

Quanto ao fluxo de calor:

- Q_1 - Fluxo de calor entre o EU e o ENU,
- Q_2 - Fluxo de calor entre ENU e o EXT,
- Q - Fluxo de calor corrigido através do elemento que separa o EU do EXT;

Quanto às temperaturas:

- θ_i - Temperatura no EU,
- θ_u - Temperatura no ENU,
- θ_e - Temperatura no EXT;

Quanto aos parâmetros térmicos dos elementos:

- U_i - Coeficiente de transmissão térmica do elemento que separa o EU do ENU,
- U_u - Coeficiente de transmissão térmica do elemento que separa o ENU do EXT,
- U - Coeficiente de transmissão térmica corrigido,
- R_u - Resistência térmica do ENU;

Quanto aos parâmetros geométricos dos elementos:

- A_i - Área do elemento que separa o EU do ENU,
- A_u - Área do elemento que separa o ENU do EXT;

Quanto à renovação do ar do ENU por permuta com o ar EXT:

- V - Volume do ENU,
- R_{ph} - Taxa de renovação horária do ar interior do ENU por permuta com o EXT.

O valor do coeficiente de redução de perdas (b_{tr}), pode ser obtido pela relação entre os valores de U corrigido e de U_0 inicial, do seguinte modo:

$$b_{tr} = \frac{U}{U_0} \quad (2.17)$$

Adotando as seguintes premissas:

- $H_{iu} = \sum(A_i \times U_i)$
- $H_{ue} = \sum(A_e \times U_e) + 0,33 \times n \times V$

De seguida, tomando as Equações 2.14 e 2.15 e substituindo as premissas acima, tem-se:

Da Equação 2.15:

$$R_u = \frac{A_i}{\sum(A_e \times U_e) + 0,33 \times n \times V} \Leftrightarrow R_u = \frac{A_i}{H_{ue}} \quad (2.18)$$

Da Equação 2.14:

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{1}{\frac{1}{U_0} + R_u} \\
 \equiv U &= \frac{1}{\frac{1}{U_0} + \frac{A_i}{H_{ue}}} \\
 \equiv U &= \frac{U_0 \times H_{ue}}{H_{ue} + H_{iu}} \quad (2.19)
 \end{aligned}$$

Substituindo a Equação 2.19 na Equação 2.17, tem-se:

$$\begin{aligned}
 b_{tr} &= \frac{U}{U_0} \\
 \equiv b_{tr} &= \frac{\frac{U_0 \times H_{ue}}{H_{ue} + H_{iu}}}{U_0} \\
 \equiv b_{tr} &= \frac{U_0 \times H_{ue}}{U_0 \times (H_{ue} + H_{iu})} \\
 \equiv b_{tr} &= \frac{H_{ue}}{H_{ue} + H_{iu}} \quad (2.20)
 \end{aligned}$$

A Equação 2.20 coincide com aquela apresentada no balanço energético (Equação 2.10). A diferença reside apenas nas simplificações em termos dos elementos incorporados em cada um dos coeficientes globais de transferências térmicas, ou seja, H_{ue} e H_{iu} . Assim sendo, a temperatura do ENU pode ser determinada adotando a seguinte equação:

$$\theta_i - \theta_u = b_{tr} \times (\theta_i - \theta_{ext}) \quad (2.21)$$

$$\equiv \theta_u = \theta_i - b_{tr} \times (\theta_i - \theta_{ext}) \quad (2.22)$$

A BR 443:2006 não propõe uma nova metodologia, mas sim uma abordagem diferente do problema, considerando o ENU como um elemento adicional com determinada resistência térmica. Como se observou pelo balanço energético, podem ser obtidos os valores de b_{tr} e da temperatura do ENU pelas mesmas expressões discutidas no balanço energético efetuado no Capítulo 2.3. A diferença essencial da BR 443:2006 face à EN ISO 13789:2007 encontra-se apenas nas simplificações efetuadas nos coeficientes globais de transferências térmicas, ou seja, considerar perdas por pontes térmicas lineares e perdas pelo pavimento. Estas simplificações são feitas apenas para tornar o procedimento de cálculo menos pesado. Entenda-se portanto que a BR 443:2006 faz estas simplificações e a EN ISO 13789:2007 não as faz. Por outro lado, a BR 443:2006 apresenta uma tabela com a estimativa a adotar para a taxa de renovação do ar que terá matematicamente mais impacto no cálculo do valor do b_{tr} e da temperatura do ENU.

2.5.2. O Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios

O Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE:2006) admite que a temperatura do ENU pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\theta_u = \theta_e + (1 - \tau) \times (\theta_i - \theta_e) \quad (2.23)$$

Onde as variáveis apresentadas tomam o significado descrito anteriormente e apenas o coeficiente de transmissão térmica toma agora a sigla τ .

O regulamento em estudo propõe para o cálculo do coeficiente de redução de perdas a seguinte expressão:

$$\tau = \frac{\theta_i - \theta_u}{\theta_i - \theta_e} \quad (2.24)$$

Como é perceptível pelas duas expressões apresentadas anteriormente, a temperatura no ENU é determinada com base no valor do coeficiente de redução de perdas (τ). Assim sendo, o RCCTE propõe uma tabela de valores de τ , tendo por base o tipo de espaço não útil em estudo e a relação que este apresenta entre a área de contacto com o interior e o exterior. A Tabela proposta pelo RCCTE é a seguinte:

Tabela 2.4. Valores para coeficiente de redução de perdas (τ) pelo RCCTE, (Nepomuceno:2008)

Tipo de espaço não útil	A _i / A _u ⁽¹⁾		
	< 1	1 a 10	> 10
1- Circulação comum:			
1.1- Sem abertura direta para o exterior _____	0,6	0,3	0
1.2- Com abertura permanente para o exterior (p.ex., para ventilação ou desenfumagem)			
a) Área de aberturas permanentes/ volume total < 0,05 m ² /m ³	0,8	0,5	0,1
b) Área de aberturas permanentes/ volume total ≥ 0,05 m ² /m ³	0,9	0,7	0,3
2- Espaços comerciais	0,8	0,6	0,2
3- Edifícios adjacentes	0,6	0,6	0,6
4- Armazéns	0,95	0,7	0,3
5- Garagens:			
5.1- Privada _____	0,8	0,5	0,3
5.2- Coletiva _____	0,9	0,7	0,4
5.3- Pública _____	0,95	0,8	0,5
6- Varandas, marquises e similares ⁽²⁾	0,8	0,6	0,2
7- Coberturas sobre desvão não habitado (acessível ou não) ⁽³⁾ :			
7.1- Desvão não ventilado _____	0,8	0,6	0,4
7.2- Desvão fracamente ventilado _____	0,9	0,7	0,5
7.3- Desvão fortemente ventilado _____	1	1	1

Onde:

(1) - A_i é a área do elemento que separa o espaço útil interior do espaço não útil.

- A_u é a área do elemento que separa o espaço não útil do ambiente exterior

(2) - Corresponde aos espaços do tipo varandas e marquises fechadas, ou equivalentes, em que a envolvente de separação com os espaços aquecidos deve satisfazer, obrigatoriamente, os requisitos mínimos de U definidos no Anexo IX.

(3) - Os valores de τ indicados neste ponto aplicam-se aos desvãos não habitados (não úteis) de coberturas inclinadas, acessíveis ou não. No caso dos desvãos acessíveis, estes podem não ter qualquer uso ou ser utilizados, nomeadamente, como zonas de arrecadações ou espaços técnicos. A caracterização da ventilação baseia-se nas definições que constam no Anexo II.

Deste modo, tendo os dados do ENU necessários para introduzir na tabela é possível determinar um valor para o coeficiente de redução de perdas. Consequentemente é também possível determinar o valor da temperatura no ENU em estudo.

2.5.3. O Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

O Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH:2013), da mesma maneira que o regulamento que o precedeu (RCCTE:2006), admite que a temperatura no ENU e o coeficiente de redução de perdas associado ao mesmo podem ser calculados com base em expressões idênticas às apresentadas anteriormente (2.23 e 2.24). A diferença nestas expressões encontra-se basicamente no facto do coeficiente de redução de perdas deixar de tomar a simbologia (τ), para agora ser (b_{tr}). Assim sendo apresentam-se as “novas” expressões propostas pelo REH:

$$\theta_u = \theta_e + (1 - b_{tr}) \times (\theta_i - \theta_e) \quad (2.25)$$

$$b_{tr} = \frac{\theta_i - \theta_u}{\theta_i - \theta_e} \quad (2.26)$$

Mais uma vez, à semelhança do regulamento precedente deparamo-nos com duas expressões dependentes. Isto significa que, sem o valor da temperatura no ENU não é possível determinar o coeficiente de redução de perdas associado ao mesmo e vice-versa. O REH, publicado em 2013, propôs uma nova tabela de valores para o coeficiente de redução de perdas (Tabela 2.5).

Tabela 2.5. Valores para coeficiente de redução de perdas (b_{tr}) pelo REH, (Nepomuceno:2013)

b_{tr}	$V_{enu} \leq 50 \text{ m}^3$		$50 \text{ m}^3 < V_{enu} \leq 200 \text{ m}^3$		$V_{enu} > 200 \text{ m}^3$	
	f	F	f	F	f	F
$A_i / A_u < 0,5$	1,0		1,0		1,0	
$0,5 \leq A_i / A_u < 1$	0,7	0,9	0,8	1,0	0,9	1,0
$1 \leq A_i / A_u < 2$	0,6	0,8	0,7	0,9	0,8	1,0
$2 \leq A_i / A_u < 4$	0,4	0,7	0,5	0,9	0,6	0,9
$A_i / A_u \geq 4$	0,3	0,5	0,4	0,8	0,4	0,8

Onde:

f - Espaço não útil que tem todas as ligações entre elementos bem vedadas, sem aberturas de ventilação permanentemente abertas;

F - Espaço não útil permeável ao ar devido à presença de ligações e aberturas de ventilação permanentemente abertas;

A_i - Somatório das áreas dos elementos que separam o espaço interior útil do espaço não útil;

A_u - Somatório das áreas dos elementos que separam o espaço não útil do ambiente exterior;

V_{enu} - Volume do espaço não útil, em m^3 .

2.6. Síntese

Se o objetivo é o cálculo rigoroso do coeficiente de redução de perdas, este tem de ser feito com base num balanço energético tal como descrito no subcapítulo 2.3, mas não desprezando os ganhos por radiação e por inércia térmica, nem as perdas pelo pavimento.

A própria EN ISO 13789:2007 no cálculo do coeficiente de redução de perdas já efetua simplificações, uma vez que, tal como como descrito no subcapítulo 2.3, despreza os ganhos por radiação, a inércia térmica e as perdas pelo pavimento.

Dentro dos regulamentos que adotam uma metodologia simplificada, a norma irlandesa é a que menos simplificações efetua, uma vez que, como foi demonstrado no subcapítulo 2.5.1, a expressão para o cálculo do coeficiente de redução de perdas é a mesma que a EN ISO 13789:2007 utiliza. A única diferença, que em nada altera a expressão de cálculo do coeficiente de redução de perdas, encontra-se nos coeficientes de transferências de calor, pelo facto de que a norma irlandesa despreza as perdas pelas pontes térmicas lineares e a EN ISO 13789:2007 não. A BR 443:2006 considera o ENU como um espaço que tem uma certa resistência térmica e que irá fornecer um valor de U corrigido entre o interior e o exterior. Para determinar a resistência térmica do ENU tem em conta todas as características do ENU como áreas de contacto com interior e exterior, coeficientes de transmissão térmica, volume e taxa de renovação horária.

Para a estimativa da taxa de renovação horária do ar do ENU a norma irlandesa propõe uma tabela de valores, idêntica à existente na EN ISO 13789:2007.

É notório que das simplificações estudadas da EN ISO 13789:2007, a mais simplista foi sem dúvida o RCCTE:2006 que esteve em vigor até 2013. Na tabela proposta pelo RCCTE para os valores do coeficiente de redução de perdas, era evidente a deficiente entrada de dados na tabela para obter um valor de “ τ ”. Pretende-se com isto dizer que, embora o RCCTE nesta tabela tivesse em conta o tipo de espaço não útil em estudo, a razão A_i/A_u era introduzida na tabela em intervalos muito abrangentes. Também não tinha em conta o volume do ENU e as condições em que a ventilação era abordada pela mesma era muito vaga ou inexistente.

Tendo por base a análise efetuada, o REH apenas trouxe de novo uma nova nomenclatura para o coeficiente de redução de perdas e uma nova tabela para a determinação do mesmo. A tabela proposta pelo REH melhorou a diferenciação da razão A_i/A_u , uma vez que os intervalos propostos são mais precisos. Possui também como dado de entrada na tabela o volume do ENU em estudo. O fator que continua a ser bastante vago, embora seja muito importante, é a taxa de renovação do ar no ENU, uma vez que apenas estão disponíveis duas classificações, fracamente ventilado (f) ou fortemente ventilado (F). A classificação de fracamente ventilado ou fortemente ventilado fica ao critério do utilizador, por ser pouco precisa e subjetiva.

É esperado que dentro das regulamentações que adotam métodos simplificados, os resultados obtidos pela norma irlandesa se aproximem mais da realidade que as regulamentações portuguesas, uma vez que esta se baseia em parâmetros mais específicos do ENU.

3. Programa experimental

3.1. Introdução

A fim de serem aplicadas cada uma das metodologias descritas no capítulo anterior foram escolhidos dois casos de estudo, duas habitações unifamiliares nas quais está presente um ou mais espaços não úteis. Posteriormente serão apresentadas as propriedades de cada ENU de modo a ser possível a aplicação de cada uma das metodologias referidas. Foram ainda recolhidos perfis térmicos de cada um dos ENU's presentes em cada uma das habitações, a fim de efetuar o cálculo do valor real do coeficiente de redução de perdas e, deste modo, posteriormente comparar com o valor de coeficiente de redução de perdas segundo cada uma das metodologias.

3.2. Caso de estudo 1

3.2.1. Descrição geral do edifício

O caso de estudo 1 trata-se de uma moradia unifamiliar constituída por 2 pisos. No rés-do-chão encontram-se dois ENU's, sendo eles, uma garagem e uma divisão destinada a arrumos. No primeiro piso situa-se o espaço útil da habitação. O piso superior trata-se de um desvão acessível fortemente ventilado não climatizado, sendo assim mais um ENU da habitação. A Figura 3.1 ilustra um corte da habitação onde se identificam os três espaços não uteis descritos.

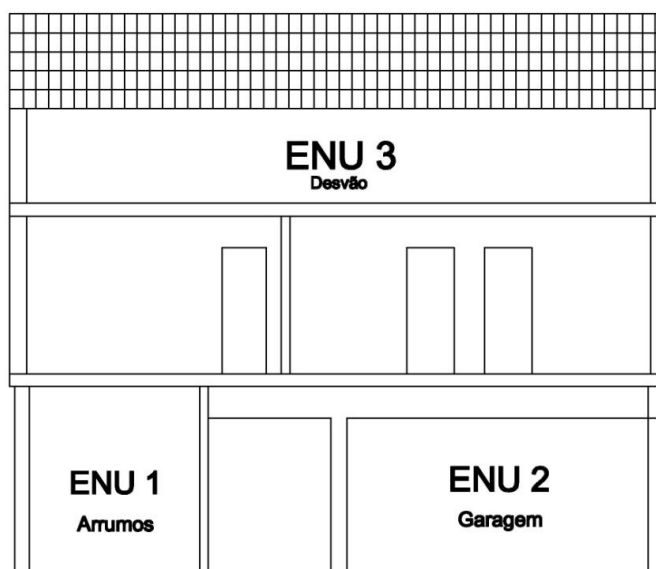


Figura 3.1. Corte da habitação e ilustração dos ENU's presentes no caso de estudo 1

As características das lajes, das paredes exteriores, em suma, as características de todos os elementos que separam dois espaços diferentes devem ser conhecidas. Isto porque algumas das metodologias em estudo têm em conta o valor de U dos elementos de separação no cálculo do coeficiente de redução de perdas.

Assim sendo, no caso de estudo 1 estão presentes paredes exteriores constituídas por uma fiada de alvenaria simples de tijolo furado com 20 cm de largura com reboco tradicional de argamassa de 2 cm de espessura em ambas as faces. As duas lajes de presentes na habitação são lajes aligeiradas de vigotas pré-esforçadas e abobadilhas cerâmicas com uma fiada de furos e base superior a 30 cm, com reboco tradicional de argamassa de 2 cm de espessura.

A Tabela 3.1 tem como propósito identificar todas as características importantes de cada ENU, ou seja, características que influenciem o cálculo do valor de b_{tr} .

Tabela 3.1. Características dos ENU's presentes no caso de estudo 1

	Arrumos	Garagem	Desvão
A_i (m ²)	8,1	76,64	79,0
A_{u1} (m ²)	12,6	61,1	100,0
A_{u2} (m ²)	---	---	20,0
V (m ³)	24,3	29,32	131,6
R_{ph}	1	3	10
B_i (m)	11,4	31,06	37,68
B_u (m)	11,4	77,12	48,1
Ψ_i (W/(m°C))	0,5	0,5	0,5
Ψ_u (W/(m°C))	0,5	0,5	0,5
U_i (W/(m ² °C))	2,0	2,0	2,86
U_{u1} (W/(m ² °C))	1,88	1,38	4,62
U_{u2} (W/(m ² °C))	---	---	2,0

Na Tabela 3.1. as variáveis apresentadas assumem o seguinte significado:

Quanto aos parâmetros geométricos:

A_i - Área do elemento que separa o EU do ENU,

A_{u1} - Área da parede que separa o ENU do EXT,

A_{u2} - Área de cobertura que separa o ENU do EXT,

V - Volume do ENU

B_i - Extensão das pontes térmicas lineares do elemento que separa o EU do ENU,

B_u - Extensão das pontes térmicas lineares do elemento que separa o ENU do EXT,

R_{ph} - Taxa de renovação horária do ar interior do ENU por permuta com o EXT;

Quanto aos parâmetros térmicos:

U_i - Coeficiente de transmissão térmica do elemento que separa o EU do ENU,

U_{u1} - Coeficiente de transmissão térmica da parede que separa o ENU do EXT,

U_{u2} - Coeficiente de transmissão térmica da cobertura que separa o ENU do EXT,

Ψ_i - Coef. de transmissão térmica linear em torno do elemento que separa o EU do ENU,

Ψ_u - Coef. de transmissão térmica linear em torno do elemento que separa o ENU do EXT;

3.2.2. Localização e dados climáticos

A habitação situa-se na freguesia de Pêro Viseu pertencente ao concelho do Fundão, distrito de Castelo Branco. Em conformidade o Despacho nº 15793-F/2013, com as retificações introduzidas pela Declaração de Retificação nº 130-2014 publicada no DR nº 29, Série II, de 11 Fevereiro de 2014, verifica-se que segundo a nomenclatura das unidades territoriais (NUTS III) a habitação situa-se no concelho do Fundão e se encontra na NUT III designada Cova da Beira. A fim de ser conseguida a determinação dos parâmetros climáticos é necessário conhecer a altitude a que a habitação se encontra, assim sendo determinou-se a altitude da habitação em estudo com o auxílio do *GoogleEarth*, sendo esta de 507 m. Na Tabela 3.2 são apresentados os parâmetros climáticos de referência e os valores corrigidos em função da altitude. É notório pela análise da Tabela 3.2 que os valores dos parâmetros são idênticos, mas este facto deve-se ao facto da altitude da habitação ser igual à altitude de referência.

Tabela 3.2. Parâmetros climáticos de referência e do caso de estudo 1

Cova da Beira	Z	M		GD		$\theta_{ext,i}$		G_{sul}
	(metros)	(meses)	^a (mês/Km)	°C.dia	^a (°C/Km)	°C	^a (°C/Km)	(kWh/m ²)/mês
REF	507	7,1	0	1687	1400	7,5	-5	140
Caso 1	507	7,1	-	1687	-	7,5	-	140

Conclui-se assim que o caso de estudo 1 para efeitos de zoneamento climático de inverno se encontra na zona climática I2 e para a estação de verão na zona climática V3.

3.2.3. Identificação dos ENU's e definição da envolvente térmica

No caso de estudo 1 como já foi referido no item 3.2.1 estão presentes três ENU's. Estes espaços não úteis são apresentados na Figura 3.2, que se trata do mesmo corte da habitação apresentado na Figura 3.1, mas agora com a envolvente do espaço útil identificada.

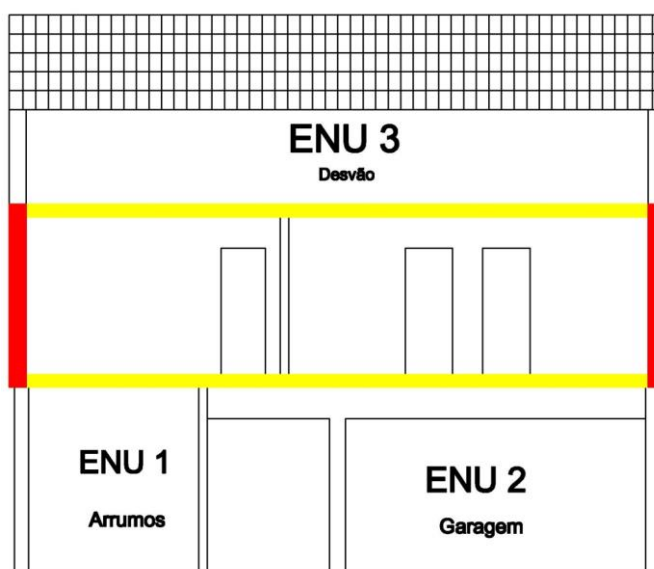


Figura 3.2. Identificação dos ENU's e envolvente térmica

3.2.4. Equipamentos utilizados e medições efetuadas

Para a obtenção dos perfis de temperatura, foram utilizados seis equipamentos idênticos. Cada um dos equipamentos em questão trata-se de um Easylog EL-GFX-2 (Figura 3.3) que regista a temperatura no local onde se situa em intervalos a definir pelo utilizador. Neste caso foram adotados intervalos de trinta minutos totalizando 805 medições. A Figura 3.4 ilustra a localização dos mesmos em toda a habitação, sendo de salientar que o equipamento número cinco foi colocado no exterior da habitação.



Figura 3.3. Equipamento Easylog EL-GFX-2

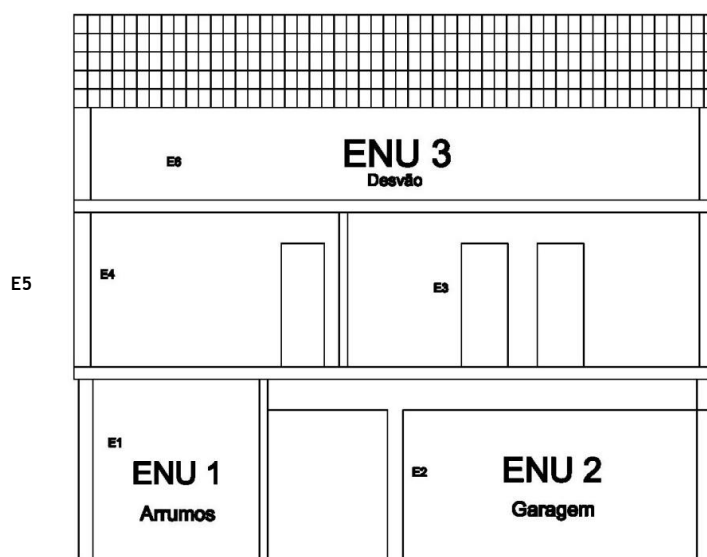


Figura 3.4. Localização de equipamentos na habitação

Todos os equipamentos foram programados para iniciarem as medições às 00:00 horas do dia 9 de Abril de 2016 e terminarem às 18:00 horas do dia 24 de Abril de 2016. As medições foram efetuadas no mesmo instante por todos eles, sendo estas intervaladas de trinta minutos, perfazendo assim um total de 805 medições.

3.2.5. Metodologia adotada e condicionantes do estudo

A metodologia adotada no tratamento de dados teve como objetivo o cálculo experimental do coeficiente de redução de perdas através dos perfis de temperatura recolhidos pelas medições efetuadas “*in situ*” aplicando a Equação 2.9. Desta forma seria possível a sua comparação com o coeficiente de redução de perdas fornecido por todas as regulamentações em estudo aplicando a metodologia de cada uma delas descrita no capítulo anterior.

Durante o processamento dos dados, um fator de extrema relevância tido em conta foi o sentido do fluxo de calor, uma vez que nem todas as medições efetuadas apresentavam gradientes térmicos em “cascata” e decrescentes do interior para o ENU e posteriormente do ENU para o exterior. Este facto deveu-se, muito provavelmente, à sobreposição dos efeitos da inércia térmica e da radiação solar, que são difíceis de isolar nestas situações sem os equipamentos de medição adequados. Assim, as medições do fluxo de calor que não respeitavam esta sequência foram desprezadas.

3.3. Caso de estudo 2

3.3.1. Descrição geral do edifício

O caso de estudo 2 trata-se de uma moradia unifamiliar constituída por dois pisos, sendo estes o espaço útil da habitação. Acima destes encontra-se um desvão fracamente ventilado, sendo este o único ENU presente na habitação.

Para análise do desvão em questão é importante saber as características e constituição da laje horizontal que separa o EU do ENU e da laje inclinada do desvão que separa o ENU do exterior. Assim sendo, a laje horizontal trata-se de uma laje aligeirada de dezanove centímetros de espessura com abobadilhas cerâmicas de uma fiada de furos e base superior a 30 cm, tendo na face inferior da laje dois centímetros de estuque tradicional e na sua face superior três centímetros de XPS. A laje inclinada trata-se também de uma laje aligeirada de dezanove centímetros de espessura com abobadilhas em EPS de base superior a 30 cm, sem revestimento na face inferior da laje e com ripas em PVC e a cobertura em telha de cimento na sua face superior.

Tabela 3.3. Características do ENU presente no caso de estudo 2

ENU	A_i (m^2)	A_u (m^2)	V (m^3)	R_{ph} (h^{-1})	B_i (m)	B_u (m)	Ψ_i ($W/(m^2C)$)	Ψ_u ($W/(m^2C)$)	U_i ($W/(m^2C)$)	U_u ($W/(m^2C)$)
Desvão	137,0	190,0	80,69	1	47,4	87,5	0,5	0,5	0,82	0,23

Onde,

Quanto aos parâmetros geométricos:

A_i - Área do elemento que separa o EU do ENU,

A_u - Área da parede que separa o ENU do EXT,

V - Volume do ENU,

R_{ph} - Taxa de renovação horária do ar interior do ENU por permuta com o EXT

B_i - Extensão das pontes térmicas lineares do elemento que separa o EU do ENU,

B_u - Extensão das pontes térmicas lineares do elemento que separa o ENU do EXT;

Quanto aos parâmetros térmicos:

U_i - Coeficiente de transmissão térmica do elemento que separa o EU do ENU,

U_u - Coeficiente de transmissão térmica da parede que separa o ENU do EXT,

Ψ_i - Coef. de transmissão térmica linear em torno do elemento que separa o EU do ENU,

Ψ_u - Coef. de transmissão térmica linear em torno do elemento que separa o ENU do EXT;

3.3.2. Localização e dados climáticos

A habitação situa-se na freguesia de Tortosendo pertencente ao concelho da Covilhã, distrito de Castelo Branco. Em conformidade com o Despacho nº 15793-F/2013 e as retificações introduzidas pela Declaração de Retificação nº 130-2014 publicada no DR nº 29, Série II, de 11 fevereiro de 2014, verifica-se que segundo a nomenclatura das unidades territoriais (NUTS III) a habitação situa-se no concelho da Covilhã se encontra na NUTIII designada Cova da Beira. De modo a determinar os parâmetros climáticos é necessário conhecer-se a altitude a que a habitação se encontra. Assim sendo, foi determinada a altitude da habitação em estudo com o auxílio do *GoogleEarth*, sendo esta de 615 m. Na Tabela 3.4 são apresentados os parâmetros climáticos de referência e os valores corrigidos em função da altitude.

Tabela 3.4. Parâmetros climáticos do caso de estudo 2

Cova da Beira	Z	M		GD		$\theta_{ext,i}$		Gsul
	(metros)	(meses)	a (mês/Km)	°C	a (°C/Km)	°C	a (°C/Km)	(kWh/m ²)/mês
REF	507	7,1	0	1687	1400	7,5	-5	140
Caso 1	615	7,1	-	1838	-	7,0	-	140

Conclui-se assim que o caso de estudo 2 para efeitos de zoneamento climático de inverno se encontra na zona climática I3 e para a estação de verão na zona climática V2.

3.3.3. Identificação dos ENU's e definição da envolvente térmica

O caso de estudo 2, como já foi referido no item 3.3.1, tem apenas presente um ENU, sendo este um desvão fracamente ventilado. As Figuras 3.5 e 3.6 ilustram cortes da habitação em diferentes direções. Nestas figuras é definida também a respetiva envolvente térmica.

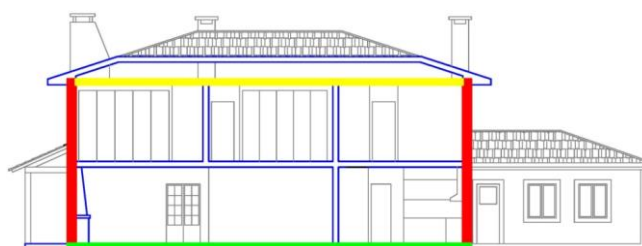


Figura 3.5. Corte a-a e respetiva envolvente térmica do caso de estudo 2

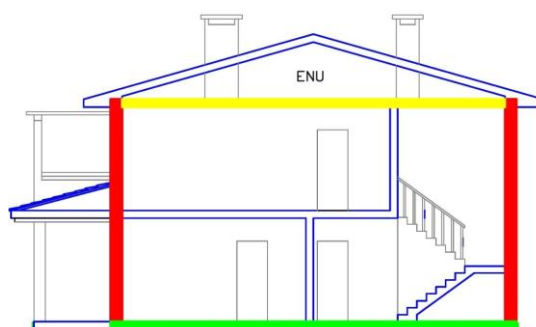


Figura 3.6. Corte b-b e respetiva envolvente térmica do caso de estudo 2

3.2.4. Equipamentos utilizados e medições efetuadas

À semelhança do caso de estudo 1, foram utilizados os mesmos equipamentos, sendo que neste caso foram aplicados apenas quatro. Para a determinação da temperatura interior foram colocados dois equipamentos no EU da habitação. A temperatura exterior e no ENU, foram medidas através da colocação de um equipamento no exterior da habitação e um outro no desvão.

Todos os equipamentos foram previamente programados para iniciarem as medições às 17:48 horas do dia 13 de Fevereiro de 2015 e terminarem às 22:24 horas do dia 14 de Fevereiro de 2015. As medições foram efetuadas no mesmo instante por todos eles, sendo estas intervaladas de um minuto, perfazendo assim um total de 1717 medições. A Fig. 3.7 identifica a localização dos equipamentos no caso de estudo 2.

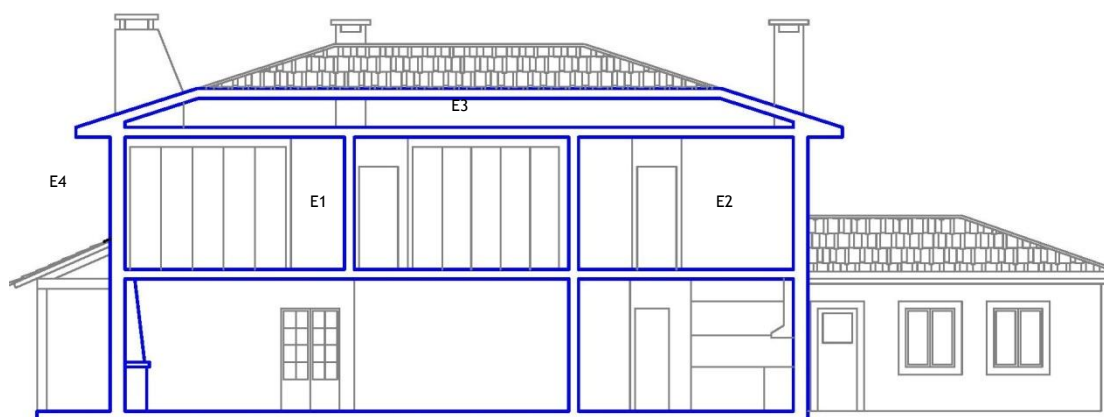


Figura 3.7. Localização de equipamentos na habitação

3.2.5. Metodologia adotada e condicionantes do estudo

A metodologia aplicada no caso de estudo 2 foi idêntica à aplicada no caso de estudo 1. Mais uma vez, através dos perfis térmicos foi calculado o valor do coeficiente de redução de perdas experimental. Este valor foi comparado com todos os outros valores fornecidos pelas regulamentações em estudo aplicando as metodologias descritas no capítulo anterior.

À semelhança da condicionante no caso do estudo 1, no caso de estudo 2 ocorreu novamente o sentido do fluxo de calor não ser o esperado em algumas medições. Assim sendo, todas as medições em que o fluxo de calor não se dava do interior para o ENU e posteriormente do ENU para o exterior foram desprezadas.

4. Análise e discussão dos resultados

4.1. Introdução

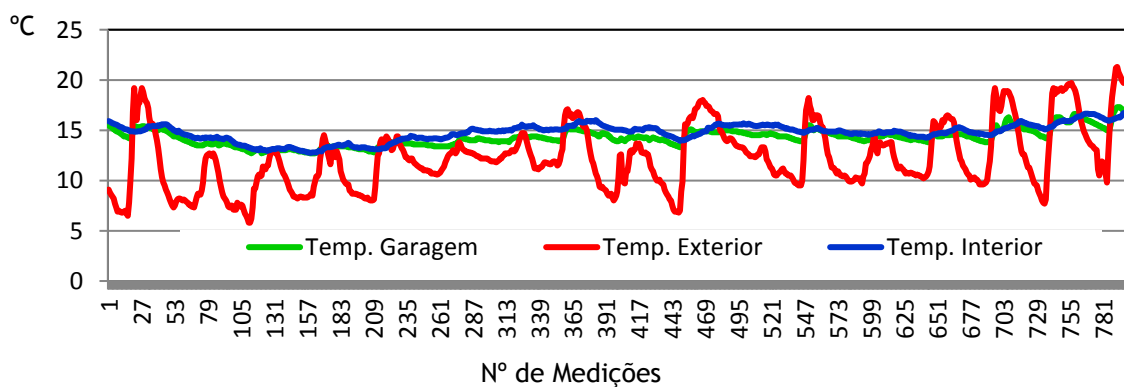
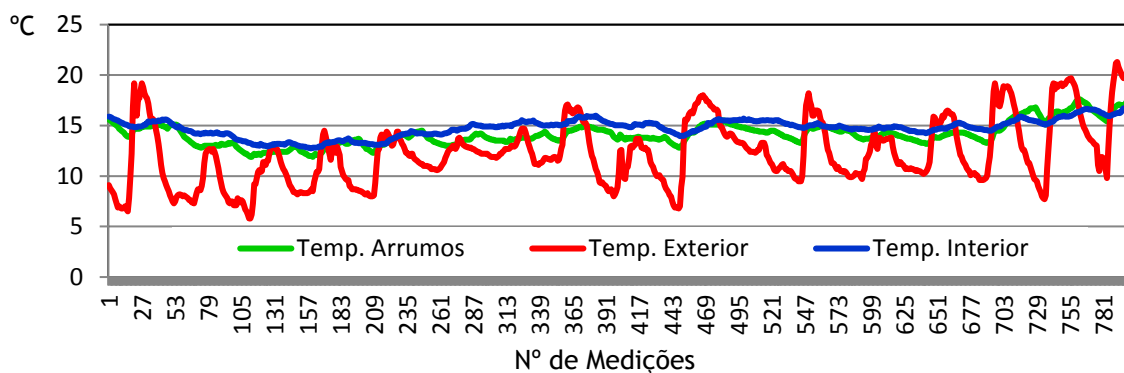
O presente capítulo tem por objetivo não só apresentar os perfis de temperaturas medidos experimentalmente nos dois casos de estudo, mas também efetuar a comparação dos valores de b_{tr} obtidos pelos diferentes regulamentos em estudo de modo a verificar qual deles se encontrará mais próximo do valor de b_{tr} medido experimentalmente.

De salientar que os resultados apresentados do coeficiente de redução perdas de cada ENU segundo cada uma das regulamentações em estudo resultam de um tratamento de dados extenso efetuado em Excel. Ao fim da realização de todo o tratamento de dados para os dois casos de estudo obtiveram-se aproximadamente 800 páginas, pelo que, se optou por simplesmente apresentar os resultados e não colocar esse mesmo tratamento de dados em anexo.

4.2. Caso de estudo 1

4.2.1. Perfis de temperatura

No caso de estudo 1, para os três ENU's presentes na habitação, foram registados os perfis de temperaturas, sendo que a Figura 4.1 representa o perfil registado para a divisão de arrumos, a Figura 4.2 representa o perfil registado para a garagem e por fim a Figura 4.3 representa o perfil registado para o desvão.



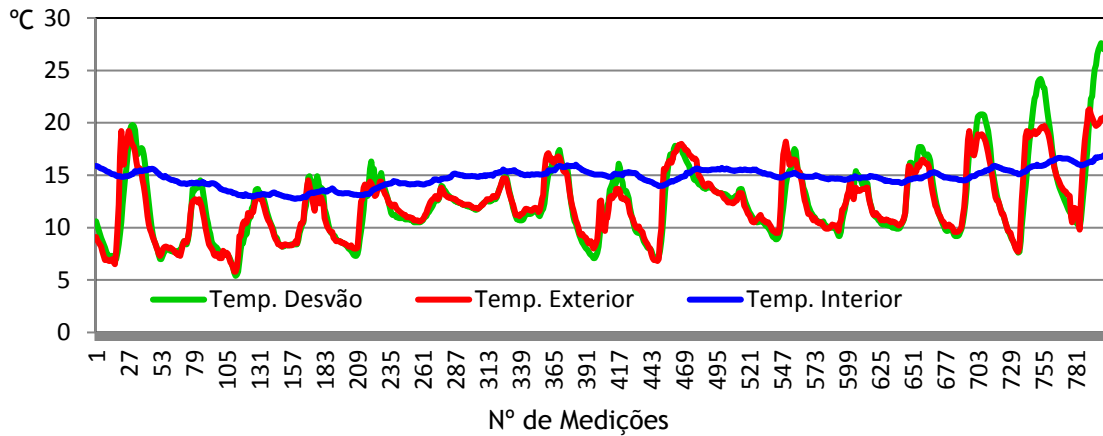


Figura 4.3. Perfil de temperatura ENU 3 (Desvão)

4.2.2. Determinação experimental de b_{tr}

Foi demonstrado no item 2.3, pela Equação 2.9, que o coeficiente de redução de perdas pode ser calculado da seguinte forma:

$$b_{tr} = \frac{\theta_i - \theta_u}{\theta_i - \theta_e} \quad (2.9)$$

Assim sendo, tendo por base os perfis de temperatura apresentados anteriormente, é notório que se encontram reunidos todos os dados de modo a ser possível calcular, para cada um dos ENU's presentes, não só o valor médio de b_{tr} mas também o seu valor a cada instante.

A Figura 4.4 ilustra o valor médio de b_{tr} obtido experimentalmente para cada um dos três ENU's presentes na habitação.

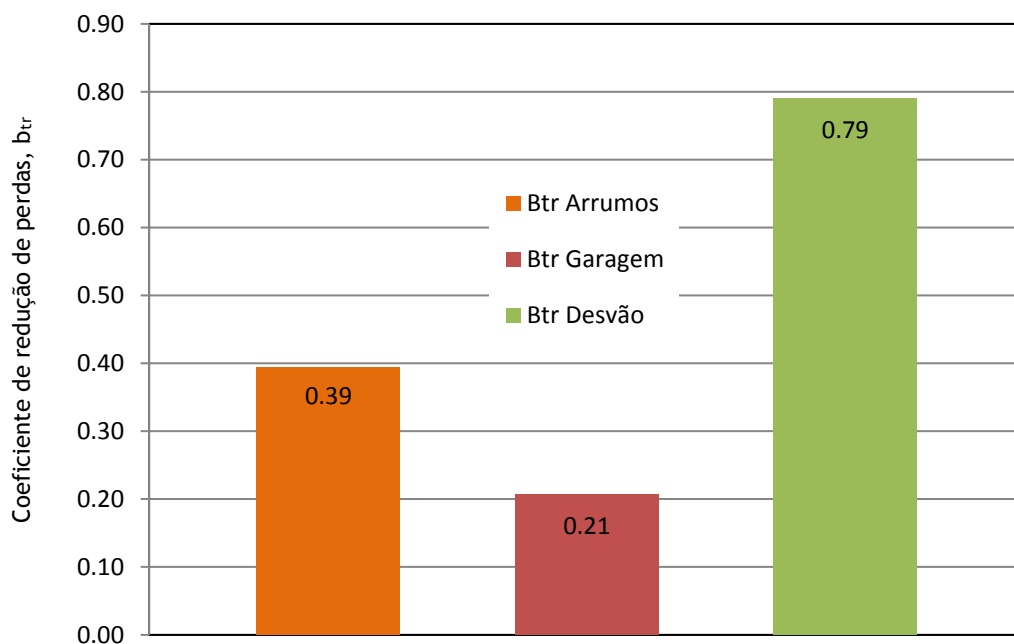


Figura 4.4. Valor médio experimental de b_{tr} para cada um dos três ENU's

4.2.3. Resultados dos modelos simplificados (BR443, RCCTE e REH)

Aplicando a metodologia de cada regulamento apresentada no item 2.5, e introduzindo as características de cada ENU presente na habitação descritas no item 3.2.3, foram obtidos os valores do coeficiente de redução de perdas para cada espaço não útil. As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 representam, respetivamente, os valores do coeficiente de redução de perdas para a divisão de arrumos, garagem e desvão.

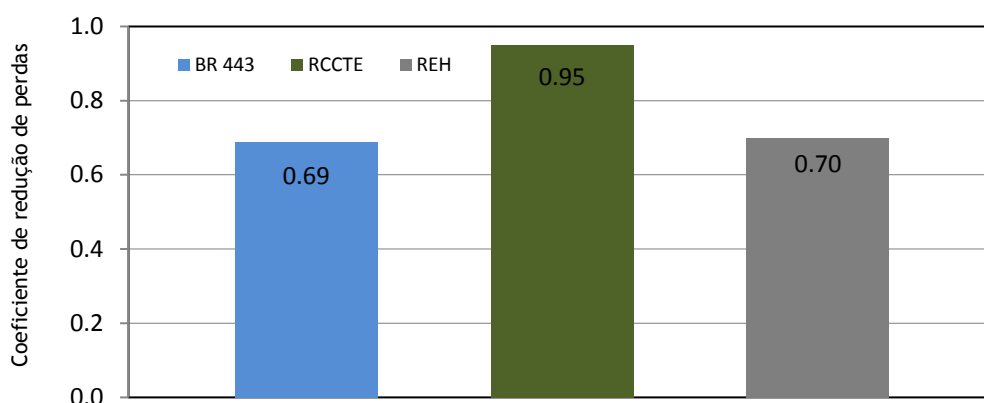


Figura 4.5. Valores de b_{tr} segundo métodos simplificados para o ENU 1 (Arrumos)

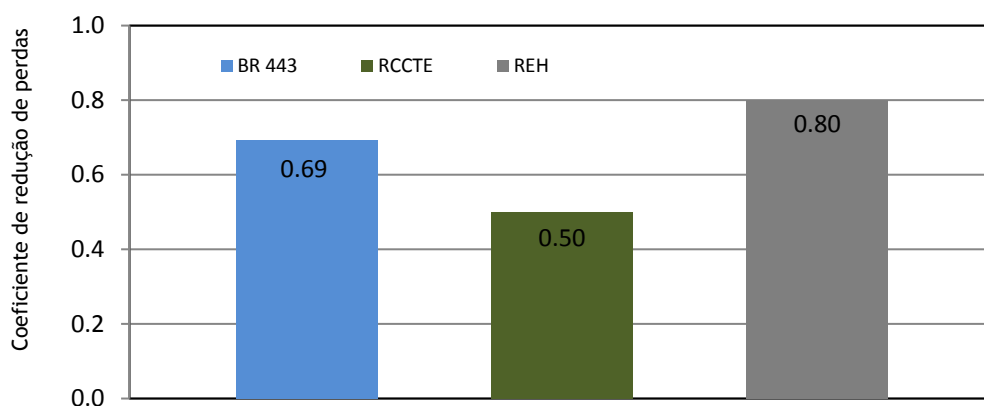


Figura 4.6. Valores de b_{tr} segundo métodos simplificados para o ENU 2 (Garagem)

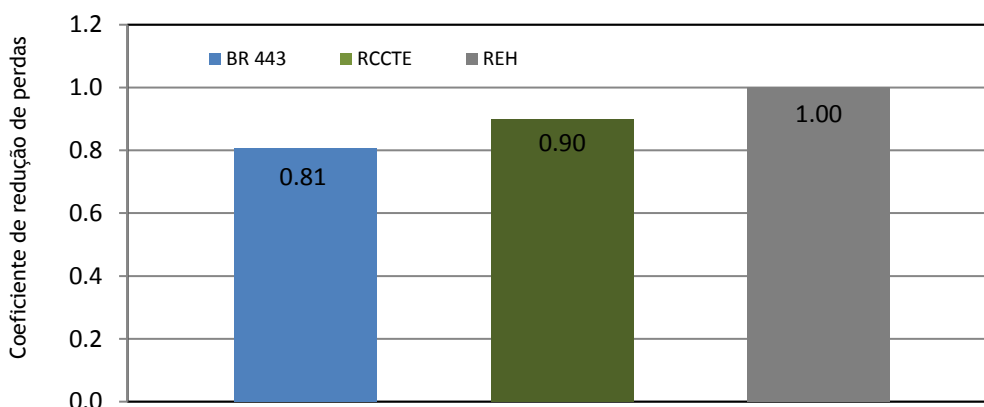


Figura 4.7. Valores de b_{tr} segundo métodos simplificados para o ENU 3 (Desvão)

4.2.4. Resultados do balanço energético detalhado e EN ISO 13789

Considere-se a metodologia apresentada no item 2.3 para o balanço energético detalhado e a metodologia da EN ISO 13789:2007 descrita no item 2.4. Substituindo em cada uma das metodologias referidas as características de cada ENU, obtiveram-se os valores do coeficiente de redução de perdas para cada um dos três ENU's presentes na habitação. As Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 representam os valores do coeficiente de redução de perdas, respetivamente, para a divisão de arrumos, garagem e desvão.

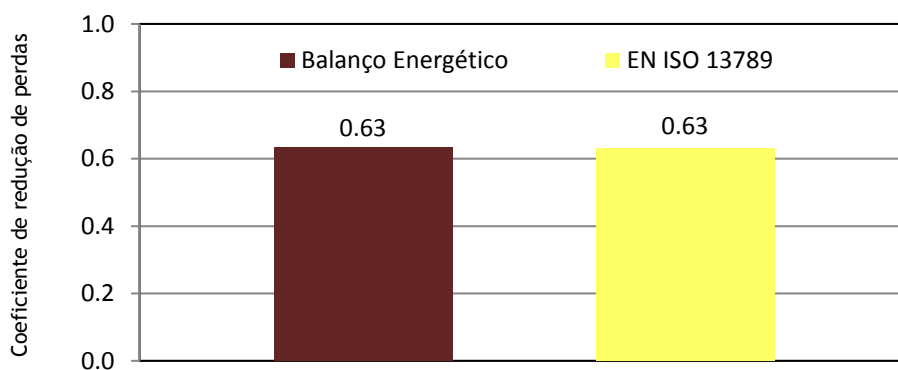


Figura 4.8. Valores de b_{tr} segundo métodos não simplificados para o ENU 1 (Arrumos)

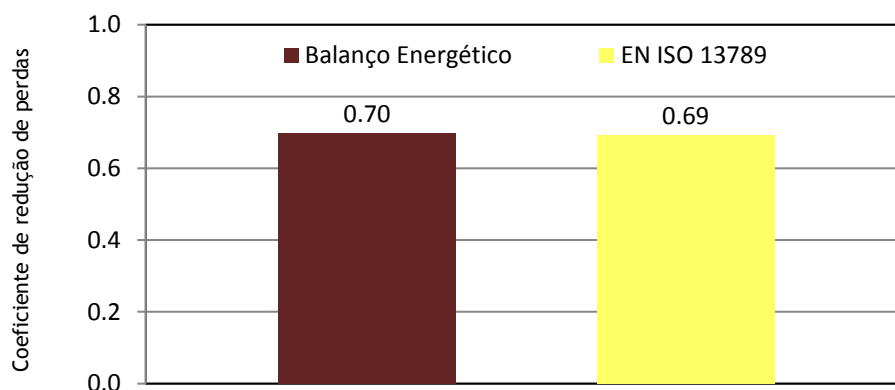


Figura 4.9. Valores de b_{tr} segundo métodos não simplificados para o ENU 2 (Garagem)

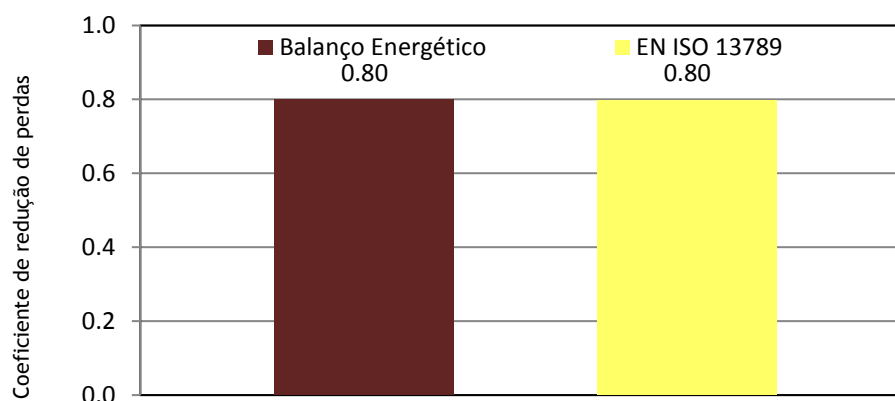


Figura 4.10. Valores de b_{tr} segundo métodos não simplificados para o ENU 3 (Desvão)

4.2.5. Comparação e análise de resultados obtidos

Para cada um dos três ENU's presentes na habitação são conhecidos os vários valores do coeficiente de redução de perdas, sendo eles, os valores obtidos pelas três regulamentações simplificadas em estudo, o valor calculado pelo balanço energético e finalmente o valor fornecido pela EN ISO 13789. Sendo também conhecido o valor do coeficiente de redução de perdas real, ou seja, medido experimentalmente, é assim possível a comparação de todos os restantes valores com o valor real e deste modo aferir qual deles se aproximará mais da realidade. As Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 têm por objetivo a ilustração dessa mesma comparação entre valores de coeficiente de redução de perdas para os ENU's arrumos, garagem e desvão, respetivamente.

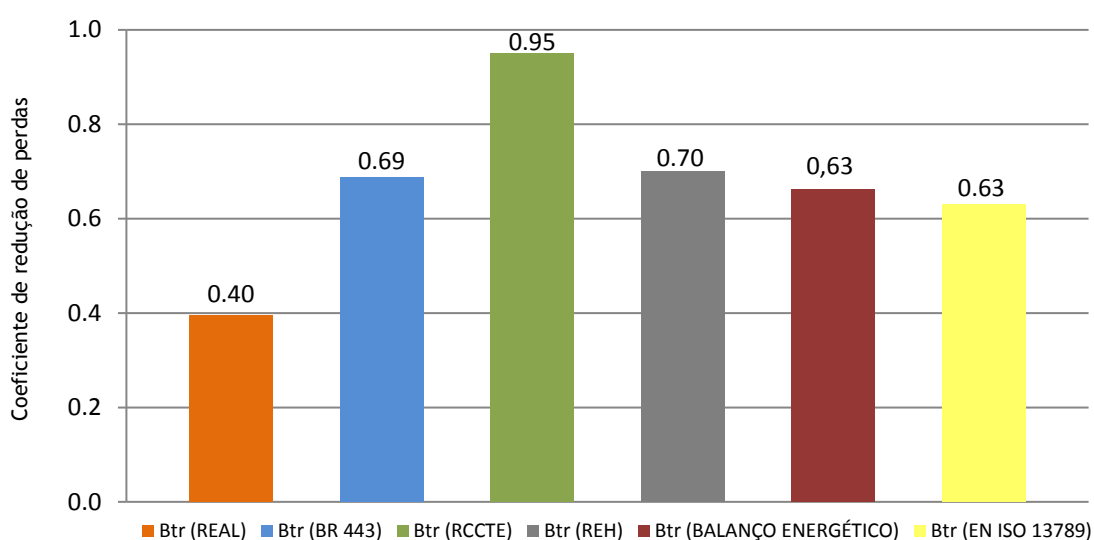


Figura 4.11. Comparação de valores de b_{tr} para o ENU 1 (Arrumos)

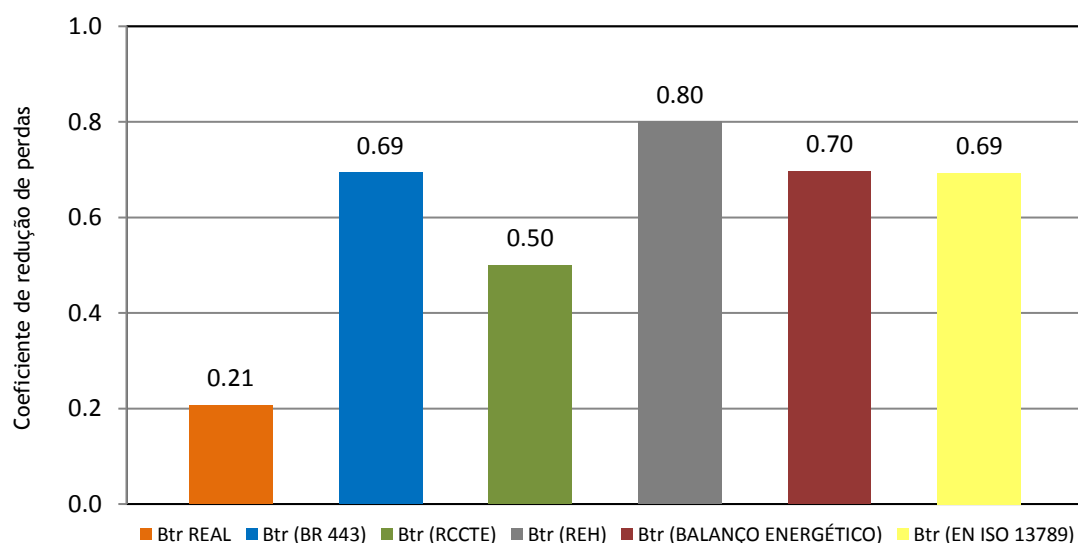


Figura 4.12. Comparação de valores de b_{tr} para o ENU 2 (Garagem)

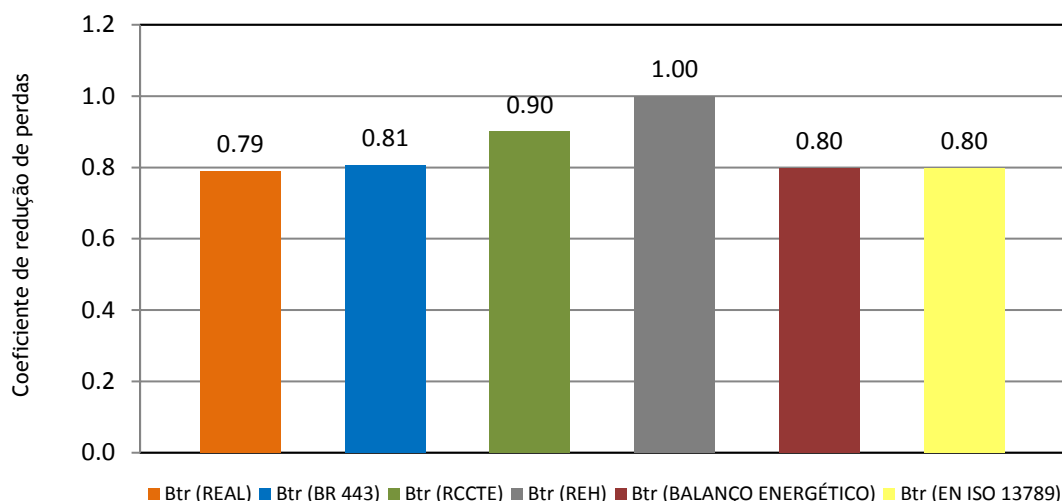


Figura 4.13. Comparação de valores de b_{tr} para o ENU 3 (Desvão)

Nas figuras 4.11, 4.12 e 4.13 a legenda de b_{tr} (REAL) pretende referir-se ao valor de b_{tr} obtido experimentalmente.

O caso de estudo 1 incluiu três espaços não úteis, um espaço de arrumos, a garagem e um desvão na cobertura. No caso dos arrumos e garagem o valor real do coeficiente de redução de perdas toma valores inferiores aos sugeridos por todas regulamentações analisadas (simplificadas e detalhadas). No que toca ao desvão, o valor real do coeficiente de redução de perdas é muito próximo do sugerido pelas regulamentações analisadas (simplificadas e detalhadas).

Acredita-se que as diferenças entre o valor real e os valores calculados com base na regulamentação, detetadas no caso dos arrumos e garagem, se devem em grande medida ao erro associado à estimativa da taxa de ventilação do ar interior do ENU. A BR 443, o método detalhado e a Norma Europeia EN ISO 13789 tiveram por base a mesma taxa de ventilação, estimada com base na proposta da EN ISO 13789. Por esse facto, estas apresentam valores semelhantes entre elas em todos os casos analisados. Acredita-se que, no caso dos arrumos e garagem, a não contabilização das perdas através do pavimento térreo terá tido pouca influência nos valores calculados, já que a temperatura desses ENU se situou em média nos 13 °C, próxima da temperatura do solo, e não muito afastada da temperatura registada no EU (≈ 15 °C). Por outro lado, por estes espaços se situarem no piso inferior da habitação e parcialmente sombreados na sua envolvente, acredita-se que o efeito da radiação solar foi pouco significativo.

No caso do desvão da cobertura, sendo claramente fortemente ventilado, com temperaturas no desvão similares à exterior, todos os valores calculados com base na BR 443, o método detalhado e a Norma Europeia EN ISO 13789 apresentam valores semelhantes entre si e muito próximos do valor real. O RCCTE e o REH apresentam valores superiores do b_{tr} comparativamente aos restantes métodos analisados.

Em todos os ENU do caso de estudo 1 verificou-se que a BR 443, o método detalhado e a Norma Europeia EN ISO 13789 apresentam sempre valores próximos entre si, enquanto os valores do RCCTE e do REH diferem entre si e oscilam na sua generalidade acima dos valores da BR 443, do

método detalhado e da Norma Europeia EN ISO 13789, conduzindo à contabilização de maiores perdas térmicas para os elementos em contacto com os ENU. Esta diferença parece ter resultado essencialmente de dois fatores: as diferenças na taxa de renovação do ar e o facto do RCCTE e do REH não tomarem em conta as características térmicas dos elementos que separam o ENU do EU e do exterior, mas apenas as suas áreas.

4.2. Caso de estudo 2

4.2.1. Perfis de temperatura

No caso de estudo 2 para o ENU presente na habitação foi registado o perfil de temperaturas, sendo que a Figura 4.14 ilustra uma representação do mesmo.

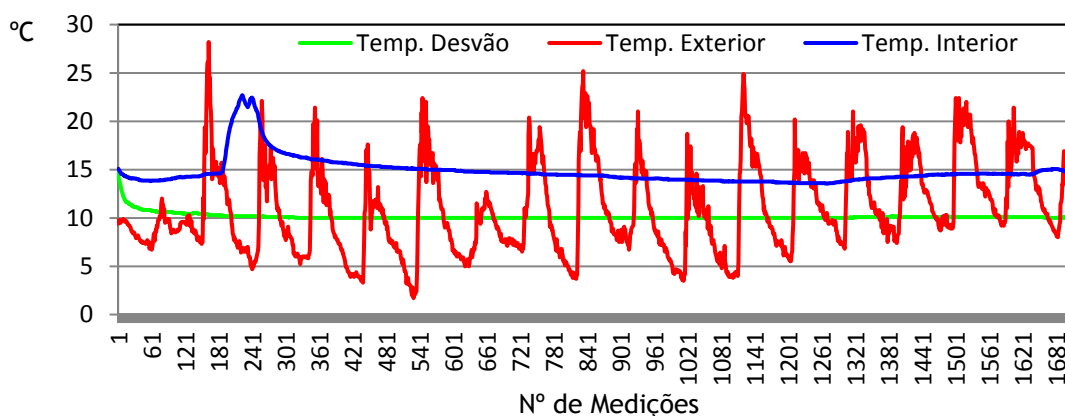


Figura 4.14. Perfil de temperatura do ENU presente no caso de estudo 2

4.3.2. Determinação experimental de b_{tr}

Da mesma maneira que no item 4.2.2, é tomada a Equação 2.9 para o cálculo do coeficiente de redução de perdas.

$$b_{tr} = \frac{\theta_i - \theta_u}{\theta_i - \theta_e} \quad (2.9)$$

Assim sendo, e tendo por base o perfil de temperaturas apresentado anteriormente na Figura 4.14, encontram-se reunidos todos os dados para ser efetuado o cálculo do valor médio de b_{tr} para o ENU presente na habitação. A Figura 4.15 apresenta o valor médio de b_{tr} obtido experimentalmente.

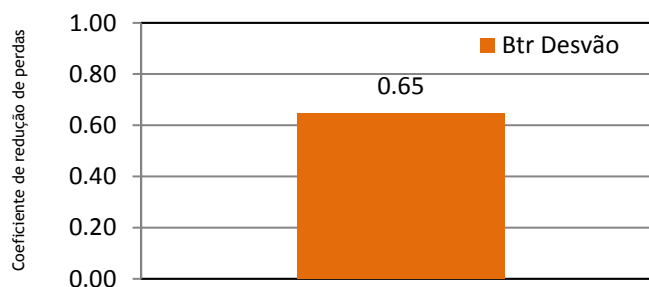


Figura 4.15. Valor médio de b_{tr} para o ENU presente no caso de estudo 2

4.3.3. Resultados dos modelos simplificados (BR443, RCCTE e REH)

Como já foi referido no item 4.2.3, aplicando a metodologia de cada regulamento apresentada no item 2.5 e introduzindo as características de cada ENU presente na habitação descritas em 3.3.3, foram obtidos os valores do coeficiente de redução de perdas. A Figura 4.16 ilustra os valores obtidos por cada um dos regulamentos simplificados.

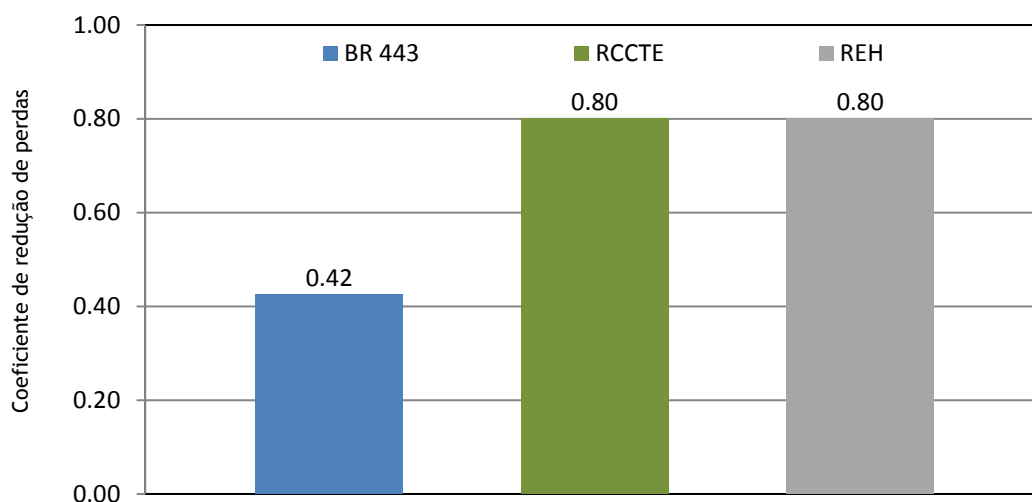


Figura 4.16. Valores de b_{tr} segundo métodos simplificados para o ENU do caso de estudo 2

4.3.4. Resultados do balanço energético detalhado e EN ISO 13789

À semelhança da análise apresentada no item 4.2.4, foi aplicada a metodologia descrita no item 2.3 para o balanço energético detalhado e a metodologia descrita no item 2.4 da EN ISO 13789. Substituindo em cada uma das metodologias referidas as características do ENU, obtiveram-se os valores do coeficiente de redução de perdas. A Figura 4.17 ilustra os valores do coeficiente de redução de perdas do ENU segundo o balanço energético detalhado e a EN ISO 13789.

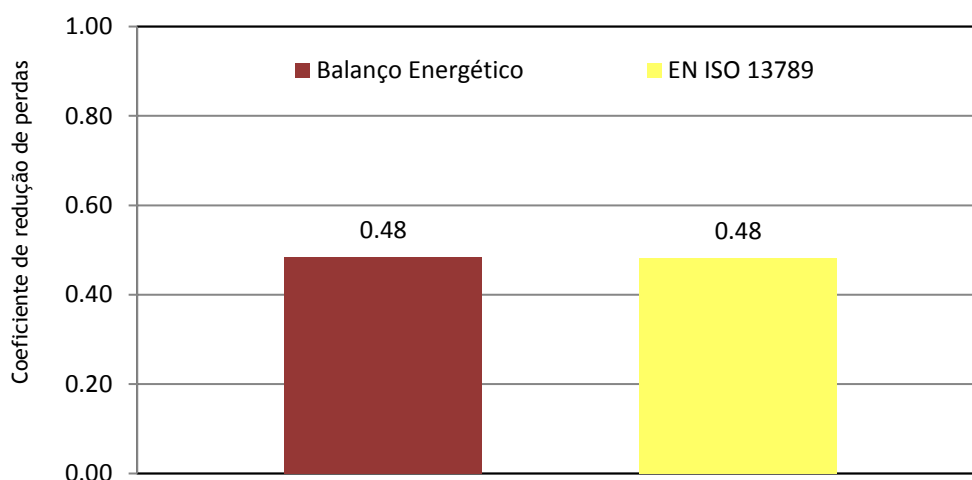


Figura 4.17. Valores de b_{tr} segundo métodos não simplificados para ENU do caso de estudo 2

4.3.5. Comparação e análise de resultados obtidos

Sendo conhecido o coeficiente de redução de perdas real do ENU presente na habitação e conhecidos também não só os valores de b_{tr} das três regulamentações simplificadas em estudo mas também o valor calculado pelo balanço energético detalhado e finalmente o valor fornecido pela EN ISO 13789 é assim possível efetuar uma comparação global entre todos os valores de modo a concluir qual das diferentes abordagens se aproxima mais do real. A Figura 4.18 ilustra essa mesma comparação de valores de b_{tr} do ENU.

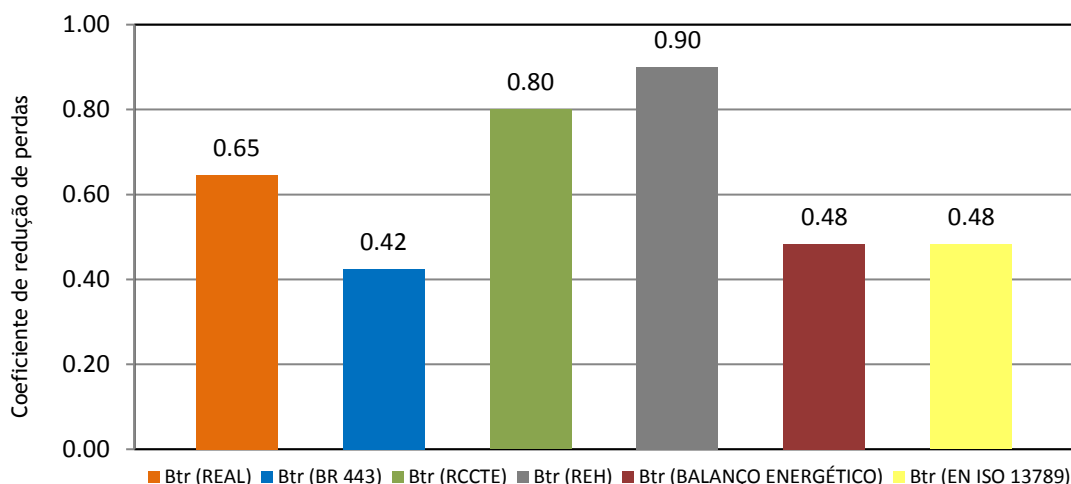


Figura 4.18. Comparação de valores de b_{tr} do ENU presente no caso de estudo 2

Da mesma forma que no caso de estudo 1, na figura 4.18, a legenda de b_{tr} (REAL) pretende referir-se ao valor de b_{tr} obtido experimentalmente.

O caso de estudo 2 incluiu apenas um ENU, constituído por um desvão na cobertura, fracamente ventilado e com isolante térmico na laje de esteira horizontal e na laje de cobertura inclinada. O valor real do coeficiente de redução de perdas registado neste espaço situa-se ligeiramente acima daqueles obtidos pela BR 443, método detalhado e EN ISO 13789, mas ligeiramente abaixo dos valores obtidos pelo RCCTE e REH. Claramente, o RCCTE e o REH sobrestimam o valor do coeficiente de redução de perdas, conduzindo à contabilização de maiores perdas térmicas para os elementos em contacto com os ENU. Em média, os valores da BR 443, método detalhado e EN ISO 13789 apresentam um b_{tr} de 0,46, enquanto o valor real foi de 0,65 e o do REH 0,90.

Acredita-se que, no caso deste desvão, as diferenças possam estar relacionadas com a ventilação assumida para o ENU, que foi semelhante para a BR 443, o método detalhado e a EN ISO 13789. Outro aspeto que pode ter influenciado os resultados da BR 443, do método detalhado e da EN ISO 13789, resultou do facto de não se ter acesso à constituição detalhada dos elementos construtivos, tendo-se adotado valores do coeficiente de transmissão térmica dos elementos construtivos do ENU através de um cálculo aproximado. As medições neste ENU foram efetuadas no mês de fevereiro e durante a noite, pelo que se acredita que o efeito da radiação solar, mesmo considerando o atraso térmico, não foi significativo.

5. Conclusões e propostas para trabalhos futuros

5.1. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo a comparação do valor real do coeficiente de redução de perdas com os valores sugeridos pelas três regulamentações simplificadas em estudo, sendo elas, o RCCTE, o REH e a BR 443. O valor real foi ainda comparado com um balanço energético detalhado e com a Norma Europeia EN ISO 13789.

É importante esclarecer que as metodologias simplificadas propostas no REH, e também no seu precedente, o RCCTE, são correntemente usadas pelos projetistas e Peritos Qualificados (PQ) na análise do desempenho energético e na certificação energética, respetivamente. Não obstante, importa também referir que esses regulamentos remetem para um cálculo mais detalhado de acordo com a EN ISO 13789, deixando essa opção ao critério dos projetistas e PQ.

Em síntese, a aplicação da EN ISO 13789 já está prevista no REH, mas por resultar num trabalho mais moroso, ela é preterida em favor de uma metodologia simplificada. O presente estudo pretendeu identificar as principais diferenças entre os valores reais, registados em dois casos de estudo, e aqueles obtidos pelos diferentes métodos e, com isso, identificar possíveis elementos adicionais a ter em conta na metodologia simplificada do REH que, sem a tornar exaustiva, melhore a qualidade da previsão nela contida.

Do estudo realizado podem retirar-se as seguintes conclusões:

- 1) Na sua generalidade, os procedimentos simplificados definidos no RCCTE e no REH sobrestimam os valores do coeficiente de redução de perdas dos ENU comparativamente aos restantes métodos analisados (BR 443, método detalhado e EN ISO 13789), conduzindo à contabilização de maiores perdas térmicas para os elementos em contacto com esses ENU;
- 2) Acredita-se que as diferenças entre o valor real (registado) e os valores calculados com base em toda a regulamentação analisada se devem em grande medida ao erro associado à estimativa da taxa horária de renovação do ar interior do ENU, por troca com o ar exterior;
- 3) As características térmicas dos elementos que separam o ENU do EU e do exterior são relevantes para a estimativa do coeficiente de redução de perdas do ENU;
- 4) A contabilização apenas das áreas dos elementos que separam o ENU do EU e do exterior, mesmo que associadas a valores de referência das características térmicas desses elementos, não permite a correta diferenciação de situações de ENU com e sem isolamento, resultando em prejuízo de uma melhor estimativa do coeficiente de redução de perdas;
- 5) Presume-se que a não contabilização das perdas através do pavimento térreo terá tido pouca influência nas diferenças registadas entre os valores reais (medidos) e aqueles obtidos através de toda a regulamentação analisada;

6) Presume-se que o efeito da radiação solar seja pouco significativo para espaços situados no piso inferior da habitação e parcialmente sombreados na sua envolvente, quando as medições são efetuadas na estação de inverno;

7) Presume-se que o efeito da radiação solar seja pouco significativo para espaços normalmente expostos a radiação solar durante o dia e fracamente ventilados, como é o caso dos desvãos na cobertura, se as medições das temperaturas dos ENU foram efetuadas no inverno, durante a noite e com a duração suficiente para dissipar os efeitos resultantes da inércia térmica, conjugadas com o tratamento adequado dos dados que elimine registos anómalos pontuais associados ao atraso térmico;

8) No caso de ENU fortemente ventilados, com temperaturas similares à exterior, o valor real registado é muito próximo dos valores calculados com base na BR 443, método detalhado e EN ISO 13789 mas, ainda assim, ligeiramente inferiores aos obtidos pelo RCCTE e REH.

5.2. Propostas para trabalhos futuros

Este trabalho mostrou a viabilidade e interesse da comparação entre os valores do coeficiente de redução de perdas medidos experimentalmente e aqueles calculados segundo três regulamentos simplificados e outros dois métodos não simplificados. O tempo de execução do projeto aqui apresentado foi relativamente curto e a análise efetuada só pode ser encarada como um trabalho exploratório prévio, tendo em vista estabelecer as premissas para uma análise mais alargada. Obviamente muitos assuntos ficaram por investigar e são merecedores de uma análise mais aprofundada em trabalhos futuros.

Pelo exposto, propõem-se os seguintes trabalhos futuros:

1) O estudo e a medição experimental do coeficiente de redução de perdas de diferentes tipos de ENU com equipamento adequado que permita avaliar os parâmetros térmicos dos elementos construtivos e isolar e perceber os efeitos da inércia térmica, dos ganhos por radiação solar e das perdas pelo pavimento;

2) O estudo dos ENU propostos na alínea anterior recorrendo a uma análise dinâmica através de *software* adequado;

3) O desenvolvimento de uma proposta de melhoria da metodologia simplificada adotada pelo REH para a estimativa do coeficiente de redução de perdas, através da introdução de alguns elementos adicionais que, sem a tornar exaustiva, melhore a qualidade da previsão nela contida.

4) O alargamento do estudo à estação de arrefecimento;

Referências Bibliográficas

Documentos normativos e especificações

BR 443:2006 - *Conventions for U-value calculations*, BRE Scotland, UK, 2006

Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto - *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH)*, Diário da República, 1.ª Série, N.º 159, 2013.

Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de abril - *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)*, Diário da República, 1.ª Série A, N.º 67, 2006.

Diretiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro de 2002, relativa ao desempenho energético dos edifícios, *Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, 4.1.2003 PT.

Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação), *Energy Performance of Buildings Directive (Recast EPBD)*, Jornal Oficial da União Europeia, 18.6.2010 PT.

EN 15217:2007 - *Energy performance of buildings - Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings*, CEN, May 2007

EN ISO 13789:2007 - *Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation method*

SEAI-Sustainable Energy Authority of Ireland- *Adjusted U value for elements adjacent to unheated spaces for use in the Simplified Building Energy Model (SBEM)*, Ireland, Oct. 2013

Outras referências

Carlos, Jorge M.S.; Nepomuceno, Miguel C.S. - *A simple methodology to predict heating load at an early design stage of dwellings*, in «Energy and Buildings», 55, 2012, p. 198-207.

Carlos, Jorge S.- *Simulation of the influence of an attic on the building energy efficiency in the Portuguese climate*, in «Indoor and Built Environment», 25(4), 2016, p. 674-690.

Nepomuceno, Miguel C.S. - *Física das Construções: Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE)*. «Documento interno, não editado, de Apoio às Aulas Teóricas e práticas da disciplina de Física das Construções», UBI, 2008 (330 pág.)

Nepomuceno, Miguel C.S. - *Física das Construções: Desempenho Energético de Edifícios (REH)*. «Documento interno, não editado, de Apoio às Aulas Teóricas e práticas da disciplina de Física das Construções», UBI, 2014 (270 pág.)

