

AGRADECIMENTOS

Quero aqui exprimir uma palavra de apreço a todos os que de uma forma decisiva contribuíram para a elaboração deste trabalho.

À orientadora, Doutora *Senhorinha de Fátima Capela Fortunas Teixeira*, pela orientação científica, pelo apoio, pela dedicação e total disponibilidade que sempre demonstrou durante este trabalho, sem o qual este trabalho não teria sido possível.

À co-orientadora, Doutora Maria Manuela Matos Neves, pela sua disponibilidade na orientação, e pelas sugestões e valiosas críticas nos testes feitos ao modelo para vários tecidos.

Ao Doutor José Carlos Fernandes Teixeira, do Departamento de Engenharia Mecânica, pela sua ajuda insubstituível na compreensão do modelo físico.

À Doutora Isabel Maria Barros, pelo seu empenhamento na revisão final da tese e a todas as investigadoras do Centro de investigação CITEPE, onde este trabalho está inserido, a boa disposição e todas as ajudas pontuais.

Ao Departamento de Produção e Sistemas, em particular ao pessoal técnico e administrativo, que sempre se mostrou disponível para qualquer ajuda.

À minha colega e amiga Maria Lima Ferreira, pelo seu encorajamento e disponibilidade manifestadas.

MODELO TÉRMICO APLICADO À CARACTERIZAÇÃO DO CONFORTO PROPORCIONADO PELO VESTUÁRIO

De forma a obter produtos de maior qualidade e com maior valor acrescentado, a indústria portuguesa tem que procurar responder eficazmente às exigências e necessidades dos consumidores, que incluem o conforto térmico.

Estas novas exigências abriram uma enorme variedade de áreas de pesquisa e desenvolvimento. Para responder a estes desafios, a componente da simulação numérica integrada em aplicações informáticas, fáceis de usar, será uma ferramenta indispensável no estudo do comportamento de novos tecidos capazes de responder a determinado conjunto de características funcionais.

Neste trabalho, foi implementado um modelo de transferência de calor e massa, transiente e unidimensional para simulação do comportamento de um tecido. O modelo implementado é constituído por duas equações diferenciais parciais, uma simulando a temperatura, outra a massa volúmica do vapor de água. É possível ainda obter em cada instante de tempo, a quantidade de água embebida no tecido. São considerados os fenómenos de transferência por condução, por difusão e ainda o fenómeno de sorção. O tecido pode trocar calor e massa com o meio ambiente, por convecção.

Para facilitar o uso deste programa de cálculo, foi desenvolvida uma aplicação informática, que inclui uma interface gráfica para entrada de dados pelo utilizador e visualização dos resultados. Esta aplicação foi testada para vários tecidos (naturais e sintéticos), com diferentes propriedades físicas e condições de fronteira.

Este modelo poderá ser integrado num modelo de termoregulação que descreve as complexas trocas entre o corpo humano e o meio ambiente, através do vestuário, e criar assim uma ferramenta útil no cálculo do conforto térmico fisiológico proporcionado por novos tecidos.

THERMAL MODEL APLICABLE TO THE CHARACTERIZATION OF THE THERMAL COMFORT PROVIDED BY CLOTHING

In order to enhance the quality and added value of their products, the Portuguese industry must react to the consumer demands. Amongst the mains criteria, the thermal comfort is becoming a pressing issue.

Such new requirements open new fields in research and development, in which computer simulation plays an important role.

In the present work, a transient model for heat and mass transfer in a fabric has been implemented. The model is based upon two partial differential equations which are solved for the temperature and vapour density. From the solution, the amount of water dissolved in the fabric can be calculated. The model includes effects such as heat and mass diffusion, sorption and convection to the environment.

In order to make the model user friendly, a software application has been developed. This makes it easier to introduce the input data and visualize the results.

The model has been tested for various materials and can be integrated into a wider model for the thermal regulation of the human body. Such tool could be very useful for designing new fabrics for clothing applications.

Índice

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Índice	v
Lista de Figuras	vii
Lista de Símbolos	x

Capítulo

1. Introdução

1.1 Conforto Térmico do Indivíduo	1
1.2 Vestuário	3
1.3 Modelação Matemática de Tecidos	5
1.4 Objectivos do Trabalho	6
1.5 Metodologia Adoptada	6
1.6 Estrutura do Relatório	7

2. Modelo Matemático e Solução Numérica

2.1	Equações do Modelo	8
2.2	Solução Numérica	13
2.2.1	Integração no espaço	13
2.2.2	Integração no tempo	17
2.2.3	Discretização final das equações do modelo	18
2.2.4	Processo iterativo de solução	20
2.3	Algoritmo de Cálculo	21

3. Estrutura do Programa e Interface

3.1	Estrutura da Aplicação Informática	23
3.2	Interface do Programa “Tecidos”	25

4. Resultados e Discussão

4.1	Introdução	30
4.2	Resultados Obtidos	31
4.2.1	Algodão	32
4.2.2	Poliéster	35
4.3	Sensibilidade do Modelo	38
4.3.1	Tipo de tecidos	39
4.3.2	Condições de fronteira	44

5. Conclusões e Trabalho Futuro

5.1	Principais Conclusões	47
5.2	Sugestões de Trabalho Futuro	48

Referências Bibliográficas	50
---	-----------

Lista de Figuras

Figura 2.1	Volume de cálculo	10
Figura 2.2	Volume de controlo a 1D	14
Figura 2.3	Dimensões do volume de controlo a 1D	14
Figura 3.1	Estrutura da aplicação informática	24
Figura 3.2	Janela da aplicação informática “Tecidos”, onde está representada a estrutura geral da interface	25
Figura 3.3	Janela da aplicação informática “Tecidos”, onde estão representados os parâmetros numéricos necessários à execução do programa	26
Figura 3.4	Janela da aplicação informática “Tecidos”, onde são mostrados os tipos de tecido disponíveis	27
Figura 3.5	Janela da aplicação informática “Tecidos”, onde é apresentado o tecido seleccionado pelo utilizador	28
Figura 3.6	Janela da aplicação informática “Tecidos”, onde são apresentados os resultados	28
Figura 4.1	Perfil da temperatura num tecido de algodão na direcção da espessura, para 10 segundos, 2 minutos e 30 segundos, e 60 minutos	32
Figura 4.2	Perfil da massa volúmica de vapor de água no algodão, na espessura do tecido, para 10 segundos e 60 minutos	33
Figura 4.3	Evolução da temperatura no ponto médio do tecido de algodão, para um período de 60 minutos	33

Figura 4.4	Evolução da temperatura no ponto médio do tecido de algodão, para um período de 2 minutos e 30 segundos	34
Figura 4.5	Evolução da massa volúmica de vapor de água no ponto médio do tecido em algodão para 15 minutos	35
Figura 4.6	Evolução da quantidade de água embebida (ε_{bw}) no algodão para um período de 60 minutos	35
Figura 4.7	Perfil da temperatura num tecido de poliéster na direcção da espessura para 10 segundos	36
Figura 4.8	Perfil da massa volúmica de vapor de água no poliéster para 10 segundos	36
Figura 4.9	Evolução da temperatura do ponto médio no tecido de poliéster para 15 minutos	37
Figura 4.10	Evolução da massa volúmica de vapor de água no ponto médio do tecido de poliéster para 15 minutos	37
Figura 4.11	Evolução da quantidade de água (ε_{bw}) no ponto médio do tecido de poliéster para 15 minutos	38
Figura 4.12	Perfil da temperatura para tecidos naturais: lã, seda e algodão, ao fim de 2 minutos e 30 segundos	39
Figura 4.13	Perfil da massa volúmica de vapor de água para tecidos naturais: lã, seda e algodão no final de 2 minutos e 30 segundos	40
Figura 4.14	Evolução da temperatura no ponto médio para tecidos naturais: lã, seda e algodão, ao fim de 2 minutos e 30 segundos	40
Figura 4.15	Evolução da temperatura para tecidos naturais: lã, seda e algodão para um período de 60 minutos	41
Figura 4.16	Evolução da massa volúmica de vapor de água para tecidos naturais: lã, seda e algodão para um período de 60 minutos	41
Figura 4.17	Evolução da quantidade de água para tecidos naturais: lã, seda e algodão para 60 minutos	42
Figura 4.18	Perfil da temperatura em tecidos sintéticos (poliamida e poliéster) para 2 minutos e 30 segundos	42
Figura 4.19	Perfil da massa volúmica de vapor de água em tecidos artificiais para 2 minutos e 30 segundos	43

- Figura 4.20 Evolução da quantidade de água embebida em tecidos sintéticos (poliamida e poliéster) para 15 minutos 43
- Figura 4.21 Evolução da temperatura no ponto médio dum tecido híbrido (lã e poliéster), para um período de 15 minutos 44
- Figura 4.22 Comparação de valores da temperatura ao longo do tempo obtidos para diferentes coeficientes de transferência de calor por convecção ($h_c = 21.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ s})$ (a) e $h_c = 40.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ s})$ (b)) 45
- Figura 4.23 Perfil da água na espessura do tecido, para 10 segundos, com condições de fronteira diferentes: $(T_{pele} = 32^\circ \text{C}; \phi = 1)$ e $(T_{ambiente} = 20^\circ \text{C}; \phi = 0.65)$ 45
- Figura 4.24 Perfil da massa volúmica de vapor de água para 10 segundos $(T_{pele} = 32^\circ \text{C}; \phi = 1)$ e $(T_{ambiente} = 20^\circ \text{C}; \phi = 0.65)$ 46
- Figura 4.25 Perfil da temperatura para 15 minutos $(T_{pele} = 32^\circ \text{C}; \phi = 1)$ e $(T_{pele} = 20^\circ \text{C}; \phi = 0.65)$ 46

Lista de Símbolos

a	Coeficientes da equação discretizada	—
A	Área	m^2
c_p	Capacidade calorífica a pressão constante do volume de cálculo	J/kgK
$(c_p)_{ds}$	Capacidade calorífica a pressão constante do sólido seco	J/kgK
$(c_p)_w$	Capacidade calorífica a pressão constante da água	J/kgK
$(c_p)_v$	Capacidade calorífica a pressão constante do vapor de água	J/kgK
$(c_p)_a$	Capacidade calorífica a pressão constante do ar seco	J/kgK
d_f	Diâmetro efectivo da fibra	m
D_a	Coeficiente de difusão do vapor de água no ar	m^2/s
D_{eff}	Difusividade efectiva do ar	m^2/s
$D_{sólido}$	Coeficiente de difusão efectiva do sólido	m^2/s
h_c	Transferência de calor por convecção	$W/m^2 s$
h_m	Coeficiente de transferência de massa por convecção	m/s
Δh_{vap}	Entalpia de vaporização por unidade de massa	J/kg
k_{eff}	Condutividade térmica efectiva	W/mK
k_{ds}	Condutividade térmica do sólido seco	W/mK
k_w	Condutividade térmica da água	W/mK
k_v	Condutividade térmica da saturação do vapor de água	W/mK

k_a	Condutividade térmica do ar	W/mK
k_γ	Condutividade térmica da fase gasosa	W/mK
k_σ	Condutividade térmica da fase sólida	W/mK
\dot{m}_{sv}	Fluxo de desorção de vapor de água através de um sólido	kg/sm^3
L	Espessura do tecido	m
M_a	Peso molecular do ar	$kg/kg\ mole$
M_w	Peso molecular da água	$kg/kg\ mole$
P	Centro do volume de controlo	—
p_γ	Pressão da fase gasosa	Pa
p_v	Pressão do vapor de água	Pa
p_a	Pressão parcial do ar	Pa
Q_L	Entalpia de desorção no sólido por unidade de massa	J/kg
R	Constante universal de um gás	$N\ m/kg\ K$
R_f	Gramas de água absorvida por 100 gramas de fibra	—
R_{skin}	Recuperação do equilíbrio na superfície da fibra	—
R_{total}	Recuperação total da fibra na última etapa	—
T	Temperatura	$^\circ C$
T_∞	Temperatura do meio ambiente	$^\circ C$
t	Tempo	s
x	Distância	m
S	Termo fonte	—
V, v	Volume	m^3
W, E	Pontos vizinhos do ponto P	—
w, e	Faces do volume de controlo	—

Símbolos Gregos

ε_{σ}	Fracção de volume ocupado pelo sólido e água	—
ε_{γ}	Fracção de volume ocupado pela fase gasosa	—
ε_{ds}	Fracção de volume ocupado pelo sólido	—
ε_{bw}	Fracção de volume da água dissolvida no sólido	—
δx_{WP}	Distância do ponto W ao ponto P	<i>m</i>
δx_{PE}	Distância do ponto P ao ponto E	<i>m</i>
δx_{wP}	Distância da fronteira w ao ponto P	<i>m</i>
δx_{Pe}	Distância do ponto P à fronteira e	<i>m</i>
δx_{we}	Distância entre as faces do volume de controlo	<i>m</i>
ϕ	Humidade relativa ou variável dependente	—
ρ	Massa volúmica	<i>kg/m³</i>
ρ_{ds}	Massa volúmica do sólido seco para polímeros	<i>kg/m³</i>
ρ_w	Massa volúmica da água no estado líquido	<i>kg/m³</i>
ρ_v	Massa volúmica do vapor de água no volume de gás	<i>kg/m³</i>
ρ_a	Massa volúmica do ar inerte no volume de gás	<i>kg/m³</i>
$\rho_{v\infty}$	Massa volúmica do vapor de água no meio ambiente	<i>kg/m³</i>
τ	Factor de torção	—
Γ	Coeficiente de difusão	—

Abreviações

<i>PMV</i>	Voto Médio Previsível	—
<i>PPD</i>	Percentagem Previsível de Insatisfeitos	—
<i>VC</i>	Volume de controlo	—

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo, faz-se uma introdução ao tema do conforto termofisiológico proporcionado pelo vestuário e apresentam-se os objectivos que se pretendem atingir com este trabalho, assim como, a estratégia utilizada e estrutura seguida neste relatório.

1.1 Conforto Térmico do Indivíduo

O desempenho intelectual e físico do ser humano são fortemente afectados pela sensação de conforto térmico (Parsons, 2003). Quando não existe conforto térmico, as pessoas queixam-se, podendo ser afectadas a saúde (Lagoudi *et al.*, 1996) e a produtividade (Srinavin e Mohamed, 2003) e, conseqüentemente, a motivação e o ânimo dos trabalhadores falha, devendo-se por isso evitar tais situações de desconforto térmico.

As condições de conforto térmico são essencialmente influenciadas pelos processos de transferência de calor e massa existentes entre o corpo humano e o ambiente em que está inserido. Várias medidas podem ser aplicadas para proporcionar o conforto térmico, por exemplo, um apropriado design na construção de edifícios (Dear e Brager, 2001), com aquecimento (Conceição, 2003) e ar condicionado (Fanger, 2001) e a selecção de vestuário apropriado.

O conforto térmico é, em linhas gerais, obtido por trocas térmicas que dependem de vários factores, ambientais (velocidade relativa do ar, temperatura do ar, humidade relativa e temperatura média radiante), ou pessoais (produção de calor metabólico e o tipo de vestuário que o indivíduo usa). O efeito conjugado dos mesmos é que definirá o grau de conforto ou desconforto térmico sentido pelas pessoas.

Deste modo, e dada a variedade e complexidade de reacções associadas aos parâmetros intervenientes, é difícil estimar se um dado ambiente de trabalho acarreta algum risco para os trabalhadores expostos, se a duração de exposição deverá ser reduzida, ou ainda quais os parâmetros sobre os quais é necessária intervenção por forma a tornar a situação adequada.

O estudo e a avaliação de ambientes térmicos tem sido um tema importante de investigação e, hoje, existem na literatura, vários métodos de análise de ambientes térmicos.

Os Índices de Stress Térmico são, provavelmente, os mais populares pois são, em geral, mais simples de usar. Destes, distinguem-se, pela sua aceitação e credibilidade, os índices que tomando, como ponto de partida, as medições individuais dos diferentes parâmetros climáticos, prevêm a sensação térmica resultante – como é o caso dos índices PMV e PPD.

O índice PMV é o mais utilizado para verificar a sensação de conforto térmico e o seu objectivo reside na quantificação do grau de conforto associado a determinada situação, por forma a assegurar uma abordagem tão racional e objectiva quanto possível. De referir a este respeito, que este índice é objecto de normalização internacional (ISO 7730: 1984).

O índice PMV pode ser determinado desde que sejam conhecidos os valores de produção de calor metabólico, a resistência térmica do vestuário e os valores dos parâmetros ambientais, nomeadamente: temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade relativa do ar e pressão parcial de vapor de água. Este índice é baseado num balanço térmico do corpo humano: a produção interna de calor iguala as perdas de calor para o ambiente.

Em ambientes térmicos moderados, o processo de termoregulação do ser humano assegura, de forma automática, a alteração do valor da temperatura cutânea e

do débito sudatório, por forma a manter uma situação de equilíbrio térmico. No cálculo do índice PMV, a resposta fisiológica relativa ao sistema de termoregulação foi baseada numa amostra estatisticamente representativa de 1300 indivíduos.

O índice PMV pode ser aplicado para verificar se um dado ambiente térmico está em conformidade com os parâmetros de conforto especificados ou pode também ser utilizado para o estabelecimento de limites de aceitabilidade mais amplos, em ambientes para os quais as exigências de conforto sejam inferiores às recomendadas.

Estes índices de conforto térmico são, no entanto, de natureza estatística e, embora de fácil aplicação, dão apenas indicações de carácter geral. Os modelos de termoregulação que fazem a simulação computacional do sistema térmico Corpo Humano – Vestuário – Ambiente são, sem dúvida, o método que permite maior detalhe e informação no estudo de problemas de conforto térmico.

Modelos com graus variáveis de complexidade foram apresentados na literatura e podem agora ser estudados no desenho e evolução do estado estacionário e condições transientes do corpo humano e do vestuário (Stolwijk e Hardy, 1977; Imre *et al.*, 1988; Yigit, 1998; Berger e Sari, 2000; Ghaddar *et al.*, 2003).

Relativamente aos fenómenos físicos envolvidos, estes modelos podem incluir resistência térmica dos materiais, mas também a transferência de massa, como consequência de difusão do suor derivado de transpiração sob a forma de água e vapor.

A complexidade dos modelos parece assim estar muito relacionada com os fenómenos físicos de transferência de calor e massa, que ocorrem entre o corpo humano e o ambiente, através do vestuário.

1.2 Vestuário

O vestuário constitui uma resistência natural entre o corpo humano e o seu meio ambiente. Por isto mesmo, tem como função básica manter o corpo num estado térmico aceitável para uma variedade de ambientes.

Outra função atribuída ao vestuário é a sua função ‘moda’, ou seja, os aspectos de design, cor e tamanho, os quais constituem o chamado conforto psicológico (Cunha, 2003; Neves e Cunha, 2004). Este tipo de conforto é determinante quer a nível sócio-cultural, quer a nível económico.

Para além destas duas componentes clássicas do vestuário, existe outra que tem actualmente grande importância, que é a sua funcionalidade. Está-se perante o vestuário dito “funcional” (Gerald, 1999), onde se inclui, o vestuário apropriado a condições climáticas extremas, bem como, o vestuário de protecção e o vestuário de desporto. Por exemplo, os sistemas de protecção do vestuário da indústria química têm de proteger o indivíduo de vapores, líquidos e aerossóis, mas também devem maximizar o calor dissipado para o meio ambiente, a fim de minimizar o calor imposto ao seu portador, proporcionando-lhe conforto térmico.

Nestas situações extremas (Kunz e Chen, 2004; Horrocks, 1996), a dissipação de calor humano é frequentemente um problema crítico.

Assim, em termos conclusivos, poder-se-á dizer que o conforto proporcionado pelo vestuário é função das especificações do tecido, que são tanto funcionais como estéticas (Neves *et al.*, 2004; Neves e Cunha, 2005).

Este é um verdadeiro desafio para a indústria portuguesa, que neste momento, conta com o aumento de concorrência proveniente de países asiáticos e africanos, que conseguem produzir a baixos custos devido à mão de obra barata disponível e, ainda, pela facto de possuírem as matérias primas necessárias.

A resolução desta situação poder-se-á basear em factores de ordem qualitativa do produto, entre outros, que passam pela criação e desenvolvimento de novos e sofisticados produtos de alto valor acrescentado, onde o preço das matérias-primas assume menor importância.

Para apostar em tecidos inovadores, é necessário, ter um conhecimento profundo sobre a forma como os tecidos devem ser produzidos para obedecer a requisitos específicos de propriedades funcionais (Neves e Cunha, 2004) e, ainda, saber avaliar as suas propriedades, em especial, as suas propriedades térmicas, pois são estas que determinam o comportamento térmico do vestuário.

Torna-se fundamental perceber os efeitos dos vários factores que afectam a transferência de humidade e vapor através do vestuário (podendo ser, trocas de suor ou chuva) e as trocas de calor (condução, convecção, radiação, evaporação e condensação) nos tecidos. Isto passa, com certeza, pelo desenvolvimento de modelos matemáticos mais ou menos sofisticados que poderão simular o comportamento de um tecido, sabendo as suas propriedades térmicas.

1.3 Modelação Matemática de Tecidos

Os fenómenos envolvidos no comportamento térmico de um tecido são complexos e, existem na literatura vários modelos matemáticos, mais ou menos sofisticados que pretendem simular o comportamento dos tecidos, em particular, o seu isolamento ao calor e resistência ao vapor de água (Gibson e Charmachi, 1997; Chang e Weng, 2000; Fan *et al.*, 2000; Ghaddar *et al.*, 2003; Sun *et al.*, 2004).

Embora semelhantes, eles podem ser a uma, duas ou três dimensões (simulação em softwares comerciais) e incluem os fenómenos de transferência por condução e convecção (aliás, o efeito do vento na simulação do comportamento de um tecido tem sido objecto de investigação, não só teórica mas também experimental, Kwon *et al.*, 1998). A transferência de calor está sempre associada à transferência de massa. Num meio sólido higroscópico e poroso, a água é modelada na forma de vapor de água na fase líquida (condensação) ou ainda embebida no sólido (fenómeno de sorção).

Têm ainda surgido novos modelos na simulação de tecidos em materiais com mudança de fase (Ying *et al.*, 2004) e materiais compósitos (Dasgupta *et al.*, 1996).

Todos estes modelos exigem, normalmente, métodos numéricos na resolução das equações diferenciais com derivadas parciais (em ordem ao tempo e ao espaço) e importa salientar a necessidade da sua validação com trabalho experimental.

Estes modelos são muitas vezes concebidos, de modo a serem integrados em modelos de termoregulação, que fazem a simulação computacional do sistema térmico Corpo Humano – Vestuário – Ambiente (Ghaddar *et al.*, 2003).

1.4 Objectivos do Trabalho

Pretende-se com este trabalho implementar um método de transferência de energia e massa para modelar o comportamento dos tecidos. Este programa de cálculo será testado com diferentes tecidos e será feito um estudo de sensibilidade aos vários parâmetros do modelo.

Paralelamente a esta implementação, pretende-se desenvolver uma aplicação informática que incluirá uma interface gráfica que facilite o uso e compreensão deste modelo.

Os resultados deste estudo poderão ser usados para desenvolver uma ferramenta de cálculo, mais fácil de usar para futuros desenvolvimentos deste modelo numérico e assim poder simular novos tecidos ou novas situações ambientais.

Duma forma simplificada poderão ser definidos os seguintes objectivos para o presente estudo:

- 1.º - Implementar um modelo de transferência de calor e massa;
- 2.º - Desenvolver um software que facilite o uso do modelo de transferência de calor e massa implementado;
- 3.º - Criar uma ferramenta útil no estudo do desenvolvimento de novos tecidos.

1.5 Metodologia Adoptada

De forma a atingir os objectivos já descritos, foi decidido abordar o tema deste trabalho, usando a seguinte metodologia:

- 1.º - Análise e estudo de alguns modelos de transferência de massa e calor, apresentados na literatura;
- 2.º - Selecção e estudo mais detalhado do modelo a implementar;

- 3.º - Estudo dos vários métodos numéricos de resolução de equações com derivadas parciais, em particular, o método dos volumes finitos que pareceu mais adequado ao tipo de problema a resolver;
- 4.º - Implementação do modelo numérico, em linguagem PASCAL (Delphi);
- 5.º - Testes preliminares ao programa de cálculo;
- 6.º - Criação e implementação da interface gráfica;
- 7.º - Testes à interface e validação dos seus resultados;
- 8.º - Obtenção e discussão dos resultados do modelo.

1.6 Estrutura do Relatório

A dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos. Neste primeiro capítulo, apresenta-se a introdução ao tema do presente trabalho, assim como, os objectivos a atingirem por este.

No Capítulo 2, o modelo matemático, unidimensional, transiente, de transferência de calor e massa, num tecido, implementado no computador é descrito, bem como, a solução numérica adoptada. São ainda enumerados os principais passos do algoritmo de cálculo.

No Capítulo 3, é definida a interface gráfica desenvolvida bem como, a sua integração com o programa de cálculo.

Os estudos preliminares feitos a esta aplicação informática são apresentados, no Capítulo 4. Estes testes de sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada são discutidos e, de seguida, os resultados obtidos para diferentes tecidos são comparados e discutidos.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho e apresentam-se sugestões para trabalho futuro.

Capítulo 2

Modelo Matemático e Solução Numérica

Foi implementado no computador um modelo matemático unidimensional e transiente, de transferência de calor e massa, num tecido.

Neste capítulo, as principais equações do modelo são apresentadas com algum detalhe, assim como, alguns cálculos adicionais necessários à determinação dos parâmetros necessários para completar o modelo. É apresentada a solução numérica e são descritos os principais passos do algoritmo de cálculo.

2.1 Equações do Modelo

O modelo físico implementado é uma simplificação do modelo de Gibson e Charmachi (1997). É um modelo a uma dimensão para a resolução de problemas de casos transientes da difusão de energia e massa em tecidos higroscópicos e porosos.

São usadas duas equações diferenciais com derivadas parciais que descrevem o processo de difusão e transporte de energia e vapor de água através da espessura do tecido e ao longo do tempo. Este modelo é complementado por relações termodinâmicas e outras equações algébricas que permitem calcular variáveis físicas e outros parâmetros do modelo.

Não é contemplada a transferência por convecção; a fase líquida aparece apenas embebida no tecido e as transferências modeladas ocorrem apenas na direcção da espessura do tecido.

Uma das equações fundamentais do modelo é a equação da energia:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - (Q_L + \Delta h_{vap}) \dot{m}_{sv} \quad (2.1)$$

onde o termo do lado esquerdo da equação quantifica a variação da quantidade de calor no tecido ao longo do tempo; o segundo termo da equação descreve a transferência de calor por condução através da espessura do tecido e o termo fonte permite medir as variações de temperatura ocorridas no tecido pela ocorrência de fenómenos de evaporação e sorção.

A equação da energia é complementada pela equação de difusão da fase gasosa:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_\gamma \rho_v) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \right) + \dot{m}_{sv} \quad (2.2)$$

onde o termo do lado esquerdo da equação descreve a variação da massa volúmica do vapor de água, assim como, a variação correspondente da fracção de volume ocupado pela fase gasosa (mistura de ar e vapor de água), ao longo do tempo. O segundo termo da equação permite descrever as transferências de difusão da massa volúmica de vapor de água e o termo fonte dá a variação de massa por desorção da fase sólida para a fase de vapor por unidade de volume.

As principais propriedades deste volume de cálculo (Figura 2.1), onde estão presentes o tecido, a água embebida no tecido, o ar e o vapor de água, têm de ser calculadas em cada etapa, pois dependem das fracções de volume ocupadas por cada componente. Assim, a massa volúmica é calculada usando a seguinte relação:

$$\rho = \varepsilon_{bw} \rho_w + \varepsilon_{ds} \rho_{ds} + \varepsilon_\gamma (\rho_v + \rho_a) \quad (2.3)$$

onde cada parcela é relativa à água embebida no tecido, à fase sólida da fibra e à fase gasosa, que compreende o ar e o vapor de água, respectivamente.

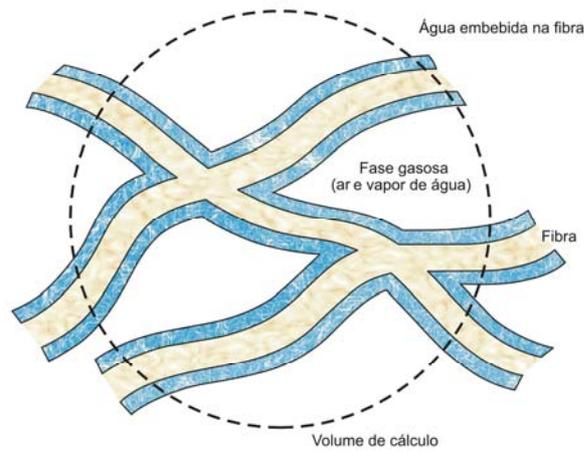


Figura 2.1 – Volume de cálculo

As frações de cada fase presentes dentro do volume de cálculo estão sujeitas à seguinte restrição:

$$\varepsilon_{\gamma} + \varepsilon_{bw} + \varepsilon_{ds} = 1 \quad (2.4)$$

A Equação (2.4) tem assim duas incógnitas, já que a fração ocupada pela fibra é constante. A fração de água embebida no tecido é calculada usando uma equação com derivada total em relação ao tempo:

$$\rho_v \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_{bw}) = -\dot{m}_{sv} \quad (2.5)$$

As massas volúmicas das fases gasosas (ar e vapor de água) são calculadas usando as seguintes relações termodinâmicas:

$$p_a = p_{\gamma} - p_v \quad (2.6)$$

$$p_a = \rho_a \frac{R}{M_a} T \quad (2.7)$$

$$p_v = \rho_v \frac{R}{M_w} T \quad (2.8)$$

A condutividade térmica do volume de cálculo é calculada usando a equação (2.9):

$$c_p = \frac{\varepsilon_{bw}\rho_w(c_p)_w + \varepsilon_{ds}\rho_{ds}(c_p)_{ds} + \varepsilon_\gamma[\rho_v(c_p)_v + \rho_a(c_p)_a]}{\rho} \quad (2.9)$$

O coeficiente de transferência de calor (k_{eff}) da equação da energia (Equação 2.1) não é constante, muito influenciado pela quantidade de água no tecido e é calculado fazendo um média pesada entre o coeficiente de transferência de calor da fase sólida, k_σ , que engloba a fase sólida propriamente dita e a água embebida no tecido, e o coeficiente de transferência de calor da fase gasosa, k_γ , que compreende vapor de água e ar. Assim,

$$k_{eff} = \varepsilon_\gamma k_\gamma + \varepsilon_\sigma k_\sigma \quad (2.10)$$

onde, os factores de peso são as respectivas fracções de volume ocupadas pelas fases. Os coeficientes de transferência de calor das respectivas fases são dados pelas seguintes relações:

$$k_\gamma = \left(\frac{k_v\rho_v + k_a\rho_a}{\rho_v + \rho_a} \right) \quad (2.11)$$

$$k_\sigma = \left(\frac{k_w\rho_w\varepsilon_{bw} + k_{ds}\rho_{ds}\varepsilon_{ds}}{\rho_w\varepsilon_{bw} + \rho_{ds}\varepsilon_{ds}} \right) \quad (2.12)$$

O coeficiente de difusão de massa (D_{eff}) da equação de difusão da fase gasosa (Equação 2.2) é dado pela seguinte equação:

$$D_{eff} = \frac{D_a\varepsilon_\gamma}{\tau} \quad (2.13)$$

onde, τ é uma propriedade inerente ao tecido e D_a é o coeficiente de difusão do vapor de água no ar, que é função da temperatura, e é dado pela relação:

$$D_a = 2.23 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{273.15} \right)^{1.75} \quad (2.14)$$

O termo fonte, quer da equação de transferência de energia (Equação 2.1), quer da equação de difusão da fase gasosa (Equação 2.2), é função do parâmetro \dot{m}_{sv} (fluxo de desorção de água da fase sólida para a fase de vapor). A fracção de água embebida

nos tecidos (Equação 2.5) é também função deste fluxo de desorção. Este fenómeno define um dos principais mecanismos físicos presentes e ele é modelado assumindo que a difusão para o interior da fibra é um estado quasi-estável. O polímero na superfície da fibra fica imediatamente em equilíbrio com a humidade relativa do ar nos limites do volume de controlo para esse ponto na malha. O fluxo de massa que entra e sai da fibra é calculado por:

$$\dot{m}_{sv} = \frac{D_{sólido} \rho_{ds}}{d_f^2} (R_{total} - R_{skin}) \quad (2.15)$$

onde, $D_{sólido}$ é o coeficiente de difusão da fase sólida, d_f é o diâmetro aparente da fibra; R_{total} é função da água presente na fibra naquele instante de tempo e R_{skin} é função da água acumulada na superfície do tecido que é função da humidade relativa do ar (ϕ):

$$\varepsilon_{bw} = 0.578 R_f \left(\varepsilon_{ds} \frac{\rho_{ds}}{\rho_w} \right) (\phi) \left[\frac{1}{(0.321 + \phi)} + \frac{1}{(1.262 - \phi)} \right] \quad (2.16)$$

Os valores de entalpia de desorção e vaporização por unidade de massa (Q_L e Δh_{vap} , respectivamente) são calculados usando as seguintes relações:

$$Q_L = 1.95 \times 10^5 (1 - \phi) \left(\frac{1}{(0.2 + \phi)} + \frac{1}{(1.05 - \phi)} \right) \quad (2.17)$$

$$\Delta h_{vap} = 2.792 \times 10^6 - 160T - 3.43T^2 \quad (2.18)$$

A equação de difusão da fase gasosa (2.2) pode ser posta na forma:

$$\varepsilon_\gamma \frac{\partial}{\partial t} (\rho_v) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \right) + \dot{m}_{sv} - \rho_v \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_\gamma) \quad (2.19)$$

e juntamente com a equação da energia (Equação 2.1) constituem um sistema de duas equações com derivadas parciais, quer em relação ao tempo quer ao espaço.

Estas equações parabólicas podem ser integradas para obter o perfil de temperaturas e de concentração de vapor na espessura do tecido e ao longo do tempo, depois de conhecido o estado inicial do sistema (neste caso, o campo inicial de

temperaturas, $T(x, t=0)$ e de massa volúmica do vapor de água, $\rho_v(x, t=0)$ e se conhecidas as fronteiras do tecido no sentido da sua espessura.

As condições de fronteira consideradas neste estudo são do tipo convectivas, isto é, admite-se que existem trocas de calor e massa entre as fronteiras do tecido e o ar envolvente. As equações de fronteira da equação da energia são:

$$h_c (T_\infty - T)_{x=0} = -k_{eff} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0} \quad (2.20)$$

$$h_c (T_\infty - T)_{x=L} = -k_{eff} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=L} \quad (2.21)$$

As equações de fronteira da equação da difusão são:

$$h_m (\rho_{v\infty} - \rho_v)_{x=0} = -D_{eff} \left. \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \right]_{x=0} \quad (2.22)$$

$$h_m (\rho_{v\infty} - \rho_v)_{x=L} = -D_{eff} \left. \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \right]_{x=L} \quad (2.23)$$

onde, T_∞ e $\rho_{v\infty}$ são a temperatura e a massa volúmica do vapor de água do ar ambiente, respectivamente, que poderão ser diferentes nas duas fronteiras do tecido ($x=0$ e $x=L$); h_c e h_m são o coeficiente de convecção de transferência de calor e de massa, respectivamente.

2.2 Solução Numérica

Dada a complexidade matemática do sistema de equações com derivadas parciais, foram usados métodos numéricos para a sua resolução.

2.2.1 Integração no espaço

As equações foram resolvidas usando a técnica dos volumes finitos (Versteeg e Malalasekera, 1995). Nesta técnica de resolução das equações diferenciais, faz-se a integração destas, num volume “finito” de controlo.

É agora ilustrado o uso deste método na resolução da equação diferencial a uma dimensão:

$$\frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) + S = 0 \tag{2.24}$$

que descreve a difusão estacionária de uma propriedade escalar, num domínio a uma dimensão (Γ é o coeficiente de difusão e S é o termo fonte). No presente trabalho, ϕ representa a temperatura ou ρ_v e Γ é o coeficiente de transferência de calor (k_{eff}) ou o coeficiente de difusão de massa (D_{eff}).

O espaço é assim dividido em volumes de controlo (Figura 2.2), que no caso mais simples serão do mesmo tamanho.

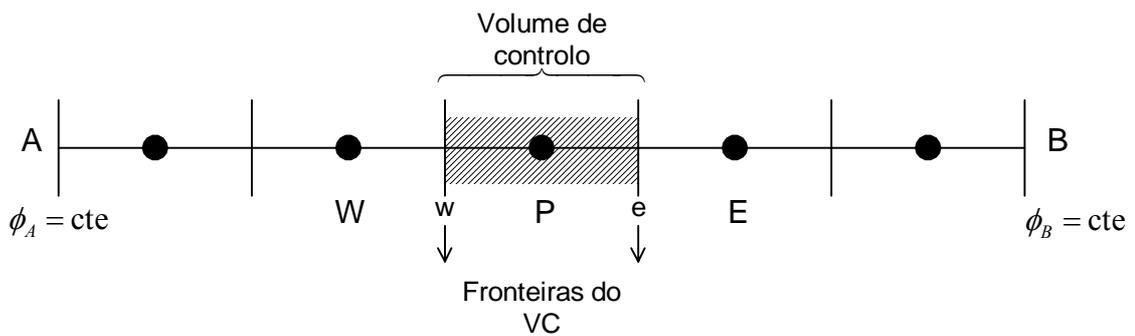


Figura 2.2 – Volume de controlo a 1D

As fronteiras de cada volume de controlo estão posicionadas a meia distância entre nós adjacentes (Figura 2.3).

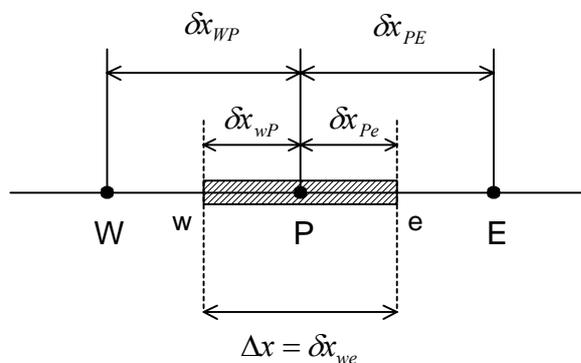


Figura 2.3 – Dimensões do volume de controlo a 1D

É feita a integração da Equação (2.24), que consiste na sua integração no volume de controlo, ficando com a equação discretizada no ponto P:

$$\int_{\Delta v} \frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) dv + \int_{\Delta v} S dv = \left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_e - \left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_w + \bar{S} \Delta v = 0 \quad (2.25)$$

Repare-se no significado físico da resolução pelo método dos volumes finitos: o fluxo difusivo que deixa a face este (e) menos o fluxo difusivo que entra na face oeste (w) é igual à geração da variável ϕ no volume de controlo (equação de balanço de ϕ).

As derivadas dos termos difusivos são agora aproximadas por diferenças finitas:

$$\left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_e = \Gamma_e A_e \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_{PE}} \right) \quad (2.26)$$

$$\left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_w = \Gamma_w A_w \left(\frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_{WP}} \right) \quad (2.27)$$

O termo fonte, S , pode ser uma função da variável dependente:

$$\bar{S} \Delta V = S_u + S_P \phi_P \quad (2.28)$$

Então, a equação final já discretizada pode ser posta nesta forma:

$$\left(\frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} + \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} - S_P \right) \phi_P = \left(\frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} \right) \phi_W + \left(\frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} \right) \phi_E + S_u \quad (2.29)$$

ou, de um modo mais simples:

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + S_u \quad (2.30)$$

com

$$a_W = \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}}$$

$$a_E = \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}}$$

$$a_P = (a_W + a_E - S_P)$$

Esta equação assim discretizada é escrita para todos os nós (ou ponto central do volume de controle) interiores ao domínio. Os pontos perto da fronteira terão depois de ser modificados, pois terão de incluir as condições dos pontos fronteira. Na Figura 2.2, está representada talvez a situação mais simples em que a variável a calcular é constante nos dois extremos do domínio de cálculo. No presente estudo, o valor da variável dependente (temperatura e massa volúmica) na fronteira não é conhecida, mas sim o valor da sua derivada (convecção para o exterior). Assim, a equação de cada fronteira é discretizada para o ponto fronteira e esta equação resultante para esse ponto é substituída na equação do nó adjacente.

No presente estudo, após estes passos chega-se a dois sistemas de equações algébricas, um para o cálculo da temperatura (Equação 2.1) e outro para a determinação dos valores de ρ_v , em todos os pontos interiores do domínio. Estes sistemas algébricos lineares são sistemas com matrizes tridiagonais, pois em cada equação existem apenas três incógnitas, o ponto e seus vizinhos.

Na forma matricial, um sistema tridiagonal pode ser descrito por:

$$\begin{pmatrix} d_1 & s_1 & & & \\ i_2 & d_2 & s_2 & & \\ & & & & \\ & & i_{n-1} & d_{n-1} & s_{n-1} \\ & & & i_n & d_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \\ \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \\ \\ b_n \end{pmatrix} \quad (2.31)$$

Se se aplicar o método de eliminação de *Gauss* sem escolha de pivot à matriz tridiagonal, o processo fica bastante simplificado pois em cada etapa da eliminação só será necessário eliminar o elemento abaixo da diagonal e modificar seguidamente o elemento da diagonal e o elemento do termo independente.

Este algoritmo que envolve apenas alguns dos passos da eliminação de *Gauss* é o chamado algoritmo de *Thomas* para sistemas tridiagonais.

2.2.2 Integração no tempo

Para a resolução numérica da derivada em relação ao espaço, foi adoptado um esquema implícito.

Considerando o caso mais genérico, uma equação diferencial total apenas em ordem ao tempo:

$$\frac{d\phi}{dt} = f(t, T) \quad (2.32)$$

com ϕ , variável genérica, que neste caso de estudo poderá representar T ou ρ_v , podem ser discutidos os vários esquemas de integração em ordem ao tempo.

Este é um problema de condição inicial, isto significa, que o valor da variável dependente é conhecido no início do tempo de integração.

Os métodos mais comuns de resolução deste tipo de problemas (Fernandes, 1996) são os métodos de uma etapa, em que para calcular um novo valor ϕ_1 para o novo tempo $t_1 = t_0 + \Delta t$, apenas é necessária a informação do tempo anterior, t_0 .

Assim definido o intervalo de integração, tendo em conta o erro (precisão) permitido na integração, os valores da variável dependente são calculados desde o instante inicial até ao tempo final (definido pelo utilizador) em cada etapa, ou passo de tempo.

No entanto, os métodos de uma etapa podem diferir logo à partida pelo tipo de informação requerida nesse cálculo e assim podem distinguir-se duas formas de integração (entre outras): o esquema explícito e o esquema implícito.

Num esquema explícito, por exemplo, o método simples de Euler (Equação 2.33), o valor da variável dependente na etapa seguinte, é calculado usando os valores das etapas anteriores.

$$\phi_{i+1} = \phi_i + (t_{i+1} - t_i) f(t_i, \phi_i) \quad (2.33)$$

Num esquema implícito, por exemplo o método de Euler implícito (Equação 2.34), o valor da variável dependente na etapa seguinte é calculado usando o próprio valor, o que torna a equação implícita.

$$\phi_{i+1} = \phi_i + (t_{i+1} - t_i) f(t_{i+1}, \phi_{i+1}) \quad (2.34)$$

2.2.3 Discretização final das equações do modelo

Considerando agora, as equações do modelo, usando uma malha a uma dimensão, e integrando por exemplo, a equação da energia (Equação 2.1), no volume de controlo e num intervalo de tempo, desde t a $t + \Delta t$, tem-se:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} S dV dt \quad (2.35)$$

que pode ser escrita

$$\begin{aligned} \int_w^e \left[\int_t^{t+\Delta t} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dt \right] dV &= \\ &= \int_t^{t+\Delta t} \left[k_{eff_e} A \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \right]_e - \left[k_{eff_w} A \frac{\partial T}{\partial x} \right]_w dt + \int_t^{t+\Delta t} \bar{S} \Delta V dt \end{aligned} \quad (2.36)$$

onde

$$S = -(Q_L + \Delta h_{vap}) \dot{m}_{sv} \quad (2.37)$$

Pegando no lado esquerdo da equação (2.36), e assumindo que a temperatura num dado nó é igual em todo o volume de controlo:

$$\int_w^e \left[\int_t^{t+\Delta t} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dt \right] dV = \rho c_p (T_P - T_P^0) \Delta V \quad (2.38)$$

No lado direito da Equação (2.36), aplicando diferenças centrais aos termos difusivos, temos:

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \left(\left[k_{eff_e} A \frac{\partial T}{\partial x} \right]_e - \left[k_{eff_w} A \frac{\partial T}{\partial x} \right]_w \right) dt &= \\ \int_t^{t+\Delta t} \left(\left[k_{eff_e} A \frac{T_E - T_P}{\delta x_{PE}} \right] - \left[k_{eff_w} A \frac{T_P - T_W}{\delta x_{WP}} \right] \right) dt \end{aligned} \quad (2.39)$$

E, em vez de escolher já, qual o esquema a usar, em termos genéricos fica:

$$I_T = \int_t^{t+\Delta t} T_P dt = [\theta T_P + (1-\theta)T_P^0] \Delta t \quad (2.40)$$

Se

$\theta = 0$	$I_T = T_P^0 \Delta t$	Explícito
$\theta = 1/2$	$I_T = \frac{1}{2} (T_P + T_P^0) \Delta t$	Crank-Nicholson
$\theta = 1$	$I_T = T_P \Delta t$	Implícito

Aplicando à equação (2.39):

$$\begin{aligned} & \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(k_{eff_e} A \frac{T_E - T_P}{\delta x_{PE}} \right) - \left(k_{eff_w} A \frac{T_P - T_W}{\delta x_{WP}} \right) \right] dt = \\ & = \theta \left[\frac{k_{eff_e} A (T_E - T_P)}{\delta x_{PE}} - \frac{k_{eff_w} A (T_P - T_W)}{\delta x_{WP}} \right] \Delta t + \\ & (1-\theta) \left[\frac{k_{eff_e} A (T_E^0 - T_P^0)}{\delta x_{PE}} - \frac{k_{eff_w} A (T_P^0 - T_W^0)}{\delta x_{WP}} \right] \Delta t \end{aligned} \quad (2.41)$$

Reunindo toda a equação e dividindo por $A \Delta t$:

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{T_P - T_P^0}{\Delta t} \Delta x &= \theta \left[\frac{k_{eff_e} (T_E - T_P)}{\delta x_{PE}} - \frac{k_{eff_w} (T_P - T_W)}{\delta x_{WP}} \right] + \\ &+ (1-\theta) \left[\frac{k_{eff_e} (T_E^0 - T_P^0)}{\delta x_{PE}} - \frac{k_{eff_w} (T_P^0 - T_W^0)}{\delta x_{WP}} \right] + \bar{S} \Delta x \end{aligned}$$

Agrupando termos, a equação da energia (Equação 2.1) discretizada na forma final usando o esquema implícito ($\theta=1$), será:

$$a_P T_P = a_W T_W + a_E T_E + a_P^0 T_P^0 + b \quad (2.42)$$

onde

$$a_P = a_W + a_E + a_P^0$$

$$a_P^0 = \rho c_p \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

$$a_W = \frac{k_{eff_w}}{\delta x_{WP}}$$

$$a_E = \frac{k_{eff_e}}{\delta x_{PE}}$$

$$b = \bar{S}\Delta x$$

Da mesma forma, a equação da difusão de massa (Equação 2.19) discretizada na forma final usando o esquema implícito ($\theta = 1$), será:

$$a_P \rho_{vP} = a_W \rho_{vW} + a_E \rho_{vE} + a_P^0 \rho_{vP}^0 + b \quad (2.43)$$

onde

$$a_P = a_W + a_E + a_P^0$$

$$a_P^0 = \varepsilon_\gamma \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

$$a_W = \frac{D_{eff_w}}{\delta x_{WP}}$$

$$a_E = \frac{D_{eff_e}}{\delta x_{PE}}$$

$$b = \bar{S}\Delta x$$

Sendo, o termo fonte igual a:

$$S = \dot{m}_{sv} - \rho_v \frac{\varepsilon_\gamma - \varepsilon_\gamma^0}{\Delta t}$$

2.2.4 Processo iterativo de solução

Como atrás foi referido, quando a equação discretizada (2.42) é aplicada aos pontos interiores do domínio, é obtido um sistema de equações algébricas tridiagonal,

cuja solução permitirá calcular, em cada passo de tempo, as temperaturas desse passo, ao longo da espessura do tecido. No entanto, a equação da energia é dependente de ρ_v , variável calculada usando a equação discretizada (2.43).

É necessário assim um processo iterativo de solução das duas equações em cada passo de tempo. Partindo dos campos iniciais de temperatura e massa volúmica, a equação de energia (ou antes, o sistema tridiagonal para todos os pontos interiores do domínio) é resolvida na etapa, assumindo que os valores iniciais de ρ_v são válidos em todo o passo. De seguida, com os novos valores das temperaturas, a equação de difusão é resolvida e este processo repete-se, ainda na mesma etapa, até que os valores de temperaturas e ρ_v sejam idênticos em duas iterações consecutivas a menos de um erro especificado. Depois do processo convergir, são iniciados os cálculos para uma nova etapa e o processo repete-se até ao tempo final de integração.

2.3 Algoritmo de Cálculo

Com base no esquema iterativo de cálculo descrito, foi concebido o seguinte algoritmo de cálculo:

1. Introdução de parâmetros: propriedades do tecido; intervalo de integração (Δt); o número máximo de etapas; número máximo de iterações dentro de cada passo; erros permitidos para o cálculo das variáveis T e ρ_v no processo iterativo em cada passo; esquema para a discretização no tempo; método para o cálculo do fluxo de desorção (termo fonte); condições iniciais do domínio e das condições de fronteira;
2. Construção da malha: coordenadas das fronteiras e centros dos volumes de controlo;
3. Determinação das variáveis termodinâmicas;
4. Cálculo do termo fonte (\dot{m}_{sv});

5. Resolução numérica da equação diferencial ordinária para (ε_{bw}) , quantidade de água embebida nas fibras do tecido;
6. Determinação das propriedades do tecido: massa volúmica total média (ρ) ; capacidade calorífica (c_p) e capacidade térmica (k_{eff}) ;
7. Para cada equação diferencial com derivadas parciais em (T, ρ_v) determinar os coeficientes da matriz tridiagonal e o termo independente do sistema;
8. Resolução do sistema tridiagonal pelo algoritmo *Thomas*;
9. Testar erros, convergência e número de iterações;
10. Voltar ao passo 3.

Capítulo 3

Estrutura do Programa e Interface

Para uma melhor usabilidade deste programa foi desenvolvida em Pascal (Delphi) uma interface gráfica onde o utilizador comum apenas terá de introduzir o tipo de tecido a analisar, o tempo de simulação pretendido e o intervalo de tempo desejado para conhecer os valores das variáveis do sistema.

Neste capítulo é discutida a estrutura desta aplicação informática e a sua interface.

3.1 Estrutura da Aplicação Informática

A estrutura da aplicação informática implementada está representada na Figura 3.1.

O programa é constituído por 3 partes principais: Parâmetros do utilizador; Interface e cálculos e Resultados. Está implementado em linguagem Pascal (versão Delphi), efectua os cálculos relacionados com o modelo de transferência de energia e massa, assim como, a sua interface com o utilizador. Como entrada, este programa recebe os parâmetros definidos pelo utilizador e fornece os resultados da simulação. O programa é designado por “Tecidos”.

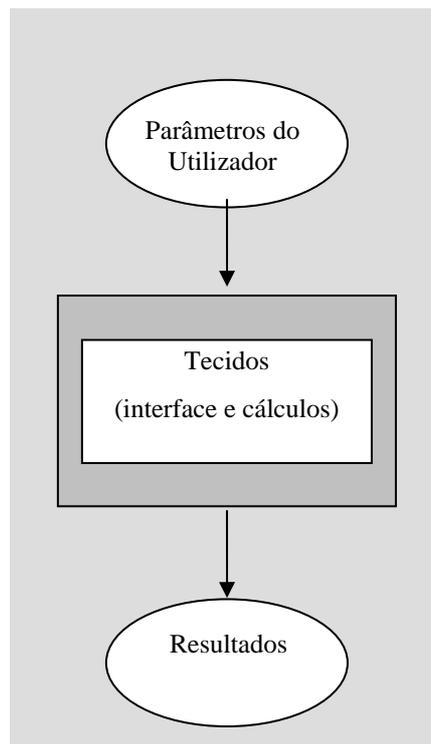


Figura 3.1 – Estrutura da aplicação informática

Os parâmetros do utilizador são de dois tipos: numéricos, relacionados e essenciais ao cálculo numérico (tais como: tempo de simulação, erro permitido na obtenção das soluções) e parâmetros relacionados com a selecção do tipo de tecido.

A componente Resultados é responsável por apresentar os resultados finais e intermédios dos cálculos da simulação, mais concretamente as variáveis dependentes do modelo: temperatura, quantidade de água nas fibras e massa volúmica de vapor de água.

“Tecidos” (cálculos e interface) consiste, propriamente dito no programa designado por “Tecidos”. Lê os parâmetros do utilizador, calcula os resultados finais (variáveis do modelo: T , ρ_v , ε_{bw}) e faz a sua interface com o utilizador.

A par destes três componentes principais da aplicação informática é de considerar a existência doutros parâmetros e constantes do modelo, que estão definidos dentro do próprio programa. Uns são específicos do próprio tecido e são constantes ao longo do programa, como por exemplo: espessura do tecido, condutividade térmica do tecido, coeficiente de difusão, etc.; outros vão sendo modificados ao longo da execução

do programa, como por exemplo: valor de certas propriedades termodinâmicas, usando os cálculos adicionais do modelo em causa.

3.2 Interface do Programa “Tecidos”

O ambiente gráfico da aplicação informática “Tecidos” foi realizado em linguagem Pascal (versão Delphi) e corre em ambiente gráfico Windows.

Após activar a aplicação informática “Tecidos”, aparece no ecrã uma janela Figura 3.2, onde existem três menus para a execução desta aplicação, respectivamente, os menus: “Parâmetros numéricos”, “Selecione o tecido” e “Terminar”.

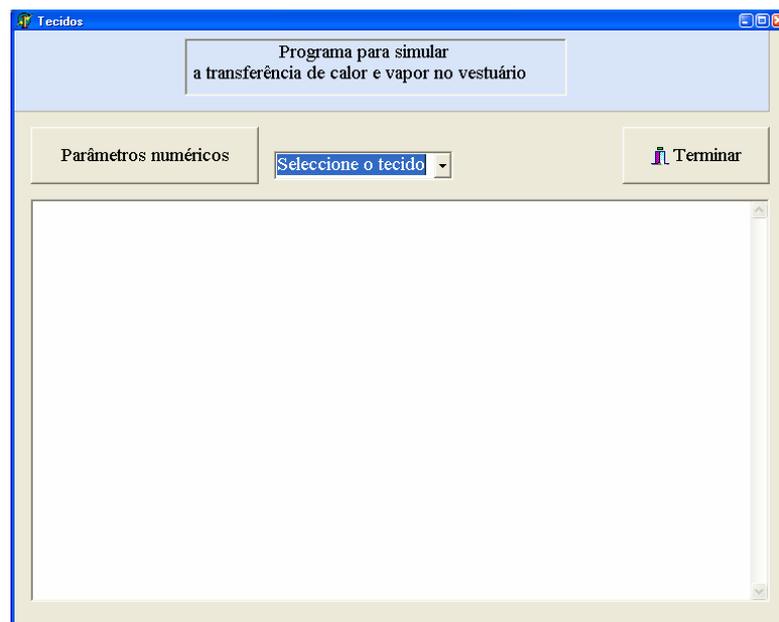


Figura 3.2 – Janela da aplicação informática “Tecidos”, onde está representada a estrutura geral da interface

Através desta janela, o utilizador deverá primeiro seleccionar o menu “Parâmetros numéricos”. Quando activado este menu, aparece um novo menu que tomará o aspecto representado na Figura 3.3.

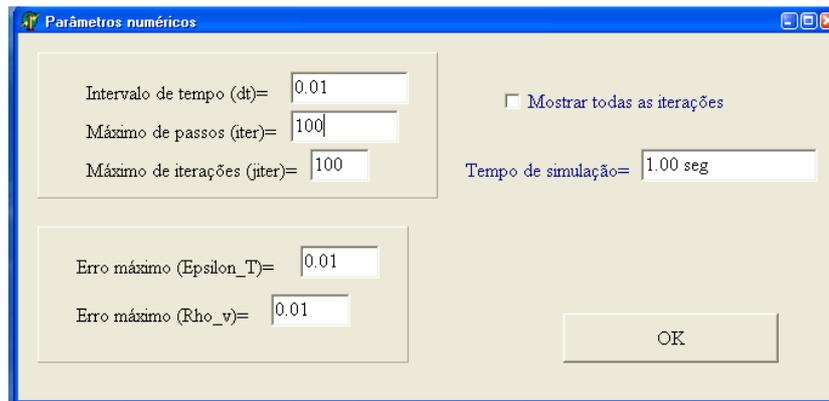


Figura 3.3 – Janela da aplicação informática “Tecidos”, onde estão representados os parâmetros numéricos necessários à execução do programa

Esta janela contém a informação relacionada com a introdução/confirmação dos parâmetros iniciais de âmbito numérico, com o seguinte significado:

Intervalo de tempo (dt): parâmetro que representa o intervalo (passo) de tempo de integração, onde serão calculadas as variáveis do modelo matemático.

Máximo de passos ($iter$): representa o número de passos a efectuar na simulação.

Máximo de iterações ($jiter$): representa o número máximo de iterações permitidas dentro de cada passo.

Erro máximo ($Epsilon_T$): erro permitido para a obtenção da variável temperatura.

Erro máximo (Rho_V): erro permitido para a obtenção da variável massa volúmica de vapor de água.

Mostrar todas as iterações: dá a possibilidade ao utilizador de verificar os cálculos intermédios (valores das variáveis em cada passo) ou apenas os resultados no final da simulação.

Tempo de simulação: mostra o tempo de simulação do estudo (produto dos parâmetros Intervalo de tempo e Máximo de passos).

Por defeito, estes campos estão já preenchidos com os valores constantes da Figura 3.3.

Após a introdução ou confirmação dos parâmetros numéricos, o utilizador deverá seleccionar de seguida, o menu “Selecione o tecido”, que depois de activado tomará o aspecto da Figura 3.4.

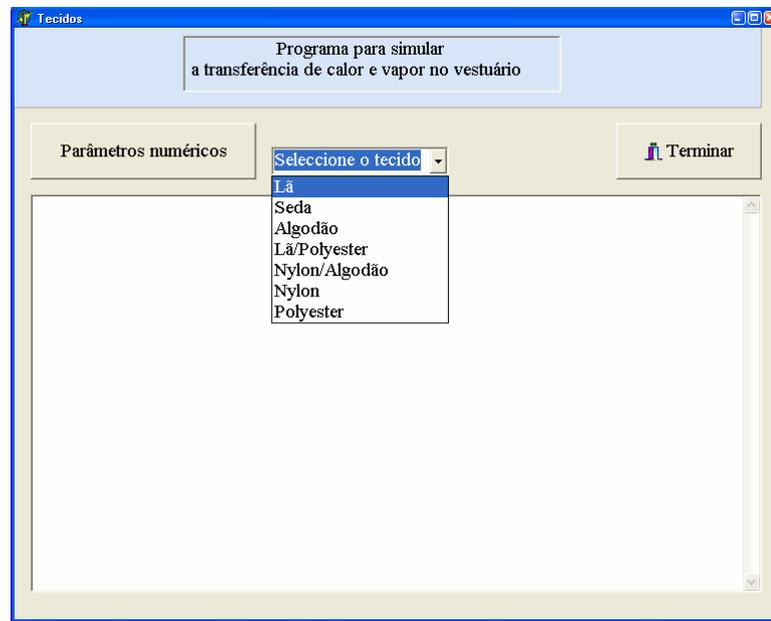


Figura 3.4 – Janela da aplicação informática “Tecidos”, onde são mostrados os tipos de tecido disponíveis

Através desta janela, o utilizador poderá escolher o tipo de tecido para o qual pretende fazer a simulação do seu comportamento, mediante parâmetros numéricos, anteriormente introduzidos, e com as características físicas e termodinâmicas do tecido seleccionado que se encontram armazenadas no programa informático.

Após a selecção do tecido (neste caso a lã), surgirá a janela, visualizada na Figura 3.5. Repare-se que nesta altura aparece um novo menu ‘Executar’.

Clicando no botão **Executar**, o programa de cálculo corre e são apresentados os resultados (Figura 3.6), iteração a iteração, ou apenas o resultado final de acordo com a escolha anterior feita pelo utilizador.

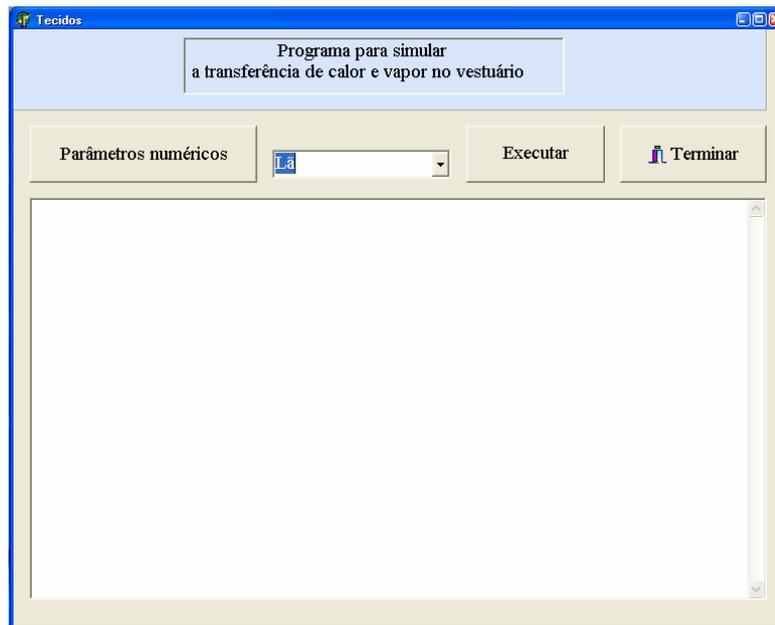


Figura 3.5 – Janela da aplicação informática “Tecidos”, onde é apresentado o tecido seleccionado pelo utilizador

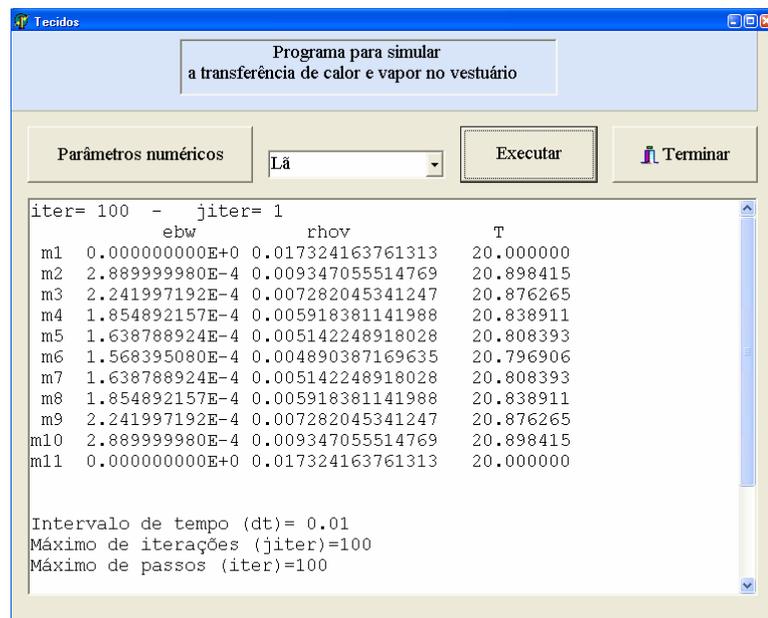


Figura 3.6 – Janela da aplicação informática “Tecidos”, onde são apresentados os resultados

Nesta janela (Figura 3.6) aparece, na primeira linha, o número de etapa (iter), assim como número de iterações (jiter) realizadas nessa etapa; aparecem de seguida, os

valores de T , ρ_v , ε_{bw} nos vários pontos do domínio e ainda indicações do intervalo de tempo usado na simulação, o número máximo de iterações permitidas por etapa e o número total de passos.

Após a execução do programa de cálculo, o utilizador poderá reiniciar novos cálculos ou terminar a execução da aplicação informática, clicando no menu “Terminar”.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e analisados resultados obtidos pelo programa desenvolvido, para simulação do modelo unidimensional, de transferência de calor e massa, aplicado a tecidos (naturais e sintéticos) para estudo do conforto térmico proporcionado por estes.

Através deste programa simulou-se a evolução dos parâmetros (T , ρ_v , ε_{bw}) do modelo de transferência de calor e massa e com o auxílio da aplicação Excel, visualizou-se graficamente os referidos parâmetros.

4.1 Introdução

Antes da obtenção prática de resultados, foram efectuados diversos testes ao programa de cálculo, com o objectivo de o validar.

Relativamente aos métodos numéricos usados, foram testadas diversas malhas (conjunto de pontos ao longo da espessura do tecido). Tendo em conta os resultados obtidos, decidiu-se optar pela mesma malha de pontos: 2 pontos na periferia do tecido onde estão guardadas as condições de fronteira ($m1$ e $m11$) e 9 pontos interiores ao domínio ($m2$ a $m10$) que se mostraram suficientes para descrever o perfil de temperaturas e concentração de vapor de água no tecido.

Relativamente, aos esquemas de integração no tempo, foram ainda testados esquemas alternativos (explícito e Crank-Nicholson). Optou-se pelo esquema implícito, dada a sua maior estabilidade.

Foram considerados diferentes passos de tempo (0.001, 0.01 e 0.1 segundos). Embora o intervalo de 0.1 segundos, permitisse testar mais rapidamente longos tempos de simulação, o intervalo de 0.01 segundos, parece o melhor compromisso entre precisão e rapidez. Ainda relativamente à precisão dos resultados, o programa foi corrido com diferentes erros de convergência. Optou-se pela precisão de 0.01 segundos, quer para a solução da equação da energia, quer na equação da difusão, tendo sido verificado que esta exigência permitia convergir o programa após 2 a 10 iterações em cada etapa. Usando erros menores (maior precisão), os resultados foram sensivelmente iguais nas casas decimais usadas mas, por vezes, o tempo de cálculo aumentou bastante (maior número de iterações em cada etapa).

Embora seja possível apresentar graficamente a evolução e perfil de todos os parâmetros calculados, neste capítulo são apenas apresentados, por razões de simplicidade, os perfis das variáveis T , ρ_v e ε_{bw} na direcção da espessura do tecido (valores obtidos nos pontos do domínio de cálculo – fronteiras e interior) e a evolução destas variáveis ao longo do tempo, no ponto médio do tecido.

4.2 Resultados Obtidos

São assim apresentados os resultados numéricos obtidos com o modelo matemático de transferência de calor e massa a 1D. Foram escolhidos dois tecidos com características diferentes, nomeadamente, o algodão como fibra natural, hidrófila e o poliéster como fibra sintética com pouca capacidade de retenção de água.

Foi simulada a situação de um tecido completamente seco, a 20 °C, que é posto num ambiente à mesma temperatura, mas com humidade relativa de 1.0.

4.2.1 Algodão

Sendo o algodão uma fibra natural, hidrófila, quando posto em contacto com um ambiente de elevada humidade, verifica-se um súbito aumento na sua temperatura, como se pode observar na Figura 4.1.

Passados apenas 10 segundos, a temperatura em termos médios está 7 °C acima da temperatura ambiente. Este aumento está relacionado com o fenómeno da sorção de vapor de água, caracterizado por uma libertação de energia. Ao fim de uma hora, os processos de troca de calor e difusão de vapor de água para o interior do tecido parecem estabilizar, todos os pontos apresentam a mesma temperatura, estando em equilíbrio com o meio ambiente (pontos *m1* e *m11*).

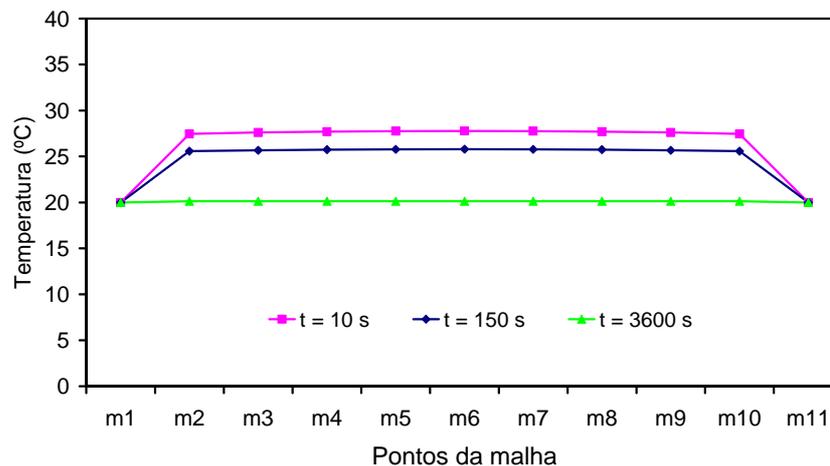


Figura 4.1 – Perfil da temperatura num tecido de algodão na direcção da espessura, para 10 segundos, 2 minutos e 30 segundos, e 60 minutos

A difusão de vapor de água do ambiente para o tecido é clara na Figura 4.2, que representa o perfil da massa volúmica de vapor de água (ou concentração de vapor na fase gasosa) no sentido da espessura do tecido. Aos 10 segundos, a concentração é diferente nos pontos do domínio, sendo maior nas extremidades.

Neste intervalo de tempo, ainda existe uma diferença de concentrações de vapor de água dentro e fora do tecido, e assim, continua a entrar vapor de água para o ar existente no interior da fibra. Ao fim de 60 minutos, o algodão contém uma massa volúmica de vapor de água máxima, aproximadamente 0.017 kg/m^3 , correspondendo à

humidade relativa de saturação do ambiente $\phi = 1$ (temperatura ambiente $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$). Todos os pontos do tecido apresentam a mesma concentração de vapor de água.

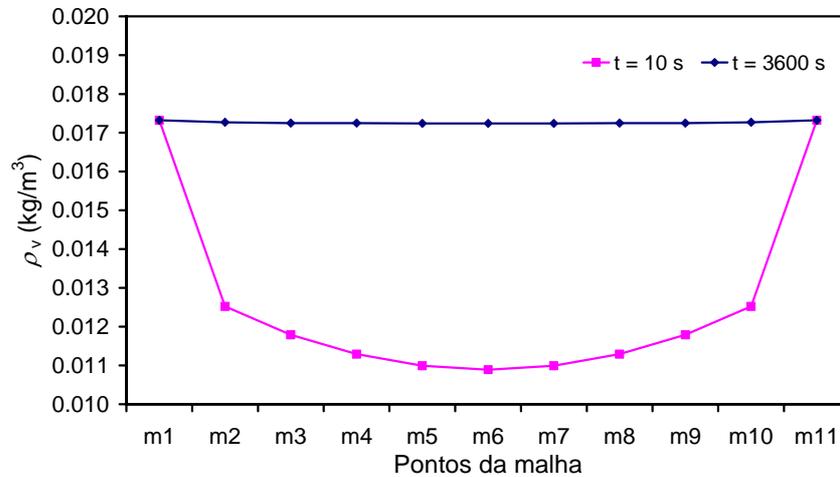


Figura 4.2 – Perfil da massa volúmica de vapor de água no algodão, na espessura do tecido, para 10 segundos e 60 minutos

A Figura 4.3 mostra a evolução da temperatura, no ponto médio do tecido, ao longo de 60 minutos. Confirma-se que nos primeiros instantes, mesmo no interior do tecido, a temperatura sobe bruscamente, devido ao fenómeno de sorção. Após este intervalo de tempo, a temperatura do tecido vai diminuindo, acabando por estabilizar à temperatura ambiente.

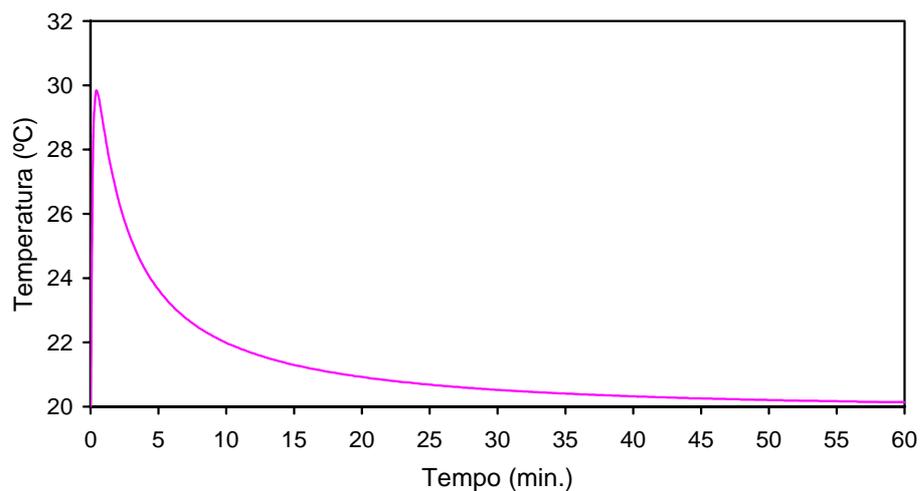


Figura 4.3 – Evolução da temperatura no ponto médio do tecido de algodão, para um período de 60 minutos

Como o tecido foi simulado com uma temperatura inicial de 20 °C, igual à temperatura ambiente, os elevados gradientes que ocorrem nos primeiros instantes (inferior a 30 segundos, de acordo com a Figura 4.4), são devidos à difusão de vapor de água no tecido e sorção da fase gasosa para a fibra. A sorção funciona assim como uma fonte de calor dentro da fibra.

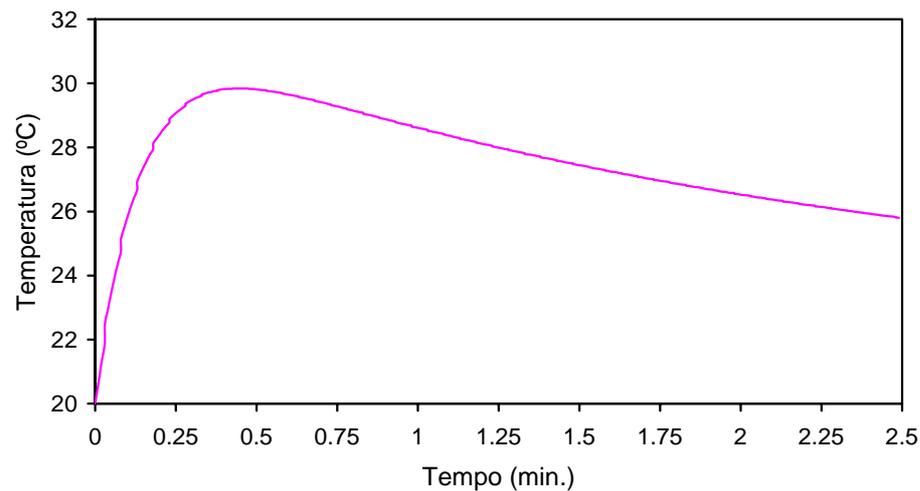


Figura 4.4 – Evolução da temperatura no ponto médio do tecido de algodão, para um período de 2 minutos e 30 segundos

Estes fenómenos estão ilustrados nas Figuras 4.5 e 4.6, que mostram no ponto médio da espessura do tecido, a evolução da massa volúmica do vapor de água durante 15 minutos e da fracção de água embebida no tecido para um período de tempo de 60 minutos, respectivamente.

A concentração de vapor de água na fase gasosa do tecido aumenta bruscamente dadas as diferenças de humidade relativa (tecido seco e ambiente saturado), atingindo o valor máximo de saturação de 0.017 kg/m^3 , após poucos minutos.

O aumento de quantidade de água nas fibras do tecido (Figura 4.6) é menos acentuado que a entrada de vapor de água para o ar contido no tecido (Figura 4.5). A entrada de água nas fibras do algodão (Equação 2.15) é essencialmente dependente da diferença de concentrações entre a superfície e o interior do tecido. No ponto médio do tecido, o aumento é gradual, ao fim de 60 minutos ainda não é suficiente para atingir um estado de equilíbrio (aproximadamente 0.09). Este ponto de equilíbrio é característico de cada tecido e função da humidade do ar ambiente.

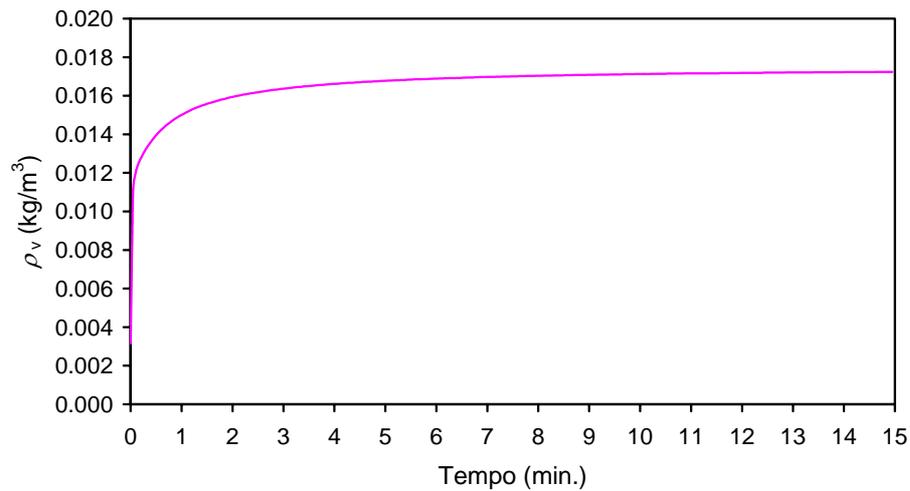


Figura 4.5 – Evolução da massa volúmica de vapor de água no ponto médio do tecido em algodão para 15 minutos

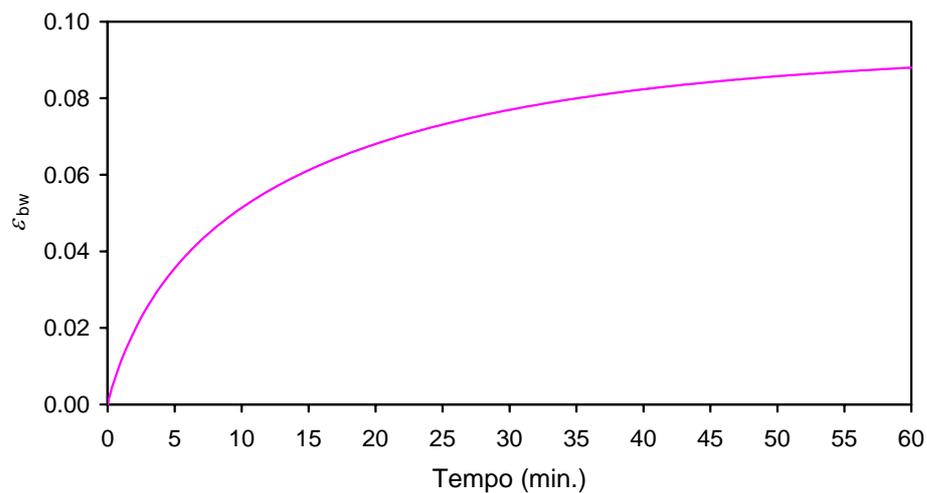


Figura 4.6 – Evolução da quantidade de água embebida (ϵ_{bw}) no algodão para um período de 60 minutos

4.2.2 Poliéster

Ao contrário do algodão, o poliéster é uma fibra sintética hidrófoba e com pouca capacidade de retenção de água. Isto é logo visível na Figura 4.7, onde está representado o perfil de temperaturas na espessura do tecido para 10 segundos. A temperatura

aumenta, também devido ao fenómeno da sorção, à semelhança do tecido do algodão, mas apenas 2 °C.

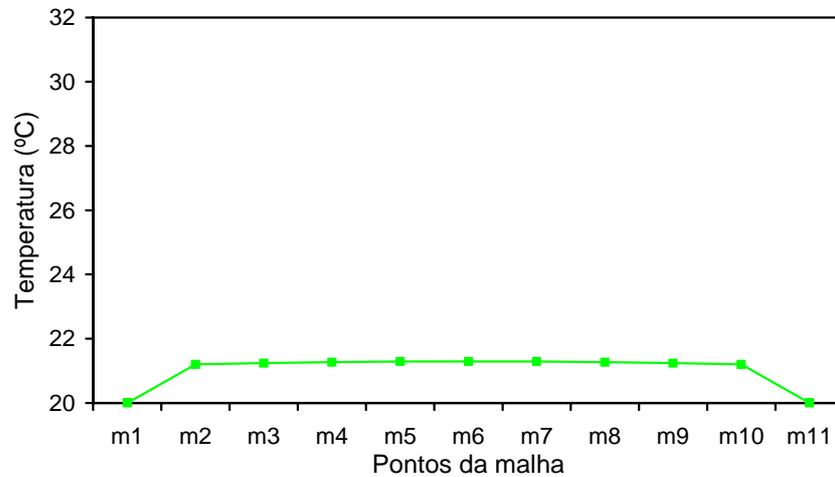


Figura 4.7 – Perfil da temperatura num tecido de poliéster na direcção da espessura para 10 segundos

Através da Figura 4.8, verifica-se que a massa volúmica do vapor de água fica praticamente estável ao fim de 10 segundos. Possuindo este tecido, baixa capacidade de absorção de vapor de água, todos os pontos da malha ficam logo em equilíbrio com o ar ambiente.

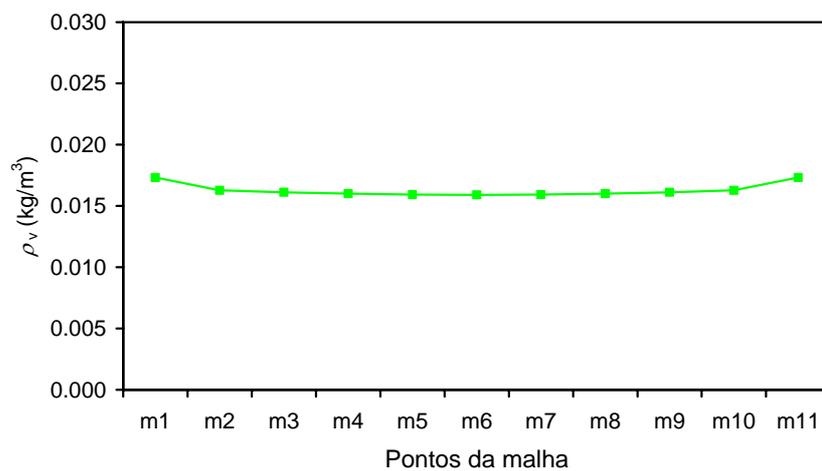


Figura 4.8 – Perfil da massa volúmica de vapor de água no poliéster para 10 segundos

O pico de temperatura observado no perfil da Figura 4.7, é praticamente o máximo valor encontrado fazendo agora a evolução da temperatura ao longo do tempo

para o ponto médio do tecido (Figura 4.9). Todo o tecido fica à temperatura ambiente em poucos minutos. Este comportamento é explicado pela súbita entrada de vapor de água no tecido (Figura 4.10). O ponto máximo de saturação de concentração de massa é atingido quase instantaneamente, ficando o poliéster rapidamente em estado de equilíbrio em termos de massa.

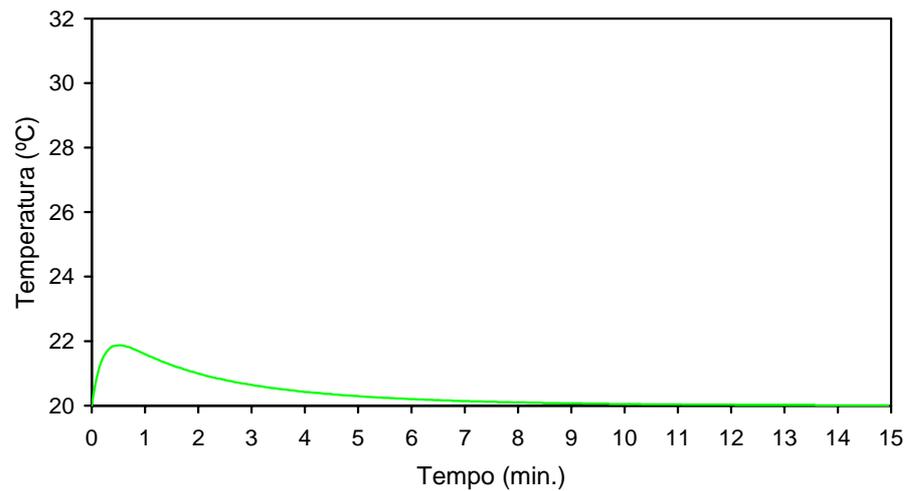


Figura 4.9 – Evolução da temperatura do ponto médio no tecido de poliéster para 15 minutos

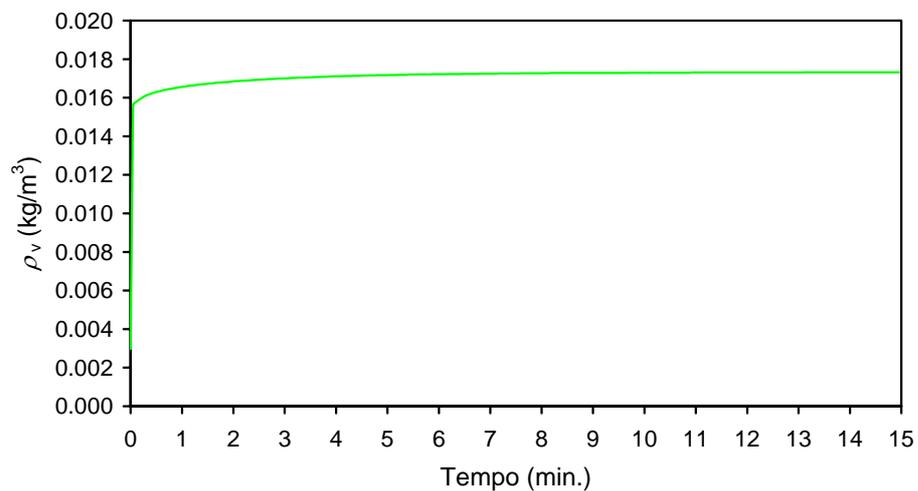


Figura 4.10 – Evolução da massa volúmica de vapor de água no ponto médio do tecido de poliéster para 15 minutos

Na Figura 4.11, observa-se que a quantidade de água (ε_{bw}) embebida nas fibras do poliéster é mínima, mesmo ao fim de 15 minutos, como seria de esperar, uma vez que estas fibras são bastantes hidrófobas. O *regain* desta fibra (R_f) é 0.004, a 20 °C e humidade relativa de 0.65.

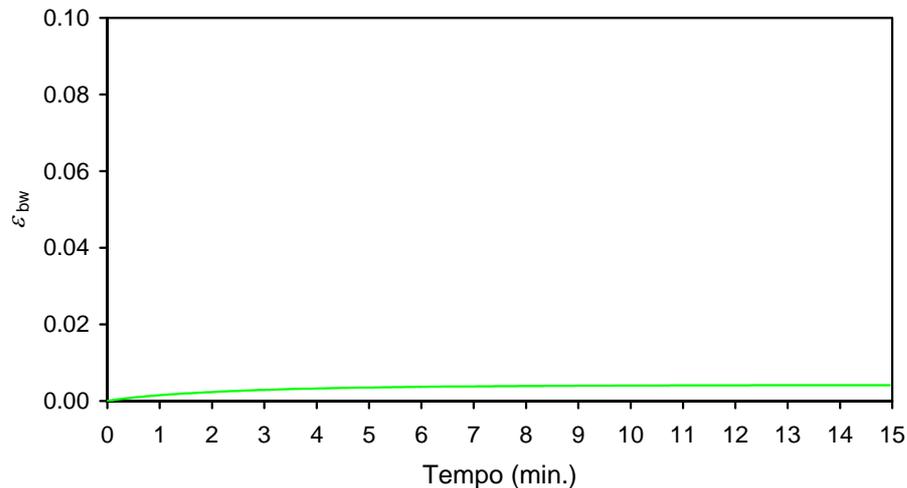


Figura 4.11 – Evolução da quantidade de água (ε_{bw}) no ponto médio do tecido de poliéster para 15 minutos

4.3 Sensibilidade do Modelo

Mesmo parecendo lógicos, numa primeira análise, os resultados obtidos para os dois tecidos, procedeu-se a um estudo mais ou menos pormenorizado sobre a sensibilidade do modelo a várias constantes e parâmetros.

O comportamento do programa de cálculo aos vários parâmetros físicos dos tecidos foi estudado e verificou-se que as reacções estavam de acordo com as alterações efectuadas.

São agora apresentados os resultados obtidos quando comparados diferentes tecidos, nomeadamente tecidos fabricados a partir de várias fibras naturais, a saber, algodão, lã e seda; tecidos sintéticos, entre os quais, poliéster e poliamida (nylon), e ainda, tecidos fabricados com mistura de fibras naturais e sintéticas.

A sensibilidade do modelo físico aos parâmetros ambientais foi também estudada e os principais resultados são aqui apresentados.

4.3.1 Tipo de tecidos

Embora fabricados com fibras naturais, os tecidos em algodão, lã ou seda apresentam comportamentos bem distintos, principalmente na sua reação à humidade ambiental. Assim, na Figura 4.12 estão apresentados os perfis de temperatura simulados para os três tipos de tecido, nas condições ambientais já apresentadas (temperatura ambiente de 20 °C e humidade relativa de 1.0). Os tecidos estão inicialmente à mesma temperatura de 20 °C mas completamente secos. Observa-se que embora os perfis de temperatura sejam uniformes no sentido da espessura, o aumento de temperatura no final de 2 minutos e 30 segundos, é maior para a lã e menor para a seda.

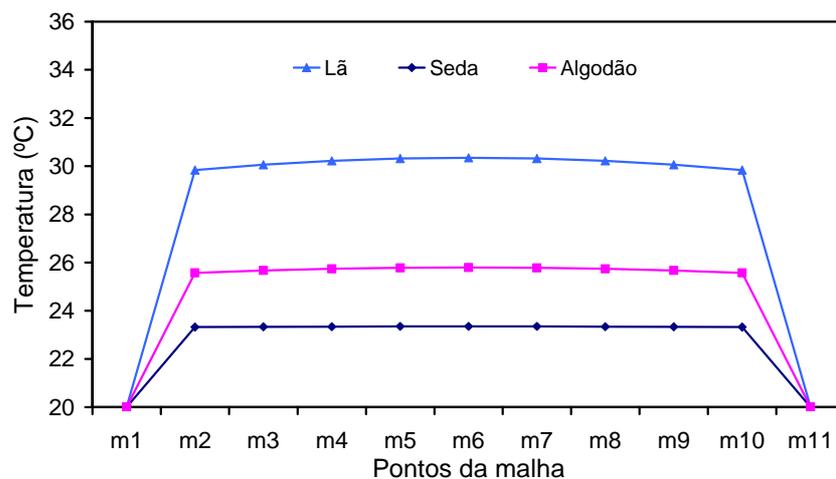


Figura 4.12 – Perfil da temperatura para tecidos naturais: lã, seda e algodão, ao fim de 2 minutos e 30 segundos

Estes resultados estão em concordância com o fenómeno de difusão de vapor de água no interior do tecido. Assim, verifica-se na Figura 4.13, que ao contrário da seda que está quase em equilíbrio com o ar ambiente em termos de humidade, a lã precisará de muito mais tempo para estabilizar e os seus pontos mais interiores apresentam menor concentração de vapor de água que os pontos próximos da fronteira (*m2* e *m10*). Isto

significa que na lã continua a existir difusão de vapor de água para a fase gasosa, quer do ambiente para o tecido, quer dentro do próprio tecido.

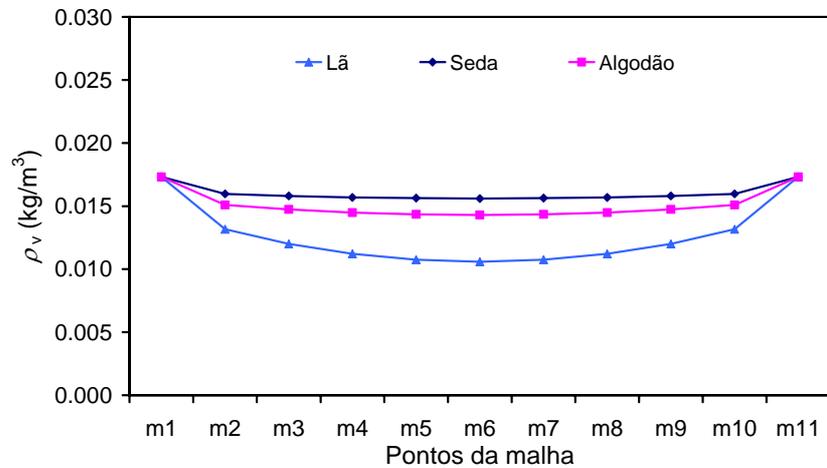


Figura 4.13 – Perfil da massa volúmica de vapor de água para tecidos naturais: lã, seda e algodão no final de 2 minutos e 30 segundos

A variação no tempo da temperatura no ponto médio do tecido em função do tempo está visualizada na Figura 4.14, para um período de 2 minutos e 30 segundos, para os vários tecidos naturais. A seda obtém o valor máximo de temperatura, nos primeiros segundos e rapidamente começa a decrescer ao contrário do algodão e principalmente da lã, para os quais, a variação é maior mas ocorre durante um período de tempo maior.

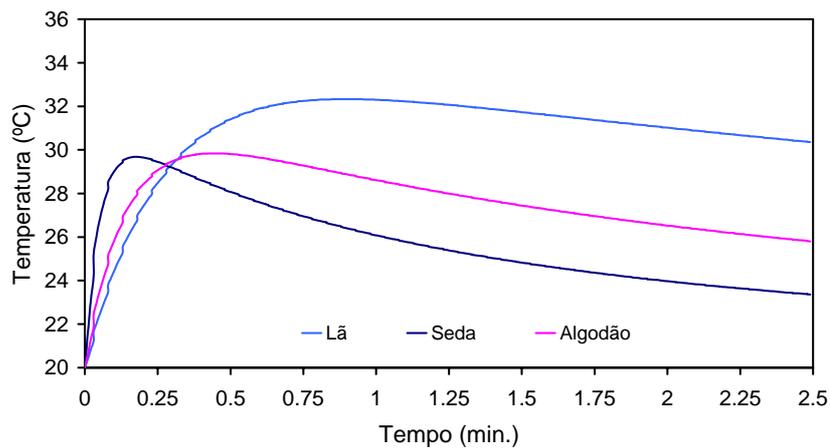


Figura 4.14 – Evolução da temperatura no ponto médio para tecidos naturais: lã, seda e algodão, ao fim de 2 minutos e 30 segundos

No final de uma hora (Figura 4.15), a temperatura no ponto médio do tecido de lã continua acima da temperatura ambiente de 20 °C.

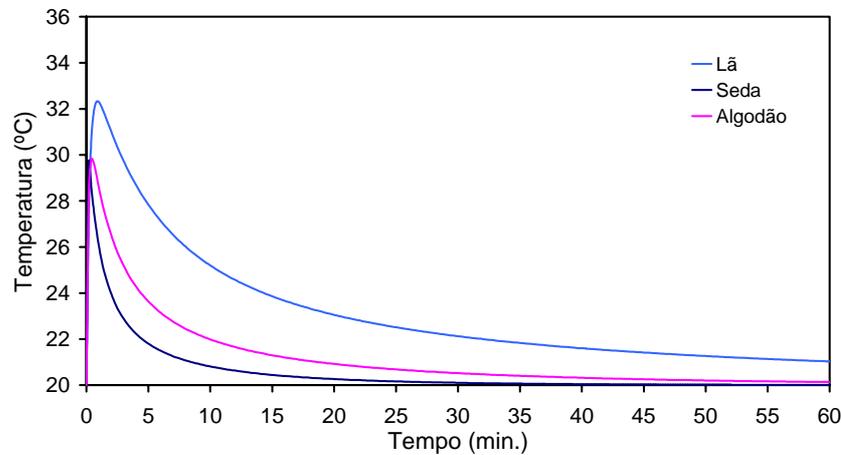


Figura 4.15 – Evolução da temperatura para tecidos naturais: lã, seda e algodão para um período de 60 minutos

O mesmo poderá ser dito em relação à concentração de vapor de água na fase gasosa do tecido de lã, pois a massa volúmica de vapor de água no ponto médio (Figura 4.16) continua abaixo do valor do meio ambiente.

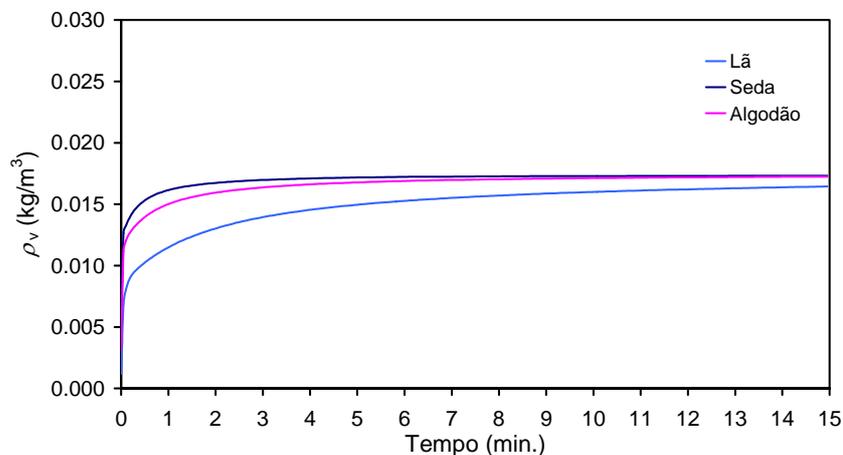


Figura 4.16 – Evolução da massa volúmica de vapor de água para tecidos naturais: lã, seda e algodão para um período de 60 minutos

A quantidade de água embebida nas fibras (Figura 4.17), ao fim de uma hora, ilustra bem o comportamento da lã como fibra hidrófila. Enquanto que ao fim de 30 minutos, quer a seda quer o algodão tendem a estabilizar para o valor de água num ambiente de humidade de 100 %, a água continua a entrar nas fibras de lã.

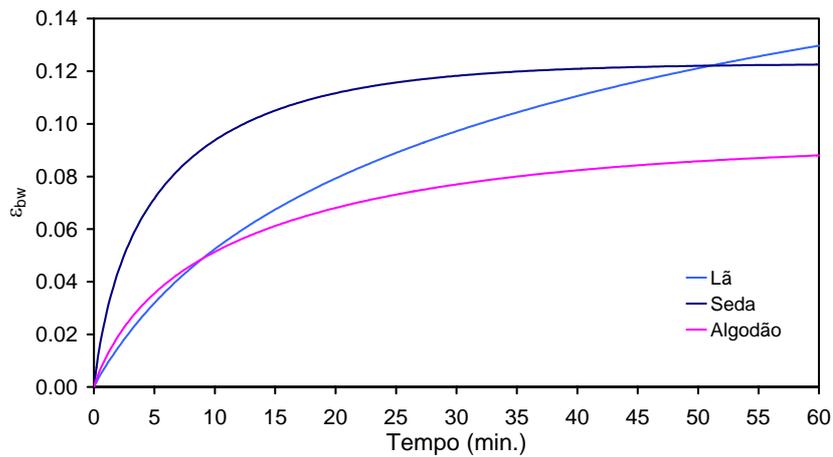


Figura 4.17 – Evolução da quantidade de água para tecidos naturais: lã, seda e algodão para 60 minutos

Também dentro das fibras sintéticas, o comportamento destas à transferência de calor e massa pode ser bem diferente, dependendo sobretudo das características hidrófilas da fibra.

A Figura 4.18 mostra o perfil de temperatura para dois tecidos sintéticos: poliamida (nylon) e poliéster. Pode observar-se que em relação ao poliéster a variação da temperatura é de apenas 1 °C.

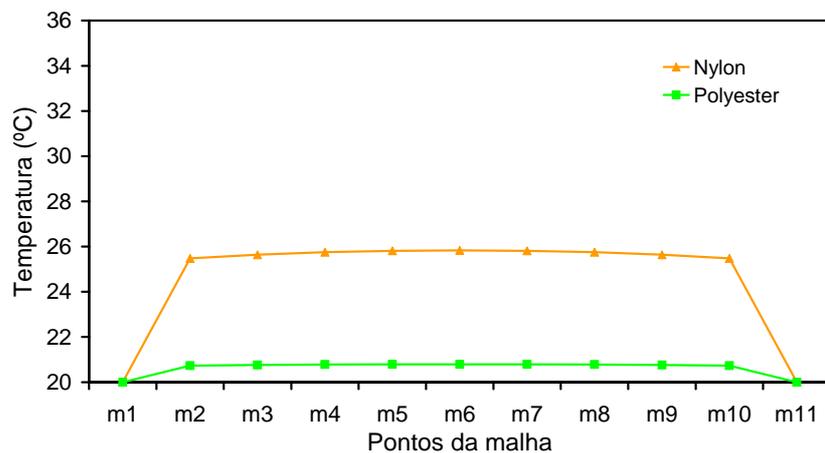


Figura 4.18 – Perfil da temperatura em tecidos sintéticos (poliamida e poliéster) para 2 minutos e 30 segundos

A massa volúmica do vapor de água presente no poliéster (Figura 4.19) é praticamente igual à do meio ambiente.

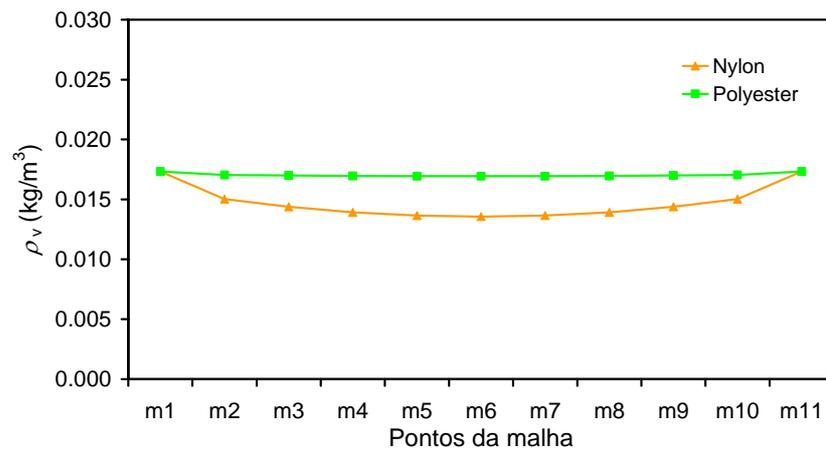


Figura 4.19 – Perfil da massa volúmica de vapor de água em tecidos sintéticos para 2 minutos e 30 segundos

Pela Figura 4.20, observa-se que o poliéster, praticamente, não absorve água, sendo de esperar, porque este tecido é muito hidrófobo. Em relação à poliamida (nylon), esta absorve alguma quantidade de água o que leva a considerar as suas características hidrófilas.

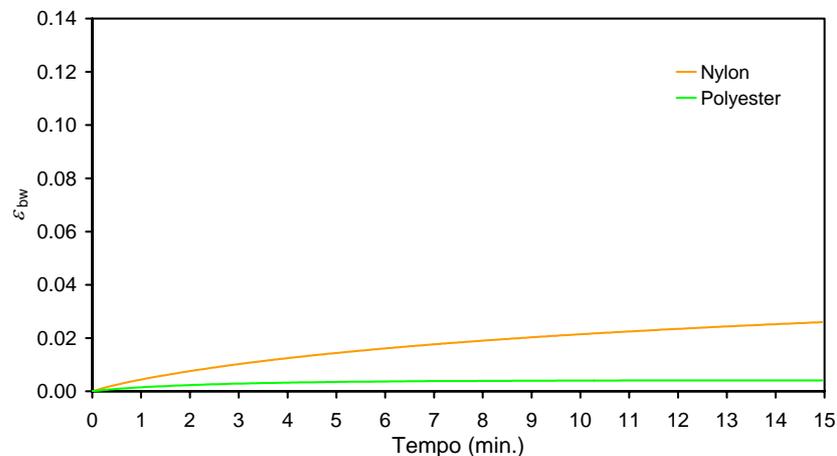


Figura 4.20 – Evolução da quantidade de água embebida em tecidos sintéticos (poliamida e poliéster) para 15 minutos

Parece ainda interessante verificar o comportamento do modelo quando em presença de tecidos, fabricados por várias fibras e em particular, uma fibra natural como a lã com propriedades hidrófilas e o poliéster. A Figura 4.21 mostra a evolução da temperatura ao longo do tempo para um tecido constituído por 40 % de lã e 60 % de

poliéster. A presença do poliéster faz com que as variações de temperatura sejam menores e que o estado de equilíbrio seja atingido mais rapidamente.

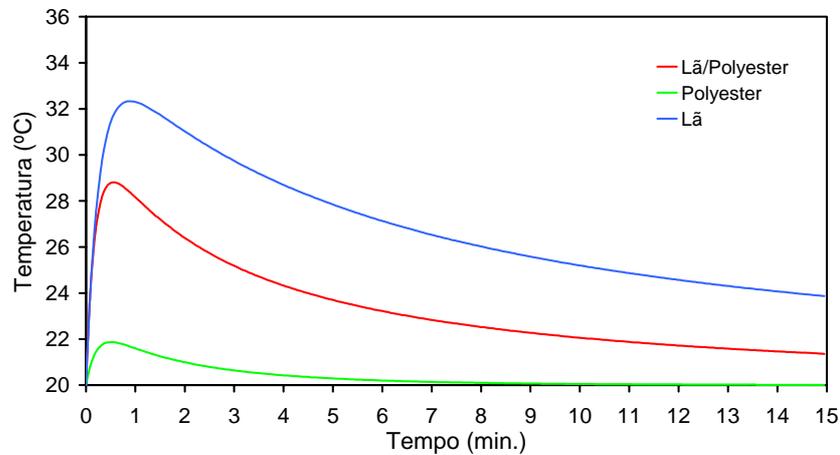


Figura 4.21 – Evolução da temperatura no ponto médio dum tecido híbrido (lã e poliéster), para um período de 15 minutos

4.3.2 Condições de fronteira

A sensibilidade do modelo físico aos parâmetros ambientais foi estudada, considerando duas situações diferentes.

Mantendo as mesmas condições de temperatura e humidade no meio ambiente, e considerando que os tecidos estão inicialmente secos, à temperatura ambiente de 20 °C, apenas foi alterado o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção. A importância destes parâmetros de transferência é bem evidenciada por Dear *et al.* (1997) que discute os valores mais correctos para simular cada uma das partes do corpo humano.

Como se pode observar na Figura 4.22, para coeficientes de transferência de calor por convecção (h_c) diferentes, os valores máximos de temperatura são diferentes, sendo mais elevados para $h_c = 40.0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{s})$, em qualquer um dos tecidos de fibras naturais testados. O valor mais elevado de h_c pode ser interpretado como sendo um coeficiente de transferência de calor, onde, por exemplo, o fenómeno de radiação foi incluído com um incremento no coeficiente de transferência por convecção. Este é um procedimento comum em estudos de transferência de calor.

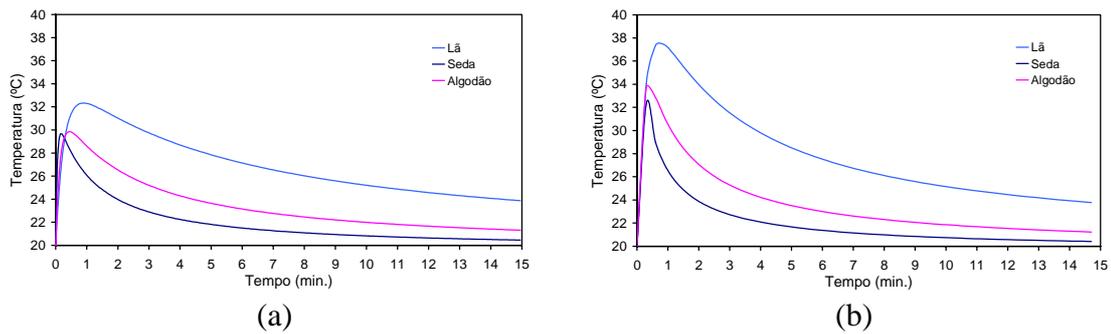


Figura 4.22 – Comparação de valores da temperatura ao longo do tempo obtidos para diferentes coeficientes de transferência de calor por convecção ($h_c = 21.8 \text{ W/m}^2\text{s}$ (a) e $h_c = 40.0 \text{ W/m}^2\text{s}$ (b)).

Tentando alargar a aplicabilidade do modelo a novas situações, foi ainda testado um caso diferente de condições de fronteira.

A Figura 4.23 mostra o perfil da quantidade de água embebida nas fibras para três tecidos diferentes, num intervalo de 10 segundos. As condições de temperatura e humidade relativa do ar ambiente são agora assimétricas. Simulando de perto as condições da pele humana, considerou-se que num dos extremos o tecido entra em contacto com uma temperatura de $32 \text{ }^\circ\text{C}$ e ainda $\phi = 1$; a outra fronteira simula o ar ambiente com temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e humidade relativa $\phi = 0.65$.

Os resultados obtidos são como seria de esperar assimétricos, logo no final de um curto intervalo de tempo de 10 segundos.

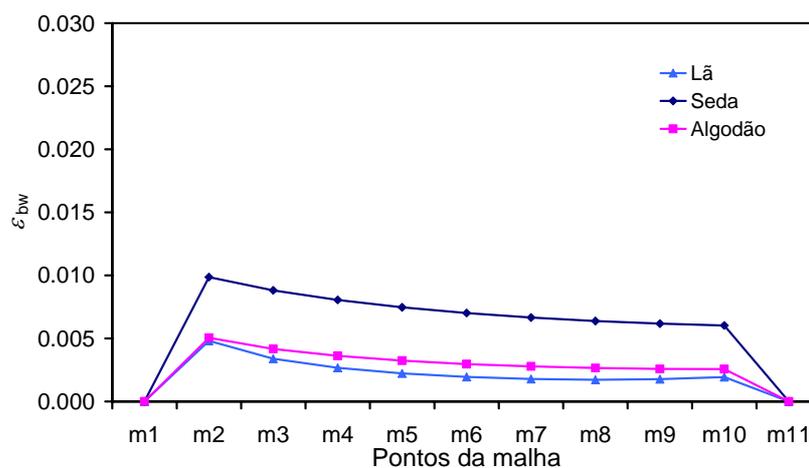


Figura 4.23 – Perfil da água na espessura do tecido, para 10 segundos, com condições de fronteira diferentes: ($T_{pele} = 32 \text{ }^\circ\text{C}$; $\phi = 1$) e ($T_{ambiente} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $\phi = 0.65$).

A concentração de vapor de água na espessura do tecido (Figura 4.24) apresenta valores entre a atmosfera de saturação numa das condições de fronteira e valores correspondentes a uma humidade relativa de 0.65 noutra. Do mesmo modo que na situação de simetria (Figura 4.13), a lã reage mais lentamente que o algodão e a seda.

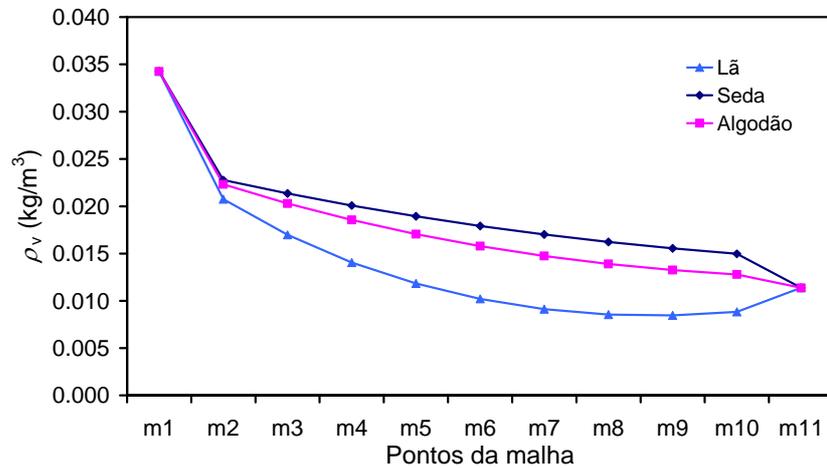


Figura 4.24 – Perfil da massa volúmica de vapor de água para 10 segundos

$$(T_{pele} = 32^{\circ}C; \phi = 1) \text{ e } (T_{ambiente} = 20^{\circ}C; \phi = 0.65).$$

No final de 15 minutos (Figura 4.25), o perfil de temperaturas na espessura do tecido parece estabilizado embora assimétrico.

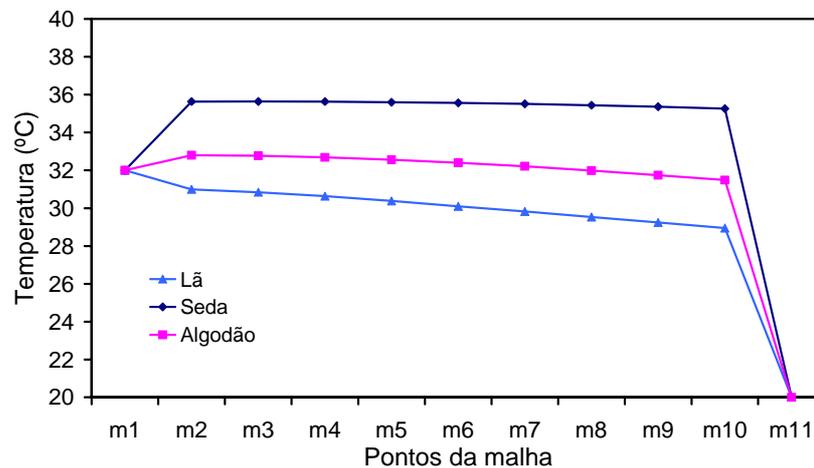


Figura 4.25 – Perfil da temperatura para 15 minutos ($T_{pele} = 32^{\circ}C; \phi = 1$) e

$$(T_{pele} = 20^{\circ}C; \phi = 0.65).$$

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo são sublinhados os principais resultados e lançadas algumas pistas de desenvolvimento futuro.

5.1 Principais Conclusões

Usando a metodologia de trabalho definida no Capítulo 1, e tendo em conta os objectivos previamente definidos, foi implementado um modelo transiente, unidimensional, de transferência de massa e energia, num tecido.

O código implementado resolve numericamente um sistema de equações com derivadas parciais, recorrendo ao método implícito e à técnica dos volumes finitos. As equações, a saber, a equação da energia e a equação de difusão na fase gasosa, são resolvidas por um processo iterativo, em cada etapa.

Conhecendo, as propriedades físicas dum tecido, definindo as condições ambientais, o programa de cálculo simula as trocas de calor e vapor de água ao longo do tempo e na espessura do tecido. Pode ainda ser obtida a quantidade de água embebida nas fibras ao longo do tempo.

Foi ainda desenvolvida uma interface gráfica, que simplificando a entrada de dados neste programa de cálculo parece constituir uma ferramenta informática útil e amigável ao utilizador do modelo.

Foram efectuados testes a esta ferramenta de cálculo, no sentido de estudar a sensibilidade do programa de cálculo aos vários parâmetros do modelo. O modelo foi testado para tecidos naturais e sintéticos e foram assim comparados os resultados para as diferentes fibras. O fenómeno de difusão e sorção através dum meio poroso e higroscópico foi simulado e os resultados obtidos parecem corresponder ao comportamento real dos próprios tecidos.

O modelo mostrou-se adequado para diferentes constantes do modelo e para diferentes condições de fronteira.

Foi assim, dado o primeiro passo na compreensão dos fenómenos complexos de transferência de calor e massa no vestuário, criando uma ferramenta útil no desenvolvimento de novos tecidos.

5.2 Sugestões de Trabalho Futuro

A interface gráfica desenvolvida é ainda rudimentar e deverá ser modificada no sentido de permitir ao utilizador uma maior escolha de parâmetros. A parte de visualização de resultados poderá também ser melhorada.

As transferências de calor (e massa) por convecção são importantes e o modelo matemático deverá ser modificado de forma a incluir esses termos. O campo de velocidades e pressões terá de ser calculado previamente (usando o algoritmo SIMPLE) e o campo de valores será usado na solução das equações de difusão e energia. Neste processo iterativo, os vários parâmetros do modelo serão actualizados, dada a sua dependência da temperatura.

Duma forma simples, o programa de cálculo agora implementado, está a ser modificado para poder ser aplicado a tecidos constituídos por duas fibras com propriedades diferentes, isto é, um tecido com parâmetros diferentes ao longo da sua

espessura. No âmbito de um projecto POCTI, a decorrer desde Janeiro de 2005, na Universidade do Minho estão a ser desenvolvidos novos tecidos (em fibras naturais, como o bambu, o milho e a soja) que serão depois usados em testes reais de conforto térmico.

Neste sentido, o programa de simulação do tecido será integrado num modelo de termoregulação já existente (Epifânio *et al.*, 2002; Teixeira *et al.*, 2005) que pretende simular as complexas trocas entre o corpo humano e o meio ambiente, através do vestuário.

Referências Bibliográficas

1. Berger, X.; Sari, H. *A New Dynamic Clothing Model. Part 1: Heat and Mass Transfers*. Int. J. Therm. Sci., Vol. 39, 2000, p. 635-645.
2. Chang, W.; Weng, C. *An Analytical Solution to Coupled Heat and Moisture Diffusion Transfer in Porous Materials*. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, 2000, p. 3621-3632.
3. Conceição, E.Z.E. *Influência dos Sistemas de Ventilação Localizada na Sensação de Conforto Térmico*. Ingenium, 2.^a Série, N.º 74, 2003, p. 79-82.
4. Cunha, J.L.F. *Aspectos Funcionais do Design Total de Tecidos*. Universidade do Minho, 2003. Tese de doutoramento.
5. Dasgupta, A.; Agarwal, R.K.; Bhandarkar, S.M. *Three-Dimensional Modelling of Woven-Fabric Composites for Effective Thermo-Mechanical and Thermal Properties*. Composites Science and Technology, Vol. 56, 1996, p. 209-223.
6. Dear, R.J.; Arens, E.; Hui, Z.; Oguro, M. *Convective and Radiative Heat Transfer Coefficients for Individual Human Body Segments*. Int. J. Biometeorol, Vol. 40, 1997, p. 141-156.
7. Dear, R.J.; Brager, G.S. *The Adaptive of Thermal Comfort and Energy Conservation in the Built Environment*. Int. J. Biometeorol, Vol. 45, 2001, p. 100-108.
8. Epifânio, P.; Silva, A.; Teixeira S.F.C.F.; Teixeira, J.C.F. *Modelo de Conforto Térmico Baseado na Distribuição da Temperatura do Corpo Humano*. Métodos Numéricos en Ingeniería V (CD-ROM), 2002, SEMNI, Espanha.

9. Fan, J.; Luo, Z.; Li, Y. *Heat and Moisture Transfer with Sorption and Condensation in Porous Clothing Assemblies and Numerical Simulation*. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, 2000, p. 2989-3000.
10. Fanger, P.O. *Human Requirement in Future Air-Conditioned Environments*. International Journal of Refrigeration, Vol. 24, 2001, p. 148-153.
11. Fernandes, E.M.G.P. *Computação Numérica*. Universidade do Minho, 1996.
12. Geraldes, M.J.O. *Análise Experimental do Conforto Térmico das Malhas Funcionais no Estado Húmido*. Universidade do Minho, 1999. Tese de doutoramento.
13. Ghaddar, N.; Ghali, K.; Jones, B. *Integrated Human-Clothing System Model for Estimating the Effect of Walking on Clothing Insulation*. International Journal Thermal Sciences, Vol. 42, 2003, p. 605-619.
14. Gibson, P.W.; Chamarchi, M. *Modelling Convection/Diffusion Processes in Porous Textiles with Inclusion of Humidity-Dependent Air Permeability*. Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 24, nº 5, 1997, p. 709-724.
15. Horrocks, A.R. *Developments in Flame Retardants for Heat and Fire Resistant Textils –The Role of Char Formation and Intumescence*. Polymer Degradation and Stability, Vol. 25, 1996, p. 143-154.
16. Imre, L.; Bitai, A.; Horváth, C.D. *Thermal Analysis of Human Body-Clothing-Environment System*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 25, 1988, p. 357-371.
17. ISO 7730: *Ambiences Thermiques Modérées –Détermination des Indices PMV et PPD et spécification des Conditions de Confort Thermique*. 1984.
18. Kunz, E.; Chen, X. *Analysis of 3D Woven Structure as a Device for Improving Thermal Comfort of Ballistic Vests*. 2nd International Textile, Clothing & Design Conference. Dubrovnik, Croacia. Outubro, 2004.
19. Kwon, A.; Kato, M.; Kawamura, H.; Yanai, Y.; Tokura, H. *Physiological Significance of Hydrophilic and Hydrophobic Textile Materials During Intermittent Exercise in Humans under the Influence of Warm Ambient Temperature with and without Wind*. Eur. J. Appl. Physiol., Vol. 78, 1998, p. 487-493.

20. Lagoudi, A.; Loizidou, N.; Santamouris, M.; Asimakopoulos, D. *Symptoms Experienced, Environmental Factors and Energy Consumption in Office Buildings*. Energy and Buildings, Vol. 24, 1996, p. 237-243.
21. Neves, M.; Cunha, J. *Integrando o Conforto e a Estética no Design de Tecidos*. II SIENTEX – Simpósio Internacional de Engenharia Têxtil, Natal, Brasil, Setembro 2004.
22. Neves, M.; Cunha, J. *Total Design of Function Oriented Textil Product*. 5th International Istanbul Textile Conference, Istanbul, Turquia, Maio 2005.
23. Neves, M.; Cunha, J.; Oliveira, P. *Fabric Comfort- Relations Between Functional Properties and Production Characteristics*. Proceedings of World Textile Conference, Roubaix, França. Junho 2004.
24. Parsons, K. *Human Thermal Environments*. Taylor & Francis, 2003.
25. Srinavin, K.; Mohamed, S. *Thermal Environment and Construction Workers' Productivity: Some Evidence from Thailand*. Building and Environment, Vol. 38, 2003, p. 339-345.
26. Stolwijk, J.A.J.; Hardy, J.D. *Control of Body Temperature*. In Handbook of Physiology, section 9: Reaction to Environmental Agents, Bethesda, Maryland. American Physiological Society, 1977, p. 45-68.
27. Sun, Y.; Chen, X.; Feng, X.; Liu, C. *A Study of Heat Transfer through Textiles using the Finite Element Method*. ENCE – Magic World of Textiles, 2004, p. 800-805.
28. Teixeira, S.F.C.F.; Ferreira, M.L.; Costa, L.G. *A Computer Interface for Human Comfort Calculations*. Proceedings of IMC22, 31 Ago-2 Set, 2005, p. 131-137.
29. Versteeg, H.K.; Malalasekera, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method*. Longman Scientific & Technical, 1995.
30. Yigit, A. *The Computer-Based Human Thermal Model*. Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 25, 1998, p. 969-977.
31. Ying, B.; Kwok, Y.; Li, Y.; Zhu, Q.; Yeung, C. *Assessing the Performance of Textiles Incorporating Phase Change Materials*. Polymer Testing, Vol. 23, 2004, p. 541-549.