

Estudo numérico de um sistema de arrefecimento inteligente para calçado

Realizado em



CeNTI – Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes

Orlando Miguel Silva Neiva

Tese de Mestrado

Orientador na Empresa: Doutor Tiago Sotto Mayor

Orientador na FEUP: Doutor Fernando Tavares de Pinho



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Março de 2011

Resumo

A importância dada ao conforto tende a ser cada vez mais elevada com o aumento dos padrões de qualidade de vida. Ambientes quentes tendem a provocar um elevado nível de desconforto, devido ao aumento da temperatura, mas também devido ao aumento da taxa de libertação de suor. O suor libertado por um pé e aprisionado no calçado origina um ambiente propício à disseminação de fungos, bactérias e pé de atleta. Para dar resposta a este problema, foi tido como solução adequada a incorporação de um ventilador no calçado. A introdução de um ventilador permitirá a remoção de calor e de massa do interior do calçado. Tendo em vista este fim, foram construídas três geometrias, referentes a uma determinada secção do pé. Uma primeira geometria representa a pele exposta a um escoamento delimitado pela superfície interna do calçado. Na segunda geometria considerou-se a inclusão de uma meia sobre a superfície da pele e, numa terceira geometria, para além da meia considerou-se também uma camada porosa representativa do calçado, e uma camada superior representativa do ambiente circundante. Nestas simulações foram considerados os fenómenos de transferência de calor por condução e convecção, e transferência de massa por convecção e difusão. Para a caracterização das propriedades da meia e do calçado foi considerada uma análise do tipo diferencial, que permitiu descrever as suas propriedades em função do teor de humidade. Para estas geometrias foram estudadas a influência de diversos parâmetros, tais como a velocidade do escoamento, temperatura e concentração, no calor e massa removidos. Foi ainda estudado o efeito da utilização de diversos tipos de meia por forma a garantir que o dimensionamento do ventilador e geometria de um futuro calçado seja eficiente do ponto de vista térmico. Para a realização destas simulações, foi utilizada a plataforma de simulação *Comsol 3.5a*.

Em síntese, conclui-se que a tortuosidade e a fracção de volume sólido da meia são os parâmetros que mais influenciam o calor e massa removidos do pé. Tendo em conta a aplicação final, para que a remoção de calor e massa seja feita de forma eficiente, interessa que o calçado possua baixa permeabilidade. As geometrias aqui construídas são passíveis de utilização, para a simulação de fenómenos de transferência de calor e de massa noutras partes do corpo.

Palavras chave: *CFD*; transferência de calor; transferência de massa; escoamento de fluidos; permeabilidade; têxtil

Numerical study on intelligent cooling system for footwear

Abstract

The emphasis on comfort tends to be increasingly higher with the rising of standards of living. Hot environments tend to cause a high level of discomfort, due to increase in temperature, but also due to increasing sweat rates. Sweat trapped by the shoe causes a propitious environment to the spread of fungi, bacteria and athlete's foot. To address this problem, it is considered as an appropriated solution, the incorporation of a fan in the shoe. The introduction of a fan will allow the removal of heat and mass from inside of the footwear. To this end, three geometries are constructed regarding different sections of the foot. A first geometry represents the skin exposed to a flow confined by the inner surface of the shoe. In the second geometry it is considered the inclusion of a sock above the skin and, whereas in a third geometry, besides the sock it is also considered a porous layer representative of the shoe, and an upper layer representing the surrounding environment. In these simulations it is considered the heat transfer by conduction and convection, and mass transfer by convection and diffusion. To characterize the sock and footwear properties, it is considered a volume average method, which allows to describe their properties as a function of moisture content. For these geometries it is studied the influence of several parameters such as flow velocity, temperature and concentration on the heat and mass removal. It is also studied the effect of using several kinds of socks to ensure that the fan sizing and footwear design is efficient from the thermal point of view. To perform these simulations, it is used the simulation platform *Comsol 3.5a*.

In summary, it is concluded that the tortuosity and dry solid fraction are the parameters that most influence the heat and mass removal from the foot. Taking into account the final application, to ensure that the removal of heat and mass is done efficiently, it is of interest that footwear has low permeability. The geometries built here may be used to the simulation of heat and mass transfer phenomena at other body parts.

Keywords: *CFD*; heat transfer; mass transfer; fluid flow; permeability; textile

Agradecimentos

A realização do trabalho que aqui apresento só foi possível com a colaboração de várias pessoas, pelo que expresso aqui os meus agradecimentos, nomeadamente:

Em primeiro lugar ao meu orientador na empresa, o Doutor Tiago Sotto Mayor, pela compreensão, paciência, e forma disponível com que sempre acompanhou o andamento deste trabalho;

Ao Professor Doutor Fernando Tavares de Pinho, orientador na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pelos conselhos e comentários;

Ao Bruno Matos, João Guimarães, André Pinto, Nélson Durães, Soraia Neves, André Assembleia e Carlos Rodrigues pelo companheirismo;

Por último, mas não menos importante, à minha família por todo o apoio dado.

Índice

Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	ix
Notação e Glossário	xi
1 Introdução.....	1
1.1 Apresentação da empresa.....	1
1.2 Enquadramento e Apresentação do Projecto.....	1
1.3 Contributos do Trabalho.....	1
1.4 Organização da tese.....	1
2 Descrição do Problema	3
3 Estado da Arte	5
3.1 Soluções técnicas para promover o arrefecimento	5
3.1.1 Arrefecimento termoeléctrico.....	5
3.1.2 Ciclo a gás	7
3.1.3 Ciclo frigorífico de compressão de vapor	8
3.1.4 Ventilação forçada.....	8
3.2 Domínios de aplicação	12
3.3 Termofisiologia	14
3.3.1 Quantidade de calor a remover.....	14
3.3.2 Relevância do efeito em função das condições exteriores e interiores.....	15
3.3.3 Onde é mais relevante promover o arrefecimento?.....	16
4 Validação analítica de resultados	19
4.1 Escoamento	21
4.2 Transferência de calor	22
4.3 Transferência de massa	26
5 Descrição Técnica e Discussão dos Resultados.....	31
5.1 Geometria 1.....	31
5.1.1 Descrição.....	31
5.1.2 Discussão de resultados e Testes paramétricos	33
5.2 Geometria 2.....	40
5.2.1 Descrição e formas de implementação.....	40
5.2.2 Distribuição de parâmetros ao longo do domínio.....	45
5.2.3 Testes Paramétricos relativos às condições de entrada	50
5.2.4 Testes paramétricos relativos às propriedades do têxtil	56

5.3	Geometria 3.....	62
5.3.1	Descrição e formas de implementação.....	62
5.3.2	Discussão de resultados e Testes paramétricos.....	68
5.4	Comparação de resultados.....	72
6	Conclusões.....	75
7	Trabalhos Futuros.....	77
	Referências.....	79
	Anexo A – Testes de Grelha.....	83
A. 1	- Geometria referente à validação analítica de resultados.....	83
A. 2	- Geometria 1.....	85
A. 3	- Geometria 2.....	86
A. 4	- Geometria 3.....	88
	Anexo B – Tempos de computação.....	91
	Anexo C – Equações - base dos modelos utilizados.....	93
	Anexo D - Distribuição dos parâmetros ao longo da Geometria 3.....	95

Índice de Figuras

Figura 1- Geometrias considerados no estudo numérico	3
Figura 2- Vista explodida da sola relativa à patente US 5367788 [4].....	6
Figura 3- Vista explodida da sola relativa à patente PCT/PT2010/000002 [5].....	7
Figura 4- Incorporação de um ciclo a gás [6].....	8
Figura 5- a) Vista de lado de um sapato com ventilação forçada [7] e b) Vista de baixo de um sapato com ventilação forçada [7]	9
Figura 6- a) Vista de lado de uma solução patenteada com mecanismo de insuflação de ar [8] e b) Vista de lado de uma solução patenteada com mecanismo de insuflação de ar por meio de molas [9].....	10
Figura 7- Bota com ventilação forçada [10].....	10
Figura 8- a) Vista de lado evidenciando o cilindro a gás [11] e b) Vista de trás evidenciando a câmara de ar [11]	11
Figura 9- Estrutura tubular por onde é libertado o CO ₂ [12].....	11
Figura 10- Colete com sacos de gelo amovíveis [13].....	12
Figura 11- Colete contendo gelo no interior dos gomos e revestido externamente com alumínio [15].....	12
Figura 12- Representação esquemática da libertação de calor na pele [16].....	13
Figura 13- Representação esquemática da transferência de calor acumulado no tecido para a pele [16]	13
Figura 14- Representação esquemática da estrutura do fato [17].....	13
Figura 15- Pessoa vestindo um fato de arrefecimento [18].....	13
Figura 16- Representação esquemática da transferência de calor entre a pele e o meio ambiente [20]	14
Figura 17- Fotomicrografia do tecido <i>Stomatex</i> [®] [20]	14
Figura 18- Localização das cápsulas usadas na medição do suor libertado pelo pé [23].....	16
Figura 19- Taxa de libertação de suor média para as diversas localizações [23].....	16

Figura 20- Localização dos termopares para medição da temperatura durante os dois regimes de velocidade [27].....	17
Figura 21- Representação esquemática da geometria, das fronteiras e sistema de eixos.....	19
Figura 22- Distribuição da velocidade, temperatura e concentração no domínio.....	21
Figura 23- Perfis de velocidades, numérico e teórico, obtidos na secção de saída.....	22
Figura 24- Número de Sherwood ao longo de x_1 , para diferentes valores limite de i	27
Figura 25- Número de Sherwood para $x_1 > 0,001$ m e considerando $i = 1 \dots 30$	27
Figura 26 - Representação esquemática da Geometria 1.....	31
Figura 27- Difusividade do vapor de água no ar em função da temperatura do ar (à pressão atmosférica).....	32
Figura 28- Distribuição da temperatura e concentração no domínio, para várias velocidades de entrada; as representações não se encontram à escala 1:1.....	34
Figura 29- Perfis em diversas secções verticais ($x^* = 0,25, 0,5$ e $0,75$; abcissa adimensional da geometria) da a) temperatura e b) concentração; a velocidade de entrada do escoamento é igual a $0,5$ m/s.....	34
Figura 30- Efeito da velocidade de entrada sobre a) Fluxo de calor por convecção e condução através da fronteira inferior e b) Fluxo de massa por convecção e difusão através da fronteira inferior.....	35
Figura 31- a) Calor removido ao longo de toda a fronteira inferior, b) Massa removida ao longo de toda a fronteira inferior.....	35
Figura 32 – Calor removido por condução/convecção e evaporação para várias velocidades de entrada.....	36
Figura 33- Distribuição da temperatura e concentração no domínio, para várias temperaturas de entrada; as representações não se encontram à escala 1:1.....	36
Figura 34- a) Fluxo de calor por convecção e condução através da fronteira inferior, b) Fluxo de massa por convecção e difusão através da fronteira inferior.....	37
Figura 35- Calor e massa removidos ao longo de toda a fronteira inferior em função da temperatura de entrada.....	37
Figura 36- Calor removida por condução/convecção e evaporação para várias temperaturas de entrada.....	37

Figura 37- Distribuições da temperatura e concentração no domínio, para diversos valores de humidade relativa; as representações não se encontram à escala 1:1	38
Figura 38- a) Fluxo de calor por convecção e condução através da fronteira inferior, b) Fluxo de massa por convecção e difusão através da fronteira inferior	39
Figura 39- Calor e massa removida ao longo de toda a fronteira inferior.....	39
Figura 40- Calor removido por condução/convecção e evaporação para vários valores de humidade relativa à entrada	39
Figura 41- Calor removido por convecção/condução e evaporação em função de parâmetros de entrada: a) velocidade, b) temperatura e c) humidade relativa à entrada.....	40
Figura 42 - Representação esquemática da Geometria 2.....	40
Figura 43- Volume de controlo numa determinada zona do têxtil [39]	41
Figura 44- Condutividade térmica da água em função da temperatura [28]	43
Figura 45- Evolução do teor em água no têxtil colocado num determinado ambiente até atingir equilíbrio [40]	44
Figura 46- Variação do teor em água no têxtil com a humidade relativa para diversos materiais [40]	44
Figura 47- Distribuição da humidade relativa ao longo do domínio; a geometria não se encontra à escala 1:1	46
Figura 48- Distribuição ao longo do subdomínio têxtil da condutividade do gás, condutividade da fibra e da condutividade térmica efectiva; as geometrias não se encontram à escala 1:1	46
Figura 49- Perfis em diversas secções verticais ($x^*=0,25;0,5$ e $0,75$; abcissa adimensional da geometria) no subdomínio do têxtil da a) condutividade do gás, b) condutividade da fibra e c) condutividade térmica efectiva do têxtil	47
Figura 50- Distribuição ao longo do subdomínio têxtil, da fracção de volume ocupado por água retida e fracção de volume ocupado pelo gás; as geometrias não se encontram à escala 1:1.....	48
Figura 51- Distribuição ao longo do subdomínio têxtil da massa volúmica efectiva e do calor específico a pressão constante; as geometrias não se encontram à escala 1:1	48
Figura 52- Distribuição da difusividade do vapor de água através do ar e através do têxtil; as geometrias não se encontram à escala 1:1	49

Figura 53- a) Fluxo de calor por condução através da fronteira inferior, b) Fluxo de massa por difusão através da fronteira inferior	50
Figura 54- Efeito da velocidade do escoamento de ar nas propriedades do domínio têxtil (meia): a) condutividade térmica efectiva e difusividade efectiva, b) massa volúmica efectiva e calor específico e c) fracção de volume ocupado por água retida e fracção de gás (a fracção de volume sólido é constante e igual a 0,336 (Tabela 8))	51
Figura 55- Calor e massa removidos ao longo de toda a fronteira inferior em função da velocidade de entrada.....	52
Figura 56- Calor removido por condução e evaporação para várias velocidades de entrada...	52
Figura 57- Efeito da temperatura do escoamento de ar nas propriedades do domínio têxtil (meia): a) condutividade térmica efectiva e difusividade efectiva, b) massa volúmica efectiva e calor específico e c) fracção de volume ocupado por água retida (a fracção de volume sólido é constante e igual a 0,336 (Tabela 8))	53
Figura 58- Calor e massa removida ao longo de toda a fronteira inferior em função da temperatura de entrada	54
Figura 59- Calor removido por condução e evaporação para várias temperaturas de entrada.	54
Figura 60- Efeito da humidade relativa do escoamento de ar nas propriedades do domínio têxtil (meia): a) condutividade térmica efectiva e difusividade efectiva, b) massa volúmica efectiva e calor específico e c) fracção de volume ocupado por água retida e fracção de gás (a fracção de volume sólido é constante e igual a 0,336 (Tabela 8))	55
Figura 61- Calor e massa removida ao longo de toda a fronteira inferior em função da humidade relativa à entrada	56
Figura 62- Calor removido por condução e evaporação para vários valores de humidade relativa.....	56
Figura 63- Efeito da fracção de volume sólido em vários parâmetros: a) condutividade térmica efectiva e difusividade efectiva, b) fracção de água retida e fracção de gás.....	57
Figura 64- Efeito da tortuosidade em vários parâmetros: a) condutividade térmica efectiva e difusividade efectiva, b) fracção de água retida e fracção de gás (a fracção de volume sólido é constante e igual a 0,336 (Tabela 8))	58
Figura 65- Calor e massa removidos ao longo de toda a fronteira inferior em função da: a) fracção de volume sólido, b) condutividade térmica da fibra seca, c) tortuosidade e d) massa volúmica da fibra seca.....	59

Figura 66- Calor removido por condução e evaporação em função da: a) fracção de volume sólido, b) condutividade térmica da fibra seca, c) tortuosidade e d) massa volúmica da fibra seca60

Figura 67- Variação da temperatura de diversos materiais ao longo do tempo, quando a humidade relativa é alterada de 0% para 100% [39] 61

Figura 68- Representação esquemática da Geometria 3.....62

Figura 69- Resistência aparente ao escoamento de Darcy em função da humidade relativa [41] 65

Figura 70- Distribuição da temperatura, concentração e pressão relativa no domínio; as representações dos vectores de velocidade e velocidade de Darcy não se encontram à escala.....68

Figura 71- Efeito da permeabilidade e da pressão relativa na fronteira 11 na a) velocidade média na fronteira 11 e b) Percentagem de caudal mássico que escoo através da fronteira 11 em relação ao caudal mássico na entrada (3); os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 1069

Figura 72- Velocidade média de Darcy em função da permeabilidade do meio poroso e da pressão relativa à saída do escoamento interno (11); os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 10 70

Figura 73- Efeito da permeabilidade e da pressão relativa à saída do escoamento interno (11), no gradiente de pressão existente entre a entrada (3) e a saída (11) do escoamento interno; os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 10..... 70

Figura 74- Efeito da permeabilidade do meio poroso e da pressão relativa na fronteira 11 na: a) Calor removido da fronteira 2 e b) Massa removida da fronteira 2; os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 10..... 71

Figura 75- Efeito da permeabilidade e da pressão relativa à saída do escoamento interno no calor removido por condução e evaporação da fronteira inferior (2); os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 10..... 71

Figura 76- Comparação das três geometrias estudadas em termos de calor e massa removidos, para diferentes valores de velocidade; os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 6 (Geometria 1), Tabela 7 (Geometria 2) e Tabela 10 (Geometria 3)..... 72

Figura 77- Comparação das três geometrias estudadas em termos de calor e massa removidos, para diferentes valores de temperatura; os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 6 (Geometria 1), Tabela 7 (Geometria 2) e Tabela 10 (Geometria 3); por uma questão de coerência, para a Geometria 3 a temperatura de entrada dos escoamentos interno e externo, é a mesma..... 73

Figura 78- Comparação das três geometrias estudadas em termos de calor e massa removidos, para diferentes valores de humidade relativa; os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 6 (Geometria 1), Tabela 7 (Geometria 2) e Tabela 10 (Geometria 3); por uma questão de coerência, para a Geometria 3 a humidade relativa de entrada dos escoamentos interno e externo, é a mesma	74
Figura 79- Perfis (índice 1) e valores médios (índice 2) na secção de saída de a) velocidade, b) temperatura e c) concentração de vapor de água	84
Figura 80- Perfis (índice 1) e valores médios (índice 2) na secção de saída de a) velocidade, b) temperatura e c) concentração de vapor de água	85
Figura 81- Perfis (índice 1) e valores médios (índice 2) na secção de saída de a) velocidade, b) temperatura e c) concentração de vapor de água	87
Figura 82- Perfis (índice 1) e valores médios (índice 2) na secção de média vertical ($x=0,05m$) de a) temperatura e b) concentração de vapor de água	88
Figura 83- Perfis (índice 1) e valores médios (índice 2) na fronteira 8 (ver Figura 68) de a) Temperatura e b) Concentração de vapor de água.....	89
Figura 84- Perfis na secção média vertical ($x=0,05m$) do calçado e do ambiente de a) Temperatura e b) Concentração de vapor de água.....	90
Figura 85- a) Perfil de velocidades na secção $x=0,05m$ do subdomínio relativo ao escoamento externo b) “Perfil de velocidades” de Darcy na secção $x=0,05m$ do subdomínio relativo ao meio poroso.....	90
Figura 86- Distribuição da humidade relativa ao longo do domínio.....	95
Figura 87- Distribuição ao longo do subdomínio poroso da condutividade da fibra e da condutividade térmica efectiva do têxtil.....	96
Figura 88- Distribuição ao longo do subdomínio poroso, da fracção de volume ocupado por água retida e fracção de volume ocupado pelo gás.....	97
Figura 89- Distribuição ao longo do subdomínio poroso da massa volúmica efectiva e do calor específico a pressão constante	98
Figura 90- Distribuição da difusividade efectiva do vapor de água através do têxtil no subdomínio poroso.....	98

Índice de Tabelas

Tabela 1- Condições iniciais do manequim e do ambiente [21]	14
Tabela 2- Condições de fronteira do modelo de simulação.....	19
Tabela 3- Calor e massa removidos através das fronteiras 2, 3, 4 e 5 respectiva forma de obtenção	20
Tabela 4- Algumas propriedades do ar [31] utilizadas nos cálculos	22
Tabela 5- Valores próprios para i até 3, para o cálculo do número de Sherwood local [36] ...	26
Tabela 6 - Condições de fronteira do modelo de simulação.....	32
Tabela 7- Condições de fronteira da Geometria 2.....	41
Tabela 8- Propriedades físicas de diversos materiais têxteis no estado seco [39].....	43
Tabela 9- Dimensões e fenómenos presentes em cada subdomínio.....	62
Tabela 10- Condições de fronteira da Geometria 3	63
Tabela 11- Resistência aparente ao escoamento de Darcy e permeabilidade para vários materiais em situações de humidade relativa extrema (0 e 100%; adaptado de Gibson [41]).....	66
Tabela 12- Condições de fronteira para os modelos de escoamento, transferência de calor, transferência de massa escoamento no meio poroso.....	67
Tabela 13- Número de elementos das grelhas e respectiva associação às figuras abaixo.....	83
Tabela 14- Número de elementos das grelhas e respectiva associação às figuras abaixo.....	85
Tabela 15- Número de elementos das grelhas e respectiva associação às figuras abaixo.....	86
Tabela 16- Número de elementos das grelhas e respectiva associação às figuras abaixo.....	89
Tabela 17- Tempos de computação, nº de elementos da malha e memória RAM utilizada para as várias geometrias estudadas.....	91
Tabela 18- Principais especificações técnicas do <i>hardware</i> utilizado	91

Notação e Glossário

A_c	Área do subdomínio	m^2
b	Meia distância entre duas placas paralelas	m
\bar{C}_v	Concentração média de vapor no subdomínio	mol/m^3
$C_{a,j}$	Concentração de ar seco na fronteira j	mol/m^3
$C_{v,j}$	Concentração de vapor na fronteira j	mol/m^3
Cp_a	Calor específico a pressão constante do ar	$J/(kg \cdot K)$
Cp_{ef}	Calor específico a pressão constante efectivo do têtil	$J/(kg \cdot K)$
Cp_v	Calor específico a pressão constante do vapor de água	$J/(kg \cdot K)$
Cp_w	Calor específico a pressão constante da água	$J/(kg \cdot K)$
D	Difusividade do vapor de água através do ar	m^2/s
D_{ef}	Difusividade efectiva do vapor de água através do têtil	m^2/s
D_h	Diâmetro hidráulico	m
\bar{h}_{des}	Coeficiente convectivo médio na zona termicamente desenvolvida	$W/(m^2 \cdot K)$
\bar{h}_{ent}	Coeficiente convectivo médio na zona de entrada térmica	$W/(m^2 \cdot K)$
k_a	Condutividade térmica do ar seco	$W/(m \cdot K)$
K_D	Permeabilidade	m^2
k_{ds}	Condutividade térmica da fibra seca	$W/(m \cdot K)$
k_{ef}	Condutividade térmica efectiva	$W/(m \cdot K)$
k_v	Condutividade térmica do vapor de água	$W/(m \cdot K)$
k_w	Condutividade térmica da água	$W/(m \cdot K)$
k_γ	Condutividade térmica da mistura gasosa (ar e vapor)	$W/(m \cdot K)$
k_σ	Condutividade térmica da fibra	$W/(m \cdot K)$
L_d	Comprimento de entrada dinâmica	m
L_t	Comprimento de entrada térmica	m
L_t^*	Comprimento de entrada térmica adimensional	(adimensional)
\bar{Nu}_{des}	Número de Nusselt médio para a zona termicamente desenvolvida	(adimensional)
\bar{Nu}_{ent}	Número de Nusselt médio para a zona de entrada térmica	(adimensional)
$n_{v,T}$	Taxa de transferência de vapor total	$mol/(m^2 \cdot s)$
$n_{v,j}$	Taxa de transferência de vapor através da fronteira j	$mol/(m^2 \cdot s)$

$P_{a,j}$	Pressão parcial de vapor na fronteira j	Pa
P_{atm}	Pressão atmosférica	Pa
Pr	Número de Prandtl	(adimensional)
P_{sat}	Pressão parcial de vapor saturado	Pa
$P_{sat,j}$	Pressão parcial de vapor saturado na fronteira j	Pa
P_v	Pressão parcial de vapor	Pa
$P_{v,j}$	Pressão parcial de vapor na fronteira j	Pa
q	Fluxo de calor	W/m ²
Q_c	Calor removido por convecção	W/m
q_c	Fluxo de calor por convecção	W/m ²
Q_{des}	Calor removido na zona termicamente desenvolvida	W/m
q_e	Fluxo de calor por evaporação	W/m ²
Q_{ent}	Calor removido na zona de entrada térmica	W/m
q_r	Fluxo de calor por radiação	W/m ²
R_a	Constante dos gases ideais do ar seco	J/(kg · K)
R_D	Resistência aparente ao escoamento de Darcy	m ⁻¹
$R_{e,t}$	Resistência evaporativa total	(Pa · m ²)/W
R_f	Massa de água retida no têxtil por massa de têxtil seco	(adimensional)
R_t	Resistência térmica	(m ² · K)/W
Sh	Número de Sherwood	(adimensional)
\bar{T}_{des}	Temperatura média na zona termicamente desenvolvida	°C
\bar{T}_{ent}	Temperatura média na zona de entrada térmica	°C
T_j	Temperatura na fronteira j	°C
T_o	Temperatura operativa	°C
T_{placa}	Temperatura da placa	°C
T_{sk}	Temperatura da pele	°C
u	Velocidade	m/s
\bar{u}	Velocidade média	m/s
v	Velocidade aparente de Darcy	m/s
x	Abcissa	m

x^*	Comprimento adimensional	(adimensional)
x_1	Abcissa	m
y	Ordenada	m

Letras gregas

ε_{bw}	Fracção de volume ocupado por água retida (<i>bounded water</i>)	(adimensional)
ε_{ds}	Fracção de volume ocupado pela fase sólida	(adimensional)
ε_γ	Fracção de volume ocupado por gás	(adimensional)
$\eta_i, F_i, \chi_i(1)$	Valores próprios	(adimensional)
ρ	Massa volúmica	kg/m ³
ρ_a	Massa volúmica do ar seco	kg/m ³
ρ_{ds}	Massa volúmica da fibra seca	kg/m ³
ρ_{ef}	Massa volúmica efectiva do têxtil	kg/m ³
ρ_v	Massa volúmica do vapor de água	kg/m ³
ρ_w	Massa volúmica da água	kg/m ³
φ	Humidade relativa	%
φ_j	Humidade relativa na fronteira j	%
$\chi_{v,j}$	Fracção de vapor na fronteira j	(adimensional)
Δx	Espessura	M
μ	Viscosidade dinâmica	Pa · s
\mathcal{R}	Constante dos gases ideais	J/(mol · K)
τ	Tortuosidade	(adimensional)

1 Introdução

1.1 Apresentação da empresa

A realização desta tese decorreu no CeNTI – Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes. Este instituto dedica-se à investigação, desenvolvimento e prototipagem de materiais. *“O objectivo do centro é apoiar as empresas e parceiros no desenvolvimento de materiais inteligentes, fibras avançadas, multi-nanorevestimentos e o desempenho real dos produtos para que cheguem rapidamente ao mercado, disponibilizando instalações e conhecimentos que raramente se encontram à disposição dentro de portas e diminuindo o risco de investimento de capital do cliente”* [1].

1.2 Enquadramento e Apresentação do Projecto

Quando o corpo humano se encontra em ambientes quentes, o seu sistema termoregulatório transfere calor do centro do corpo para a periferia, e inicia a libertação de suor. O aumento da temperatura corporal em conjunto com libertação de suor provoca desconforto térmico no pé (bem como noutras partes do corpo). Surge, portanto, a necessidade de proporcionar um maior conforto através de um mecanismo de remoção de calor e de massa a incorporar no calçado. Para o efeito, torna-se necessário construir um modelo numérico que permita estudar os vários fenómenos de transporte desde a superfície da pele do pé ao ambiente exterior.

1.3 Contributos do Trabalho

Este trabalho permitiu a previsão das propriedades dos têxteis com base nas características das fibras, do teor de humidade, da temperatura, ou ainda da velocidade do escoamento. O trabalho permitiu ainda a simulação dos principais fenómenos de transferência de calor e de massa em torno do pé.

1.4 Organização da tese

O presente documento é composto por seis capítulos. No Capítulo 0, referente à introdução, enquadra-se o trabalho desenvolvido durante o projecto. No Capítulo 2 é feita a descrição do problema em causa, acompanhado da estratégia de resolução e dos meios para o mesmo. O Capítulo 3 descreve várias soluções para promover o arrefecimento e/ou aquecimento. Numa segunda parte deste capítulo são discutidas as questões relacionadas com a termofisiologia relativa ao pé, tais como a quantidade de calor a remover, ou ainda a localização das zonas onde é mais relevante promover o arrefecimento. No Capítulo 4 é feita a comparação de resultados obtidos através da ferramenta computacional e os obtidos por

correlações/expressões reportadas na literatura. A apresentação dos resultados das simulações e respectiva análise/discussão é feita no Capítulo 5. Este capítulo apresenta os resultados para as três geometrias analisadas. As principais conclusões do trabalho realizado são apresentadas no Capítulo 6.

2 Descrição do Problema

Este projecto visa a implementação de um modelo numérico capaz de descrever de uma forma detalhada os principais fenómenos de transferência de calor, transferência de massa e escoamento em torno de um pé com calçado.

São construídas e analisadas três geometrias distintas (Figura 1), onde são comparados o calor e massa removidos do pé, com vista a identificar os domínios necessários a incorporar na simulação.

A primeira geometria (Geometria 1) contempla o espaço entre o pé e o calçado na ausência de meia, por onde circula ar húmido.

A segunda geometria (Geometria 2), análoga à Geometria 1, contempla a presença da meia e os fenómenos de transferência de calor e de massa a ela associados. Diversos tipos de meia afectam de diferentes formas a transferência de calor e de massa, daí que haja a necessidade de englobar uma gama alargada de tipos de meia para o dimensionamento de um futuro ventilador.

A Geometria 3, mais detalhada que as anteriores, contempla o subdomínio representativo do calçado (poroso) e o subdomínio representativo do ambiente em torno deste.

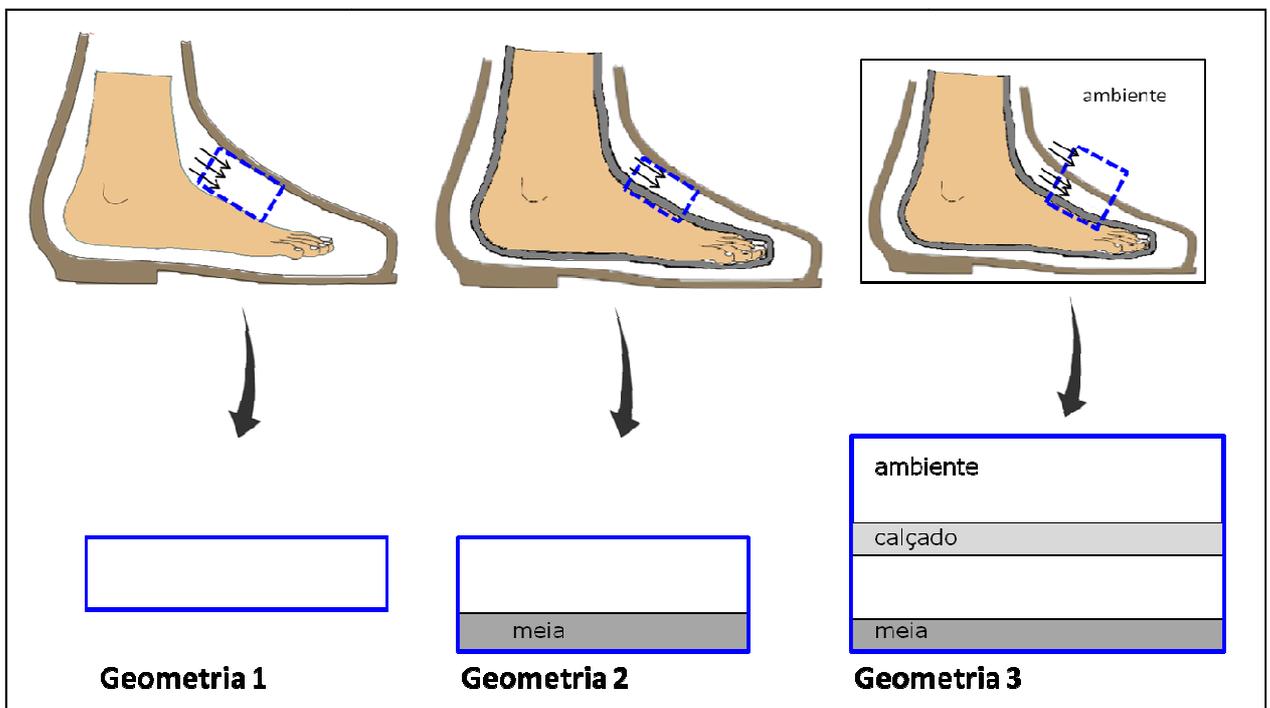


Figura 1- Geometrias consideradas no estudo numérico

3 Estado da Arte

Neste capítulo são apresentadas as principais soluções técnicas encontradas para promover o arrefecimento do pé, bem como a integração das mesmas em aplicações que não o calçado. É ainda feita uma breve descrição da termofisiologia relativa ao pé, bem como a influência da actividade física e das condições ambientais, na termoregulação do pé.

3.1 Soluções técnicas para promover o arrefecimento

Quando o corpo humano se encontra sujeito a estímulos nervosos, elevação da temperatura do ar e/ou a exercício físico, a temperatura do corpo tenderá a subir, pelo que haverá a necessidade de promover o arrefecimento. A redução da temperatura é conseguida através da vasodilatação, da redução da actividade metabólica e da sudorese¹, mecanismos que permitem a libertação de calor até à superfície da pele, sendo posteriormente removido por condução, convecção, radiação e evaporação. Num pé, devido ao próprio calçado, estes mecanismos de transferência de calor são fortemente penalizados, pelo que existe a necessidade de remover o calor aprisionado dentro do calçado de forma a evitar que se crie um ambiente propício à disseminação de fungos, bactérias, bolhas e pé de atleta [2]. De seguida são descritas algumas soluções já patenteadas que pretendem minimizar estes efeitos, podendo ser categorizadas em quatro tipos distintos:

- Arrefecimento termoeléctrico
- Ciclo a gás
- Ciclo frigorífico de compressão de vapor
- Arrefecimento forçado

3.1.1 Arrefecimento termoeléctrico

O arrefecimento termoeléctrico baseado no *efeito de Peltier* é constituído basicamente por uma junção quente que está ligada a uma superfície que permite a rejeição de calor para o meio ambiente; por uma junção fria que está ligada a uma placa metálica que está exposta à substância ou espaço a ser refrigerado; e por uma bateria que fornece corrente directamente ao circuito [3]. A patente US 5367788 [4] representada por via da Figura 2 utiliza o *efeito de Peltier*, onde o conjunto gerador- bateria (20) e o módulo de arrefecimento (30) constituem o sistema de arrefecimento termoeléctrico. A bateria recarrega-se autonomamente devido à força exercida ciclicamente pelo calcanhar. Este sapato é constituído por uma cobertura (40) permeável ao ar mas impermeável à água. O calor libertado pela junção quente é conduzido para o exterior através das saídas 13, enquanto o calor produzido pelo gerador é libertado através das saídas 151. O ar frio produzido pela junção fria passa através dos orifícios (61) até

¹ acto de produzir e libertar suor. Inicia-se quando a temperatura corporal central é superior a 37°C

chegar ao pé. O ar quente produzido pelo pé passa através da palmilha 60 e 50, através da cobertura 40, onde depois se dispersa pelas cavidades 12 conectando-se a outras cavidades através dos orifícios 111 e por fim através das saídas 13 e 151 [4].

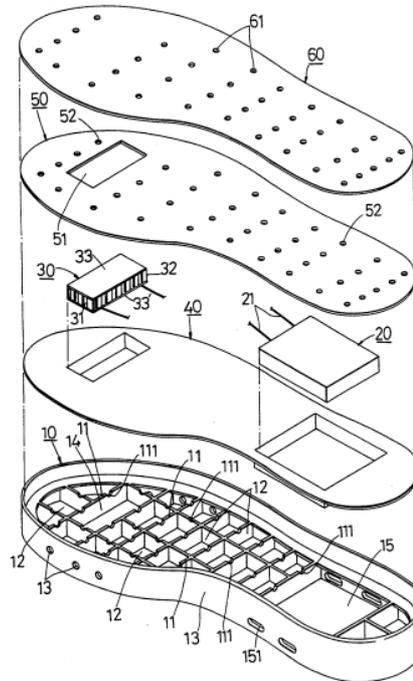


Figura 2- Vista explodida da sola relativa à patente US 5367788 [4]

Esta patente não descreve qualquer mecanismo para movimentação do ar, bem como também não descreve qualquer controlador o que leva a que o dispositivo funcione ininterruptamente enquanto existir energia ou até ser desligado pelo utilizador, pelo que poderá provocar desconforto devido à ausência de regulação da temperatura. Baseada no mesmo efeito, a patente PCT/PT2010/000002 ([5]; Figura 3) descreve que a energia necessária ao *efeito de Peltier* é obtida quando não existe a necessidade de aquecer ou arrefecer, utilizando o *efeito de Seebeck* através do diferencial de temperaturas existente no interior do calçado. Esta patente, ao contrário da anterior, já apresenta um controlador (6) que permite manter a temperatura do pé num intervalo compreendido entre os 25°C e os 35°C [5].

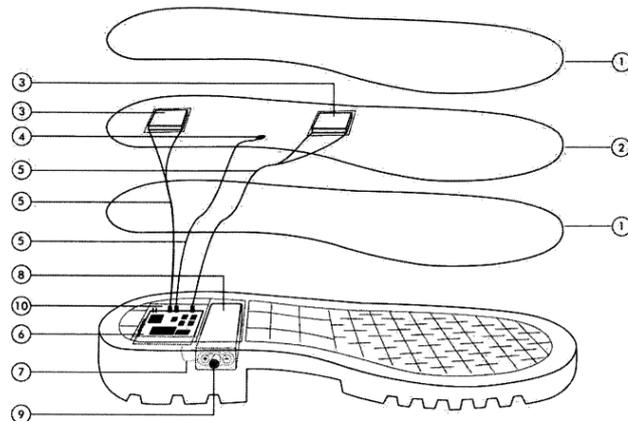


Figura 3- Vista explodida da sola relativa à patente PCT/PT2010/000002 [5]

Este mecanismo apresenta algumas vantagens devido à ausência de partes móveis, ausência de refrigerantes e facilidade de controlo de capacidade pela variação da voltagem. No entanto, apresenta como desvantagens o baixo COP^2 e o elevado custo [3]. A aplicação deste sistema em particular poderá conduzir a uma ineficiente circulação de ar, bem como à não homogeneidade do arrefecimento, uma vez que o sistema absorve apenas o calor libertado pela zona inferior do pé.

3.1.2 Ciclo a gás

Para além do arrefecimento termoelétrico, pode também ser utilizado um ciclo a gás, mais propriamente um *Ciclo de Joule-Brayton Inverso aberto* (Figura 4), sendo naturalmente o ar ambiente o fluido de trabalho. À medida que o utilizador comprime a bolsa de ar (5), e estando a válvula do tipo *on-off* (13) fechada, o ar circula através do permutador (10) onde liberta calor para o exterior e consequentemente a temperatura do ar baixa. De seguida, o ar passa pela válvula de laminagem (11) onde a pressão diminui e a temperatura baixa, podendo desta forma absorver o calor libertado pelo pé através do permutador 4, sendo o ar posteriormente rejeitado para o meio ambiente através da saída 8. Com a válvula *on-off* (13) aberta, o ar flui directamente para o permutador 4, o que faz com que o ar à saída da válvula *on-off* (13) esteja a uma temperatura superior à do meio ambiente. Deste modo, pode afirmar-se que este sistema apresenta dois níveis de temperatura através da actuação manual da válvula *on-off* (13) [6].

² COP (*Coefficient of Performance*): Representa o desempenho de um dado ciclo. No caso de uma máquina frigorífica é dado pelo quociente entre a potência frigorífica a remover do espaço a refrigerar e a potência requerida a operar a máquina

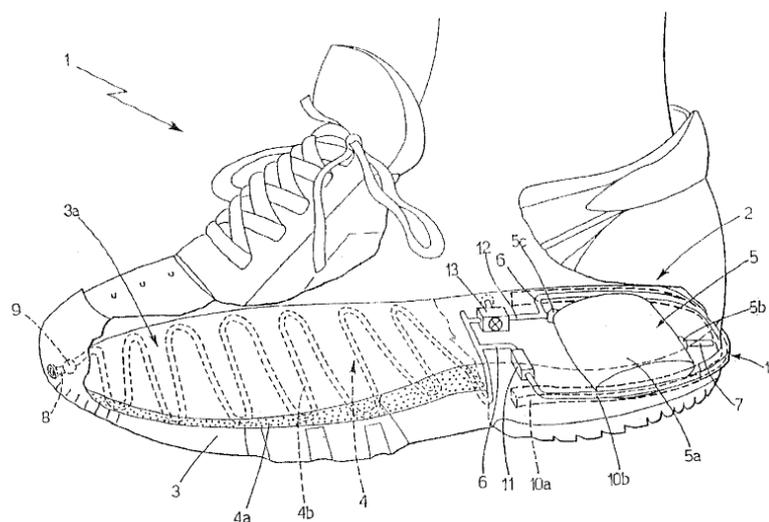


Figura 4- Incorporação de um ciclo a gás [6]

A utilização de uma bolsa de ar apresenta a vantagem de permitir absorver parte dos esforços transmitidos ao pé, para além de que apresenta uma boa performance, massa e tamanho reduzidos, custo aceitável e uso simples.

3.1.3 Ciclo frigorífico de compressão de vapor

A utilização de um ciclo frigorífico de compressão de vapor para promover o arrefecimento de calçado tem pouca expressão. Este sistema utiliza um compressor actuado electricamente, sendo a energia obtida pela locomoção. O fluido de trabalho poderá ser o Hexafluoropropano ou octo-fluoro tetrahidrofurano que, à pressão atmosférica, apresentam uma temperatura de ebulição entre 0 e -1°C. Associado a este sistema, encontra-se a patente [2] que, para além do mencionado acima, apresenta mecanismos para controlar o amortecimento e distribuição adequada da pressão às diferentes partes do pé, sendo isto alcançado através de complexos sistemas de controlo [2].

3.1.4 Ventilação forçada

A patente PCT/US2004/013129 [7] descreve um método para insuflar ar do meio ambiente para o interior do sapato (Figura 5), por meio de uma bolsa de ar deformável sendo depois o ar insuflado através de orifícios localizados ao longo da conduta principal (108) abaixo da palmilha, permitindo, segundo o inventor, a redução da temperatura e humidade para valores aceitáveis. Este sistema apresenta ainda a possibilidade de se colocar num

compartimento (120) um sólido ou líquido tais como perfume, fungicida ou agente antibacteriano, que será posteriormente transportado pelo ar para o interior do sapato [7].

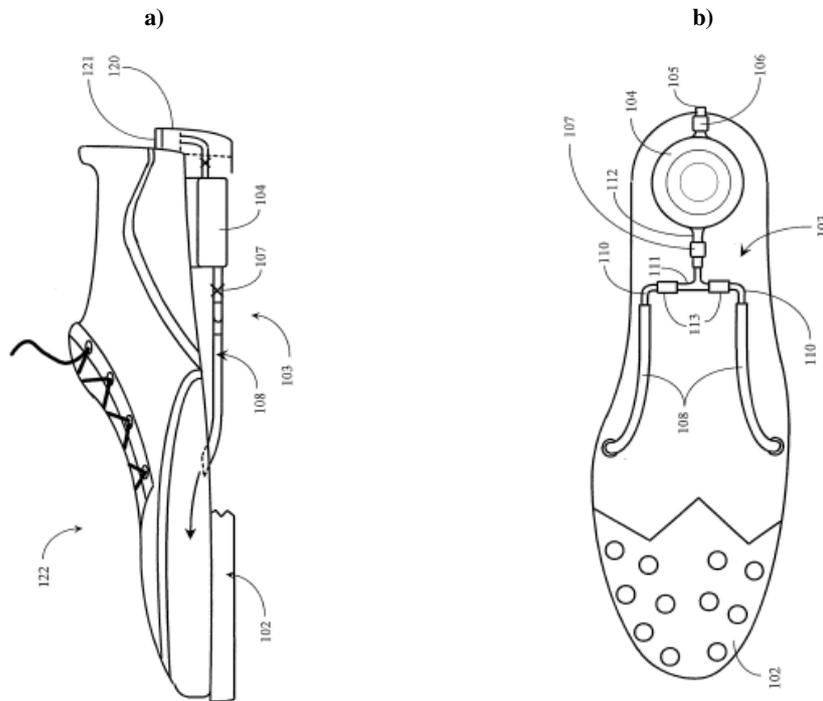


Figura 5- a) Vista de lado de um sapato com ventilação forçada [7] e b) Vista de baixo de um sapato com ventilação forçada [7]

No entanto, Bailey *et al.* [2] defendem que a utilização da bolsa de ar poderá provocar oscilações indesejáveis que reduzem o conforto durante o uso, para além de que a insuflação de ar à temperatura ambiente não proporciona um arrefecimento eficiente.

Existem muitas outras soluções que tiram partido da força realizada pelo pé sobre a superfície do solo para forçar a circulação de ar do exterior para o interior, tal como ilustrado pelas Figura 6.

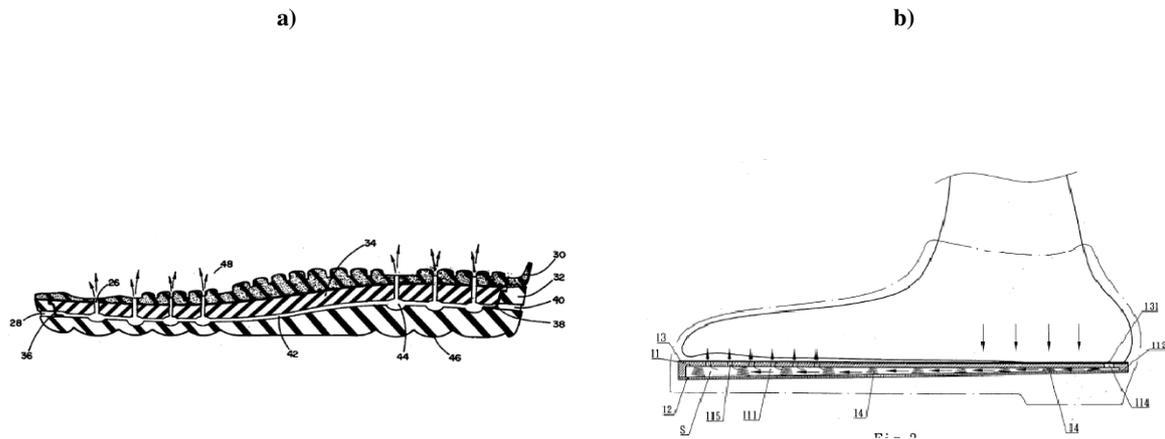


Figura 6- a) Vista de lado de uma solução patenteada com mecanismo de insuflação de ar [8] e b) Vista de lado de uma solução patenteada com mecanismo de insuflação de ar por meio de molas [9]

A solução referida na patente US 6041518 ([10]; Figura 7) faz uso de um ventilador de reduzidas dimensões e de uma resistência eléctrica, permitindo a dupla função de aquecimento ou arrefecimento. O ar é introduzido pelos orifícios 3 por meio do ventilador (7), onde posteriormente é distribuído pela base da sola e zonas laterais do pé, conseguindo deste modo baixar a temperatura e reduzir a humidade. Caso exista a necessidade de ceder calor ao pé, apenas se terá que actuar manualmente o interruptor 2 que actua a resistência eléctrica e, devido ao efeito de *Joule*, é produzido calor. O ventilador é actuado através do sensor de pressão 12, funcionando ininterruptamente até que seja desactivado o sensor de pressão ou a botoneira 1. Este sistema não apresenta qualquer mecanismo de geração de energia eléctrica necessária ao seu funcionamento, pelo que a bateria (10) terá que ser recarregada quando necessário.

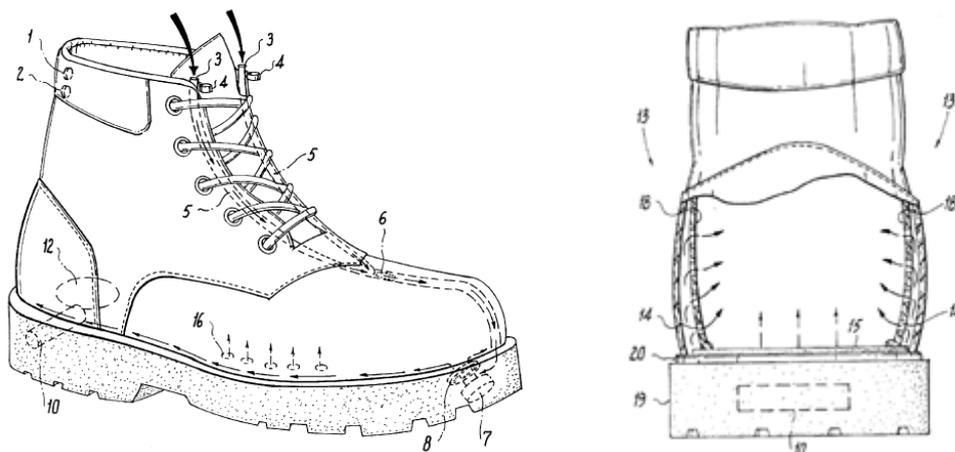


Figura 7- Bota com ventilação forçada [10]

A patente US 7017283 [11] mostra a utilização de um cilindro rígido contendo dióxido de carbono comprimido (Figura 8), como forma de provocar o arrefecimento. No entanto, esta

solução é pouca prática, visto que exige recarregamento frequente. Quando o gás é libertado ocupa uma câmara de ar que rodeia o pé e posteriormente absorve o calor libertado por este. Segundo esta mesma patente, uma outra possibilidade de promover o arrefecimento é a utilização de palmilhas que no seu interior contêm substâncias com elevada capacidade térmica que absorvem calor quando quebradas e agitadas, proporcionando um arrefecimento durante aproximadamente 12 horas. Após o término do efeito, estas palmilhas necessitam de ser refrigeradas para que a mudança de fase ocorra e possam ser reutilizadas.

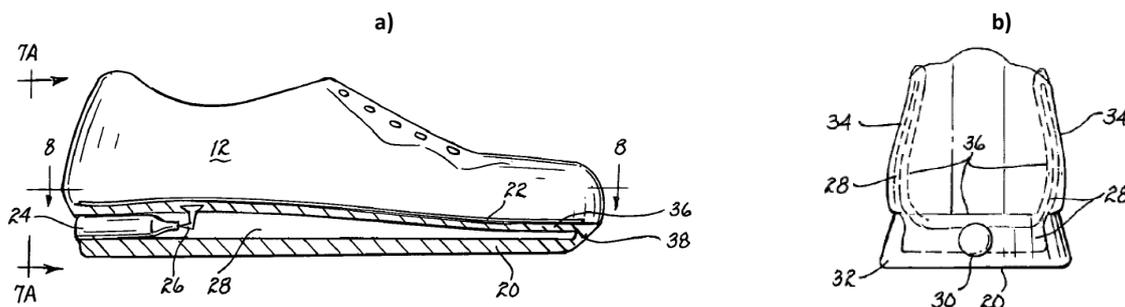


Figura 8- a) Vista de lado evidenciando o cilindro a gás [11] e b) Vista de trás evidenciando a câmara de ar [11]

Em 2009 surgiu uma nova patente (US 7497032; [12]), representada na Figura 9, do mesmo inventor da invenção prévia, em que o cilindro de gás e a câmara de ar que envolve pé são substituídos por um conjunto de condutas (10). Ao longo destas condutas existem pequenos orifícios (11) por onde o CO₂ flui para o interior do calçado até que a pressão no interior das condutas iguale a pressão no interior do calçado. Nesse momento, o conjunto de condutas, que funciona também como depósito, necessitará de ser recarregado com CO₂ de forma a prosseguir o arrefecimento do pé.

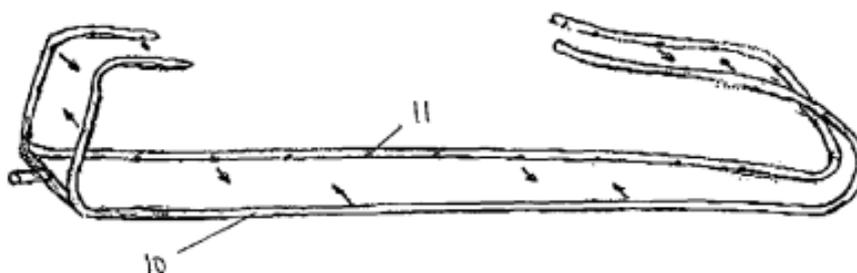


Figura 9- Estrutura tubular por onde é libertado o CO₂ [12]

Este sistema apresenta-se como pouco prático, visto que exige recarregamento frequente do circuito de condutas, para além de que não contempla um controlo efectivo da temperatura e de humidade.

3.2 Domínios de aplicação

Os métodos de arrefecimento utilizados no calçado podem ser facilmente transponíveis para as mais diversas aplicações. Exemplo disso é, a integração de ventiladores em casacos (Figura 10 e 10). Estes ventiladores forçam a circulação de ar entre o exterior e o interior do casaco, permitindo deste modo retirar o excesso de humidade e provocar um abaixamento da temperatura [13-14].



Figura 10- Colete com sacos de gelo amovíveis [13]



Figura 11- Colete contendo gelo no interior dos gomos e revestido externamente com alumínio [15]

Utilizando o princípio da mudança de fase das substâncias, a que lhe está associada uma transferência de calor, foram desenvolvidos os chamados “Materiais com Mudança de Fase” (*PCMs- Phase Change Materials*). Os materiais com mudança de fase foram primeiramente desenvolvidos para aplicação nos fatos e luvas espaciais, com o objectivo de proteger os astronautas do frio glacial ou do calor abrasador a que estão sujeitos durante as missões no espaço. Uma solução é comercializada pela *Outlast*[®], em que no próprio tecido se encontram impregnadas microcápsulas. Estas microcápsulas absorvem o excesso de calor corporal, armazenando-o na fibra, tecido ou espuma *Outlast*[®]. Quando a temperatura sofre por exemplo, uma descida, o tecido liberta o calor armazenado, procurando assim manter o equilíbrio térmico do corpo [16].

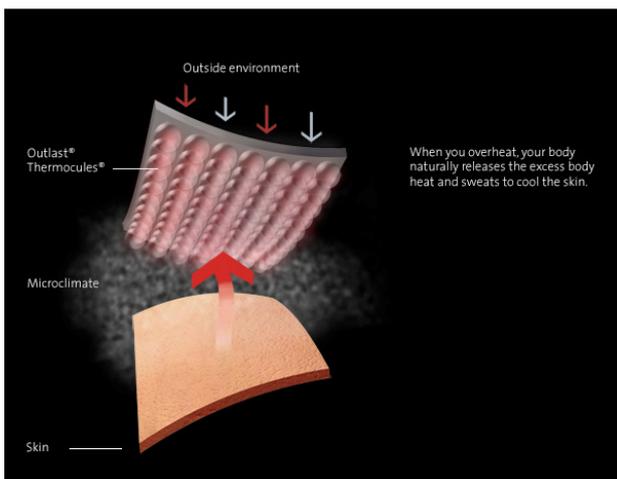


Figura 12- Representação esquemática da liberação de calor na pele [16]

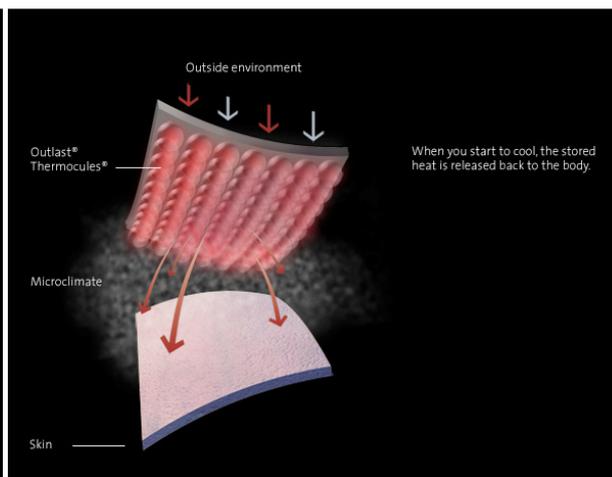


Figura 13- Representação esquemática da transferência de calor acumulado no tecido para a pele [16]

Para além da utilização de materiais com mudança de fase, uma outra forma de regular a temperatura corporal de um astronauta, passa pela utilização de um fato que cobre praticamente todo o corpo (*LCVG - Liquid Cooling and Ventilation Garment*; Figura 14 e Figura 15). Este fato é composto por tubagens de reduzido diâmetro impregnadas no próprio tecido. Nestas tubagens circula água a baixa temperatura que absorve o calor libertado pelo corpo. Posteriormente, o calor contido na água é cedido num permutador, sendo esta novamente recirculada.

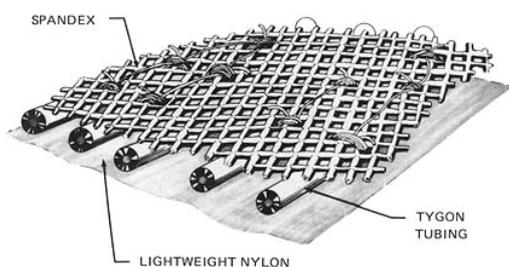


Figura 14- Representação esquemática da estrutura do fato [17]



Figura 15- Pessoa vestindo um fato de arrefecimento [18]

A tecnologia *Stomatex*[®] (Figura 16 e Figura 17) replica a forma como as plantas transpiram. O tecido *Stomatex*[®] utiliza um padrão de câmaras de vapor em forma de cúpula, cada uma com poros minúsculos no centro. O excesso de calor libertado pelo corpo é armazenado nas câmaras de vapor. Quando na presença de actividade física, o vapor contido nas câmaras de vapor é expulso para o exterior através dos minúsculos poros, uma vez que o próprio movimento do corpo provoca a deformação das câmaras de vapor e, conseqüente expulsão de vapor [19].



Figura 16- Representação esquemática da transferência de calor entre a pele e o meio ambiente [20]

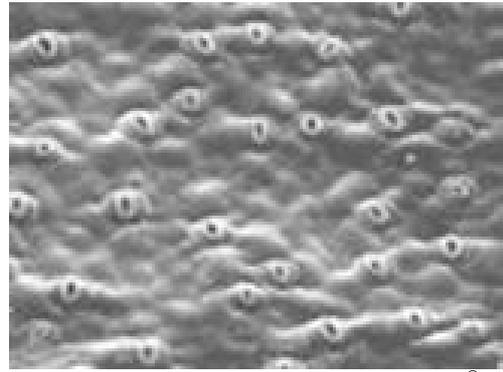


Figura 17- Fotomicrografia do tecido Stomatex® [20]

3.3 Termofisiologia

3.3.1 Quantidade de calor a remover

Para se proceder ao arrefecimento de um pé é necessário saber qual a quantidade de calor a remover de modo a proporcionar conforto ao utilizador. Devido à complexidade da termoregulação do corpo humano, a quantidade de calor a seguir calculada representa apenas uma estimativa. Essa quantidade de calor resultará da diferença entre o calor libertado pelo corpo numa situação de repouso, em condições de temperatura e humidade ditas confortáveis, e uma situação com temperatura ambiente elevada.

Para as condições abaixo indicadas, Tanabe *et al.* [21] obtiveram com um manequim térmico, um fluxo de calor no pé de aproximadamente 70W/m^2 .

Tabela 1- Condições iniciais do manequim e do ambiente [21]

Temperatura operativa ³ (T_o)	24,7°C
Velocidade média do ar (\bar{u})	0,1 m/s
Actividade metabólica	1 MET ⁴ = 58 W/m ²
Resistência térmica total do calçado (R_t)	0,1147 (m ² · K)/W = 0,74 clo
Humidade relativa (φ)	50%

A partir destes dados, a temperatura da pele no pé pode ser estimada por

$$q = q_c + q_r = \frac{T_{sk} - T_o}{R_t} \Leftrightarrow T_{sk} = q \cdot R_t + T_o = 70 \cdot 0,1147 + 24,7 = 32,7^\circ\text{C}$$

³ temperatura uniforme de um ambiente negro imaginário no qual a pele poderia trocar a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no ambiente real não uniforme

⁴ calor libertado por um adulto em repouso por unidade de área

em que q_c é o fluxo de calor libertado por convecção, q_r o fluxo de calor libertado por radiação, q o fluxo de calor total e T_{sk} a temperatura da pele no pé.

Para uma temperatura operativa de 26°C e humidade relativa 50%, Atmaca *et al.* [22] obtiveram o valor de 33,3°C para a temperatura da pele e 0,16 para *skin wettedness* (w)⁵. Através destes valores é possível obter o fluxo de calor libertado por convecção, radiação e evaporação

$$q = q_c + q_r = \frac{T_{sk} - T_o}{R_t} = \frac{33,25 - 26}{0,204} = 35,5 \text{ W/m}^2$$

$$q_e = \frac{w \cdot (P_{sat} - P_v)}{R_{e,t}} = \frac{0,16 \cdot (5101 - 1680)}{26,3} = 20,8 \text{ W/m}^2$$

Daqui resulta que o fluxo de calor total libertado pela pele será

$$q_t = q_c + q_r + q_e = 35,5 + 20,8 = 56,4 \text{ W/m}^2$$

em que q_e é o fluxo de calor libertado por evaporação, P_{sat} a pressão de vapor à temperatura da pele, P_v a pressão parcial de vapor de água no ar ambiente, w o parâmetro *skin wettedness* e $R_{e,t}$ a resistência evaporativa total. Do fluxo total anterior, 37% corresponde a perdas de calor por evaporação. O elevado peso relativo das perdas de calor por evaporação para a presente temperatura operativa pode dever-se à elevada contribuição do parâmetro *skin wettedness* que, quando mal estimado, origina valores distantes da realidade. Comparando as perdas de calor totais com as obtidas por Tanabe *et al.* [21], constata-se que as perdas de calor reportadas por Atmaca *et al.* [22] são menores devido à elevada resistência térmica total, que é aproximadamente o dobro da utilizada em Tanabe *et al.* [21].

3.3.2 Relevância do efeito em função das condições exteriores e interiores

A necessidade de se promover arrefecimento forçado tem particular importância quando, por exemplo a humidade e/ou a temperatura no meio ambiente é elevada. O aumento da humidade relativa tem como consequência a diminuição do gradiente de pressão parcial do vapor de água entre a pele e o meio ambiente, que se traduz numa diminuição das perdas de calor por evaporação. Para uma temperatura ambiente inferior à temperatura da pele, um aumento da temperatura ambiente provoca uma redução das perdas de calor por convecção. Nesse cenário, o sistema termoregulatório reage aumentando a produção de suor. No caso de a temperatura ambiente ser superior à temperatura da pele, a transferência de calor dá-se no sentido oposto, e o corpo recebe calor, podendo ocorrer ainda condensação na superfície da pele. O aumento da velocidade do ar promove a transferência de calor por convecção. O

⁵ fracção de pele coberta por suor

calçado é outro factor que afecta a transferência de calor para o meio circundante, na medida em que constitui uma barreira à transferência de calor. Uma elevada actividade metabólica provoca necessariamente um aumento da temperatura corporal, e consequentemente a libertação de uma maior quantidade de calor pelo corpo.

3.3.3 Onde é mais relevante promover o arrefecimento?

Com o objectivo de determinar as zonas com maior libertação de suor no pé, Taylor *et al.* [23] estudaram a distribuição espacial da produção de suor em cinco pontos distintos do pé, representados na Figura 18. Os testes foram realizados com indivíduos sujeitos a actividade física e expostos a uma temperatura ambiente de 36°C e $\varphi = 60\%$, de modo a aumentar a produção de suor. Nestas condições, Taylor *et al.* [23] verificaram que 70% do suor libertado provinha da zona dorsal e lateral do pé, enquanto que a planta do pé contribuía apenas com 30%. Nestas condições, a produção média de suor em todo o pé foi de 30 ml/h, sendo que a produção de máxima atingiu os 50 ml/h.

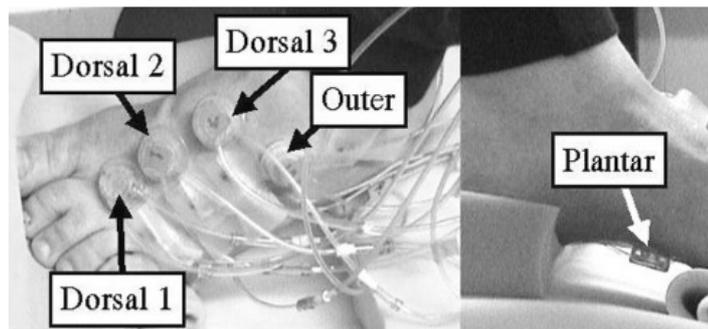


Figura 18- Localização das cápsulas usadas na medição do suor libertado pelo pé [23]

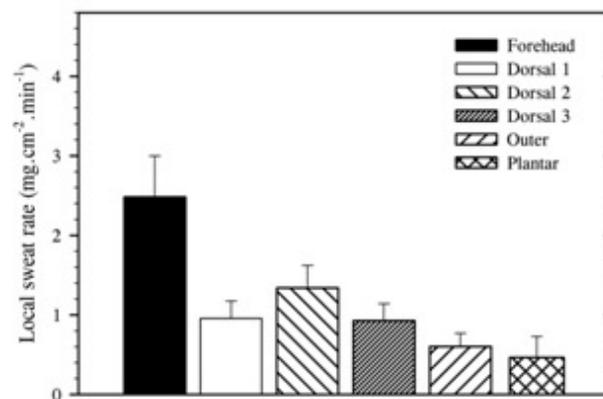


Figura 19- Taxa de libertação de suor média para as diversas localizações [23]

Vários estudos indicam a existência de uma maior densidade de glândulas sudoríparas na zona da planta do pé [23]. A zona da planta do pé dispõe em média de 460 glândulas/cm²,

enquanto que a zona superior apresenta em média 175 glândulas/cm², sendo que estes valores apresentam uma elevada variabilidade entre etnias [23]. Esta aparente incongruência entre a densidade de glândulas sudoríparas e a taxa de produção de suor é explicada pelas mudanças de pressão que ocorrem na planta do pé durante a locomoção, mudanças que dificultam a secreção de suor [23].

Diversos autores [24-25] consideram que a zona da planta do pé não participa nos mecanismos termoregulatórios, ou seja, que o aumento da temperatura corporal não implica um aumento da libertação de suor na planta do pé. Neste caso, é considerado que o suor libertado pelas zonas de pele glabra⁶ é devido, exclusivamente, a estímulos psicológicos [24-25].

Apesar de a zona superior do pé apresentar maior peso no calor libertado por evaporação, Grahn [26] afirma que a promoção do arrefecimento por condução nas zonas de pele glabra é bastante eficiente. Este argumento apoia-se no facto de existir uma elevada densidade de estruturas vasculares subcutâneas que propiciam uma maior área de transferência de calor.

Relativamente à distribuição de temperatura na zona da planta do pé durante a actividade física, Rebay *et al.* [27] verificaram, através da medição da temperatura em três pontos distintos (Figura 20), que, durante a actividade física a baixa velocidade, a zona 1 é a zona mais quente, enquanto que, a elevada velocidade, a zona 3 apresenta a temperatura mais alta. A alteração da localização da temperatura mais elevada está associada à própria inclinação do utilizador durante a actividade física. A inclinação, ao alterar o centro de gravidade em relação ao pé, resulta numa maior pressão exercida pela zona 3 e, consequentemente, no aumento da temperatura.

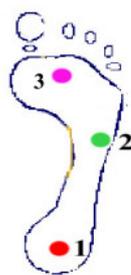


Figura 20- Localização dos termopares para medição da temperatura durante os dois regimes de velocidade [27]

As soluções técnicas encontradas para promover o arrefecimento apresentam vantagens e desvantagens tal como referido ao longo deste capítulo. No entanto, foi considerada como solução com maior potencial de arrefecimento, a implementação de um ventilador de reduzidas dimensões, sendo para isso necessário avaliar a adequabilidade da solução em causa. A análise da termofisiologia relativa ao pé permite conhecer as zonas de maior libertação de suor e as zonas de temperatura mais elevada, fornecendo assim informação necessária para a remoção de calor de uma forma mais eficiente.

⁶ Pele desprovida de pêlos, tais como a pele da planta dos pés, palma das mãos, face e ouvidos

4 Validação analítica de resultados

O presente capítulo tem como objectivo reportar a comparação entre os resultados obtidos com o *software Comsol* e os obtidos através de correlações/expressões existentes na literatura. Para tal, considera-se a geometria constituída por duas placas planas paralelas entre si, por onde ocorre escoamento de ar (Figura 21). Existe também transferência de calor entre as fronteiras 2, 3, 4 e 5 e o ar, e transferência de massa (vapor de água) entre as fronteiras 4 e 5 e o ar. As placas apresentam as dimensões indicadas na Figura 21, sendo que o comprimento no plano perpendicular ao da figura é considerado infinito. As condições de fronteira do modelo de simulação encontram-se representadas na Tabela 2.



Figura 21- Representação esquemática da geometria, das fronteiras e sistema de eixos

Tabela 2- Condições de fronteira do modelo de simulação

Modelo	Fronteira				
		1	2 e 3	4 e 5	6
Escoamento	Tipo de fronteira	Entrada	Parede	Parede	Saída
	Condição de fronteira	Velocidade	Não escorregamento	Não escorregamento	Pressão
	Velocidade	1	-	-	-
	Pressão relativa	-	-	-	0 Pa
Transferência de calor	Condição de fronteira	Temperatura	Temperatura	Temperatura	Fluxo convectivo
	Temperatura	25°C	35°C	35°C	-
Transferência de massa	Condição de fronteira	Isolamento	Isolamento	Concentração	Fluxo convectivo
	Concentração	-	-	2,194 mol/m ³	-

Como no *Comsol* não é possível introduzir directamente o parâmetro “humidade relativa”, torna-se necessário expressar esse mesmo parâmetro na base molar

$$C_{v,j} = \frac{P_{v,j}}{\mathcal{R} \cdot T_j} \quad (1)$$

em que os sufixos *v* e *j* se referem ao vapor e ao número da fronteira, respectivamente, *C* é a concentração na base molar (mol/m³), *P* é a pressão (Pa), *R* é a constante dos gases ideais [J/(mol · K)], *T* é a temperatura da mistura (K). A pressão parcial de vapor (*P_{v,j}*) pode ser obtida através da seguinte relação

$$\phi_j = \frac{P_{v,j}}{P_{sat,j}} \quad (2)$$

em que ϕ_j representa a humidade relativa e $P_{sat,j}$ a pressão parcial de vapor saturado à temperatura da mistura, obtida através de tabelas termodinâmicas [28]. Consequentemente, a concentração molar nas fronteiras 4 e 5 será:

$$C_{v,4} = C_{v,5} = \frac{P_{v,4}}{\mathcal{R} \cdot T_4} = \frac{\phi_4 \cdot P_{sat,4}}{\mathcal{R} \cdot T_4} = \frac{1 \cdot 5622,15}{8,314 \cdot (35 + 273,15)} = 2,194 \text{ mol/m}^3$$

Determinada a concentração de vapor nas fronteiras 4 e 5, é necessário escolher o modelo mais adequado para descrever a transferência de massa. Para isso é necessário conhecer a fracção molar de vapor ($\chi_{v,j}$) presente no domínio. De forma genérica, a fracção molar de vapor numa determinada fronteira é definida por:

$$\chi_{v,j} = \frac{C_{v,j}}{C_{v,j} + C_{a,j}} \quad (3)$$

em que $C_{a,j}$ representa a concentração de ar seco na fronteira j . A fracção molar máxima de vapor no domínio ocorre junto das placas, pelo que virá

$$C_{v,4} + C_{a,4} = \frac{P_{a,4} + P_{v,4}}{\mathcal{R} \cdot T_4} = \frac{101325}{8,314 \cdot (35 + 273,15)} = 39,549 \text{ mol/m}^3$$

$$\chi_{v,4} = \chi_{v,5} = \frac{C_{v,4}}{C_{v,4} + C_{a,4}} = \frac{2,194}{39,549} = 0,05559 \cong 5,6\%$$

A fracção molar máxima de vapor presente no domínio é cerca de 5,6% e ocorre junto das placas. Comsol [29] refere que, para fracções molares de soluto (neste caso o vapor de água) inferiores a 10%, é razoável admitir as propriedades do fluido como sendo as do ar seco (solvente). Assim, a transferência de massa pode ser descrita pela *lei de Fick*. Caso as fracções molares de vapor fossem superiores a 10%, o vapor de água começaria a influenciar de forma mais significativa as propriedades do fluido, pelo que ter-se-ia que utilizar a formulação de *Maxwell-Stefan*, segundo a qual as propriedades do fluido são consideradas dependentes do vapor presente no fluido [29].

Com as condições de fronteira dadas pela Tabela 2 e seleccionada a malha adequada para resolver o problema em estudo, que se apresenta no Anexo A.1, obtiveram-se os seguintes valores de calor e massa removidos através das fronteiras 2, 3, 4 e 5.

Tabela 3- Calor e massa removidos através das fronteiras 2, 3, 4 e 5 respectiva forma de obtenção

		Forma de obtenção Comsol		
		Postprocessing	Expression	Boundary
Calor Removido	52,12 W/m	Boundary Integration	ncflux_htgh	2, 3, 4 e 5
Massa removida	0,0441 mol/(m ² · s)	Boundary Integration	ndflux_c_chcd/0.2[m]	4,5

As distribuições da velocidade, temperatura e concentração, obtidas para as condições descritas na Tabela 2, encontram-se representadas na Figura 22.

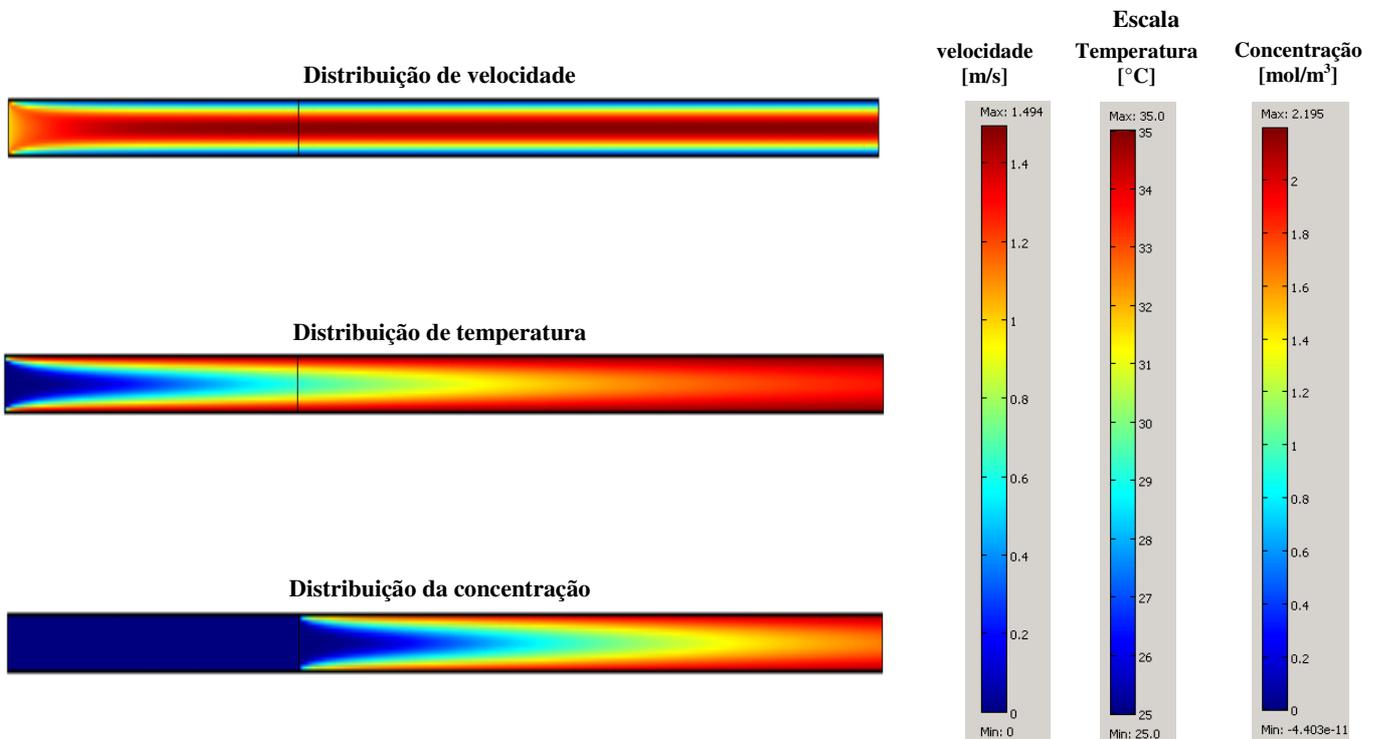


Figura 22- Distribuição da velocidade, temperatura e concentração no domínio

O comprimento de entrada dinâmica é definido como o valor de x para o qual a velocidade atinge 99% da velocidade presente em regime desenvolvido. De notar que esta velocidade é medida no plano médio das duas placas, ou seja para y igual a 0,0025m. Na simulação numérica efectuada, o comprimento de entrada dinâmica tem o valor 0,068 m.

4.1 Escoamento

O perfil de velocidades para o escoamento desenvolvido de um fluido Newtoniano entre duas placas planas paralelas é dado pela seguinte equação [30]:

$$\frac{u}{\bar{u}} = \frac{3}{2} \left[1 - \left(\frac{y-b}{b} \right)^2 \right] \quad (4)$$

em que b representa a meia distância entre as duas placas, \bar{u} a velocidade média do escoamento, e u a velocidade local do escoamento. Assim, se se comparar o perfil de velocidades obtido através do *Comsol*, com o obtido através da equação acima referida, verifica-se que os perfis são praticamente coincidentes (Figura 23). A velocidade máxima obtida pelo *Comsol* é de 1,49 m/s enquanto que, segundo a equação acima referida, a velocidade máxima é 1,50 m/s.

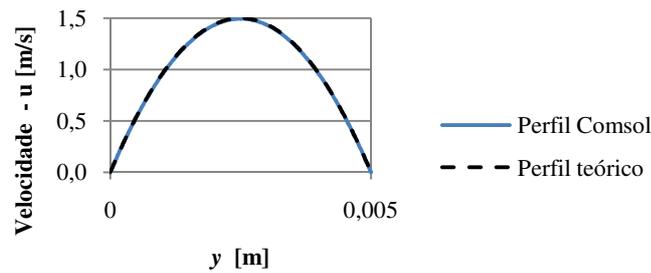


Figura 23- Perfis de velocidades, numérico e teórico, obtidos na secção de saída

4.2 Transferência de calor

Assumindo que a temperatura de entrada do ar pode variar entre 25°C e 35°C, consideraram-se as propriedades do ar à temperatura média de 30°C (Tabela 4).

Tabela 4- Algumas propriedades do ar [31] utilizadas nos cálculos

Parâmetro	Valor
Constante do ar seco (R_a)	286,9 [J/(kg · K)]
Viscosidade dinâmica (μ)	$18,61 \times 10^{-6}$ [Pa · s]
Condutividade Térmica (k_a)	0,02655 [W/(m · K)]
Número de Prandtl (Pr)	0,707

Com estes dados e assumindo que o ar se comporta como gás ideal, tem-se que a massa volúmica do ar (ρ), à temperatura média de 30°C e à pressão atmosférica, pode ser obtida através de:

$$\rho = \frac{P_{atm}}{R_a \cdot T} \quad (5)$$

$$\rho = \frac{101325}{286,9 \cdot (30 + 273,15)} = 1,165 \text{ kg/m}^3$$

Como o escoamento do ar ocorre através de uma conduta não circular, é necessário calcular o diâmetro hidráulico (D_h) que, para placas paralelas, é definido por [31]:

$$D_h = 4 \cdot b \quad (6)$$

pelo que, para este caso, se obtém:

$$D_h = 4 \cdot b = 4 \cdot 0,0025 = 0,01 \text{ m}$$

Posto isto, é então possível determinar o regime de escoamento através da análise do número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{u} \cdot D_h}{\mu} \quad (7)$$

$$Re = \frac{1,165 \cdot 1 \cdot 0,01}{18,61 \times 10^{-6}} = 626$$

Como o regime turbulento para esta geometria ocorre para $Re \gtrsim 2300$ [31], podemos afirmar que se está perante regime laminar.

Considerando a geometria em questão, é necessário calcular o comprimento de entrada dinâmica e térmica, para posterior cálculo da quantidade de calor removida por convecção nas placas. O comprimento de entrada dinâmica (L_d) é dado pela seguinte expressão [32] cit. por [33]:

$$\frac{L_d}{D_h} = 0,011 \cdot Re + \frac{0,315}{1 + 0,0175 \cdot Re} \quad (8)$$

$$\frac{L_d}{D_h} = 0,011 \cdot Re + \frac{0,315}{1 + 0,0175 \cdot Re} \Leftrightarrow L_d = \left(0,011 \cdot 626 + \frac{0,315}{1 + 0,0175 \cdot 626}\right) \cdot 0,01 = 0,06912 \text{ m}$$

O comprimento de entrada dinâmico pode também ser calculado pela seguinte expressão [34] cit. por [35]:

$$\frac{L_d}{D_h} = 0,011 \cdot Re + 0,3125 \quad (9)$$

que resulta em $L_d = 0,07199$ m. Como já referido, na simulação numérica, o comprimento de entrada dinâmica tem o valor de 0,068m.

O comprimento de entrada térmica adimensional quando existe simultaneamente desenvolvimento da camada limite dinâmica (L_t^* ; 0,0064 [33]), é dado pela seguinte expressão:

$$L_t^* = \frac{L_t}{D_h \cdot Re \cdot Pr} \quad (10)$$

donde resulta que o comprimento de entrada térmica será:

$$L_t = 0,0064 \cdot 0,01 \cdot 626 \cdot 0,707 = 0,0283 \text{ m}$$

O número de Nusselt médio para a zona de entrada térmica (\overline{Nu}_{ent}), nas condições de temperatura igual e uniforme em ambas as placas, e para valores de Prandtl compreendidos entre 0,1 e 1000, pode ser obtido pela seguinte correlação [33]:

$$\overline{Nu}_{ent} = 7,55 + \frac{0,024 \cdot x^{*-1,14}}{1 + 0,0358 \cdot Pr^{0,17} \cdot x^{*-0,64}} \quad (11)$$

em que x^* representa o comprimento adimensional a partir do início da placa, dado pela expressão [33]

$$x^* = \frac{x}{D_h \cdot Re \cdot Pr} \quad (12)$$

Fazendo x igual ao comprimento de entrada térmica (0,0283 m), resulta x^* igual a 0,0064, pelo que o número de Nusselt médio para a zona de entrada térmica é

$$\overline{Nu}_{ent} = 7,55 + \frac{0,024 \cdot 0,0064^{-1,14}}{1 + 0,0358 \cdot 0,707^{0,17} \cdot 0,0064^{-0,64}} = 11,53$$

O número de Nusselt numérico (obtido pelo código de simulação) é 10,63. O coeficiente convectivo médio para cada uma das placas, na zona de entrada térmica, pode ser obtido por [33]:

$$\bar{h}_{ent} = \frac{\overline{Nu}_{ent} \cdot k_a}{D_h} \quad (13)$$

$$\bar{h}_{ent} = \frac{\overline{Nu}_{ent} \cdot k_a}{D_h} \Leftrightarrow \bar{h}_{ent} = \frac{11,53 \cdot 0,02655}{0,01} = 30,93 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

O calor removido em cada placa, na zona de entrada térmica, será dado pela seguinte expressão:

$$Q_{ent} = L_t \cdot \bar{h}_{ent} \cdot (T_{placa} - \bar{T}_{ent}) \quad (14)$$

em que \bar{T}_{ent} representa a temperatura média do escoamento na zona de entrada térmica. Para a obtenção do calor removido poder-se-ia utilizar a temperatura média do ar dada pela média aritmética entre a temperatura de entrada do ar e a temperatura da placa, que seria de 30°C. No entanto, para a verificação dos resultados numéricos será utilizada a temperatura média

obtida através do *Comsol*, como a média integrada para o domínio da zona de entrada térmica, ponderada em relação à velocidade [33]:

$$\bar{T}_{ent} = \frac{1}{A_{cent} \cdot \bar{u}} \cdot \int u \cdot T \cdot dA_{cent} \quad (15)$$

$$\bar{T}_{ent} = \frac{1}{(0,0283 \cdot 0,005) \cdot 0,995} \cdot 0,042272 = 25,32 \text{ °C}$$

$$Q_{ent} = L_t \cdot \bar{h}_{ent} \cdot (T_{placa} - \bar{T}_{ent}) = 0,0283 \cdot 30,93 \cdot (35 - 25,32) = 8,48 \text{ W/m}$$

Refira-se que a velocidade média considerada no cálculo da temperatura média é ligeiramente diferente de 1m/s já que, por motivos de coerência, foi considerada a velocidade média obtida através do código de simulação (0,995 m/s).

Na zona de escoamento termicamente desenvolvido ($x > 0,0283$ m) o número de Nusselt numérico é 7,567, enquanto que o número de Nusselt analítico é igual a 7,541. Este valor é válido para a zona de escoamento térmica e dinamicamente desenvolvido [33]. No entanto, para $x= 0,0283$ m a camada limite dinâmica ainda não se encontra totalmente desenvolvida. Apesar disto, irá ser considerado que o escoamento se encontra dinamicamente desenvolvido para $x=0,0283$ m.

Seguindo o mesmo raciocínio, o coeficiente convectivo médio, na zona termicamente desenvolvida, pode ser obtido por:

$$\bar{h}_{des} = \frac{\overline{Nu}_{des} \cdot k_a}{D_h} \quad (16)$$

em que \overline{Nu}_{des} representa o número de Nusselt médio na zona de escoamento termicamente desenvolvido. Por substituição obtém-se:

$$\bar{h}_{des} = \frac{\overline{Nu}_{des} \cdot k_a}{D_h} \Leftrightarrow \bar{h}_{des} = \frac{7,541 \cdot 0,02655}{0,01} = 20,02 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

O calor removido em cada placa, na zona termicamente desenvolvida será:

$$Q_{des} = (L - L_t) \cdot \bar{h}_{des} \cdot (T_{placa} - \bar{T}_{des}) \quad (17)$$

E a temperatura média do escoamento na zona termicamente desenvolvido é:

$$\bar{T}_{des} = \frac{1}{A_{c_{des}} \cdot \bar{u}} \cdot \int u \cdot T \cdot dA_{c_{des}} = \frac{1}{[(0,3 - 0,0283) \cdot 0,005] \cdot 0,995} \cdot 0,412004 = 31,78 \text{ } ^\circ\text{C}$$

pelo que

$$Q_{des} = (0,3 - 0,02833) \cdot 20,02 \cdot (35 - 31,78) = 17,49 \text{ W/m}$$

O calor total libertado por convecção pelas duas placas (Q_c) pode ser obtido por:

$$Q_c = 2 * Q_{ent} + 2 * Q_{des} = 2 * 7,08 + 2 * 17,49 = 49,14 \text{ W/m}$$

Por comparação com o valor obtido através do *Comsol* ($Q_c = 52,16 \text{ W/m}$) verifica-se que existe um desvio de cerca de 5%.

4.3 Transferência de massa

O cálculo da transferência de massa para a geometria em estudo segue um procedimento um pouco mais complexo que o seguido na análise anterior. O número de Sherwood local é calculado pela seguinte expressão [36]:

$$Sh = \frac{h_m \cdot 4 \cdot b}{D} = \left[\frac{17}{140} + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{i=\infty} F_i \cdot \chi_i(1) \cdot \exp \left(-\frac{8}{3} \cdot \frac{\eta_i^2 \cdot x_1 \cdot b}{4 \cdot \bar{u} \cdot b/D} \right) \right] \quad (18)$$

em que Sh representa o número de Sherwood local, h_m o coeficiente de transferência de massa local, b a meia distância entre as duas placas, D a difusividade do vapor de água no ar (m^2/s), F_i , $\chi_i(1)$ e η_j são valores próprios, x_1 a coordenada a partir do início camada de concentração (ver Figura 21) e \bar{u} a velocidade média do escoamento. De notar que esta expressão é válida apenas para o perfil de velocidades totalmente desenvolvido.

Os valores próprios $\chi_i(1)$, F_i e η_i da expressão acima indicada são dados pela Tabela 5.

Tabela 5- Valores próprios para i até 3, para o cálculo do número de Sherwood local [36]

i	η_i	F_i	$\chi_i(1)$
1	4,287224	0,175024	-1,2697
2	8,30372	-0,05173	1,4022
3	12,3114	0,02506	-1,4911

Para i superior a 3, os valores próprios podem ser estimados pelas seguintes equações [36]:

$$\eta_i = 4i + \frac{1}{3} \quad (19)$$

$$F_i = (-1)^{i+1} 2,4727 \cdot \eta_i^{-11/6} \quad (20)$$

$$\chi_i(1) = (-1)^i \cdot 0,97103 \cdot \eta_i^{1/6} \quad (21)$$

A Figura 24 mostra a evolução do número de Sherwood ao longo da placa inferior/superior, obtido através da Eq. (18), ao longo do eixo x_l e utilizando diversos conjuntos de valores limite de i .

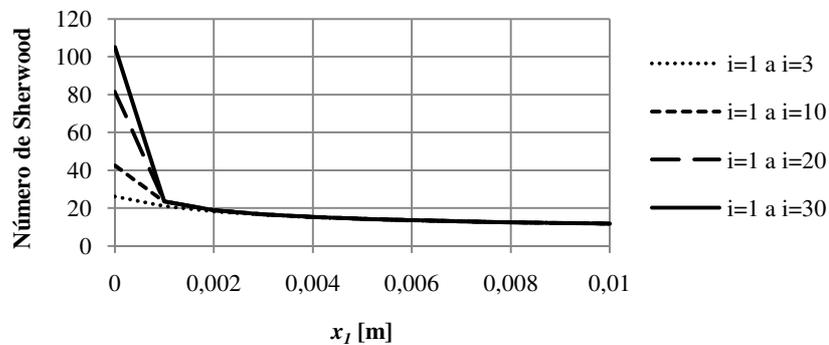


Figura 24- Número de Sherwood ao longo de x_l , para diferentes valores limite de i

Como os valores de Sherwood no intervalo $0,001\text{m} \leq x_1 \leq 0,2\text{m}$ são muitos semelhantes, e como para x_l próximos de zero o número de Sherwood tende para infinito, foram considerados apenas os valores de Sherwood no intervalo $0,001\text{m} \leq x_1 \leq 0,2\text{m}$ para a série $i = 1 \dots 30$ (Figura 25).

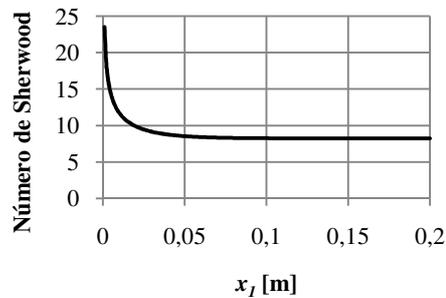


Figura 25- Número de Sherwood para $x_l > 0,001$ m e considerando $i = 1 \dots 30$

Tendo por base a curva da Figura 25, o número de Sherwood médio (\overline{Sh}) na zona da placa onde existe transferência de massa é 8,84. O número de Sherwood médio obtido pelo código de simulação é 8,54.

Com o número de Sherwood médio, é então possível determinar um coeficiente médio de transferência de massa (\overline{h}_m), pela seguinte relação [36]:

$$\overline{h}_m = \frac{\overline{Sh} \cdot D}{D_h} \quad (22)$$

$$\overline{h}_m = \frac{8,84 \cdot 0,26 \times 10^{-4}}{0,01} = 0,02298 \text{ m/s}$$

Consequentemente, a taxa de transferência de vapor pela placa será [36]:

$$n_{v,4} = n_{v,5} = \overline{h}_m \cdot (C_{v,4} - \overline{C}_v)$$

em que $n_{v,4}$ [mol/(m² · s)] representa a taxa de transferência de vapor através da fronteira 4 e \overline{C}_v (mol/m³) a concentração média de vapor no domínio onde ocorre transferência de massa. Este parâmetro pode ser obtido por:

$$\overline{C}_v = \frac{\int C_v \cdot u \cdot dA_c}{\overline{u} \cdot A_c} \quad (23)$$

$$\overline{C}_v = \frac{0,001177}{0,9958 \cdot (0,005 \cdot 0,2)} = 1,182 \text{ mol/m}^3$$

Com este valor, obtém-se então a taxa de transferência de vapor através da fronteira 4:

$$n_{v,4} = \overline{h}_m \cdot (C_{v,4} - \overline{C}_v) = 0,02298 \cdot (2,1945 - 1,182) = 0,0233 \text{ mol/(m}^2 \cdot \text{s)}$$

Logo, a taxa de transferência de vapor pelas duas placas será:

$$n_{v,T} = n_{v,4} + n_{v,5} = 0,0465 \text{ mol/(m}^2 \cdot \text{s)}$$

Comparando com o valor obtido pelo *Comsol* ($n_v = 0,0441 \text{ mol/(m}^2 \cdot \text{s)}$), verifica-se que existe um desvio de cerca de 5%.

Tendo em conta as pequenas diferenças obtidas entre os valores numéricos e os obtidos através de soluções teóricas e/ou empíricas, considera-se adequada a forma de implementação dos vários modelos utilizados.

5 Descrição Técnica e Discussão dos Resultados

No presente capítulo pretende-se fazer um estudo paramétrico de vários parâmetros de interesse, bem como analisar de uma forma progressiva a influência da inclusão de uma camada representativa de uma meia e posteriormente uma camada representativa de calçado.

5.1 Geometria 1

Com a Geometria 1 pretende-se simular a situação em que a pele não está coberta por uma meia mas em que existe um sapato, não incluído no domínio de simulação (ver Figura 1).

5.1.1 Descrição

A primeira geometria representada esquematicamente na Figura 26 é constituída por duas placas planas (fronteiras 2 e 3) paralelas entre si, por uma entrada de escoamento (1) e por uma saída de escoamento (4). Esta geometria tem um comprimento de 0,1m e uma distância entre as placas paralelas de 2mm, sendo o comprimento infinito na direcção perpendicular ao plano da figura. As condições de entrada do escoamento (1) em termos de temperatura e humidade relativa são as correspondentes à saída de um ventilador que, por sua vez, tem por base as condições presentes no ambiente, tipicamente 25°C e humidade relativa de 50%. A velocidade média de entrada foi considerada igual a 0,5 m/s, obtida através de uma estimativa inicial com um ventilador de capacidade “média”. Considerou-se um perfil de velocidades recto à entrada. Considerou-se ainda que junto à fronteira inferior (que estaria em contacto com a pele) existe vapor saturado à temperatura típica de 33°C [37]. Estas condições de fronteira encontram-se sintetizadas na Tabela 6.

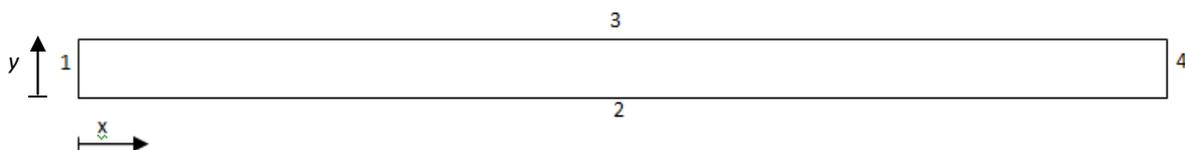


Figura 26 - Representação esquemática da Geometria 1

Tabela 6 - Condições de fronteira do modelo de simulação

Modelo	Fronteira				
		1	2	3	4
Escoamento	Tipo de fronteira	Entrada	Parede	Parede	Saída
	Condição de fronteira	Velocidade	Não escorregamento	Não escorregamento	Pressão
	Velocidade	0,5 m/s	0 m/s	0 m/s	-
	Pressão relativa	-	-	-	0 Pa
Transferência de calor	Condição de fronteira	Temperatura	Temperatura	Temperatura	Fluxo convectivo
	Temperatura	25°C	33°C	33°C	-
Transferência de massa	Condição de fronteira	Concentração	Concentração	Concentração	Fluxo convectivo
	Concentração	0,648 mol/m ³	1,976 mol/m ³	1,976 mol/m ³	-

A condutividade térmica, o calor específico a pressão constante e a viscosidade dinâmica do ar, parâmetros necessários à resolução do problema, dependem da temperatura e são descritos através de funções polinomiais contidas no *Comsol*. A massa volúmica do ar depende da temperatura e é obtida através da equação dos gases ideais também presente no *Comsol* (considerando a pressão atmosférica, 101325 Pa):

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (24)$$

A difusividade do vapor de água no ar (D), necessária à resolução da equação da transferência de massa, é obtida através da equação [38]:

$$D = \frac{926 \times 10^{-6}}{P} \cdot \frac{T^{2,5}}{T + 245} \quad (25)$$

em que P (Pa) é a pressão absoluta e T (K) a temperatura absoluta. Esta equação não se encontra na base de dados do *Comsol*, pelo que é adicionada em *Subdomain expressions*. Através da Eq. (25), traduzida graficamente pela Figura 27, verifica-se que a difusividade do vapor de água apresenta uma variação relativamente baixa, para uma gama de temperaturas compreendida entre 20 e 38°C.

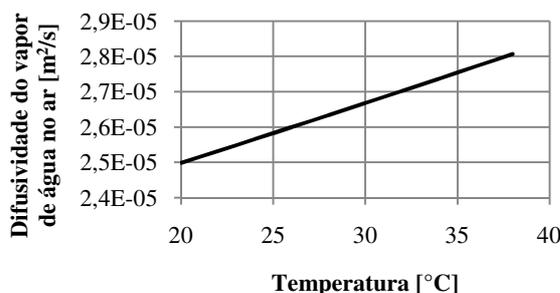


Figura 27- Difusividade do vapor de água no ar em função da temperatura do ar (à pressão atmosférica)

A malha seleccionada para resolver o problema em estudo, apresenta-se no Anexo A.2. O tempo de computação necessário é de 3 minutos (Anexo B).

5.1.2 Discussão de resultados e Testes paramétricos

Nas condições acima indicadas, e considerando difusividade do vapor de água através do ar variável com a temperatura (Eq. (25)), obteve-se $2,380 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ e $9,38 [W/m]$, para a massa e calor removido pela fronteira inferior, respectivamente. Estes valores resultam da integração, ao longo de toda a fronteira inferior, do calor e massa removidos. Caso se considerasse a difusividade do vapor de água constante, à temperatura média (aritmética) entre a 25°C e 33°C , a massa removida praticamente não se alteraria ($2,366 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$). Isto deve-se ao facto de a massa ser maioritariamente removida por convecção, daí que seja razoável assumir-se difusividade constante para meios em que ocorra escoamento. No entanto, como os tempos de computação para esta geometria são reduzidos (inferiores a 10 minutos), optou-se por considerar a difusividade do vapor de água variável com a temperatura ao longo do domínio.

Foram realizadas várias simulações paramétricas em que se mantiveram constantes as condições de fronteira (de acordo com o reportado na Tabela 6) e se consideraram várias velocidades, temperaturas e humidades relativas à entrada. As distribuições de temperatura e concentração ao longo do domínio, que resultaram do estudo paramétrico relativo à velocidade⁷, são apresentadas na Figura 28. De notar que todas as figuras relativas às distribuições de temperatura e concentração não se encontram à escala de 1:1. Como seria de esperar, o aumento da velocidade de entrada tem como consequência a diminuição da espessura da camada limite de temperatura e de concentração.

⁷ ficheiro *Comsol: Modelo 1 - Param - veloc*

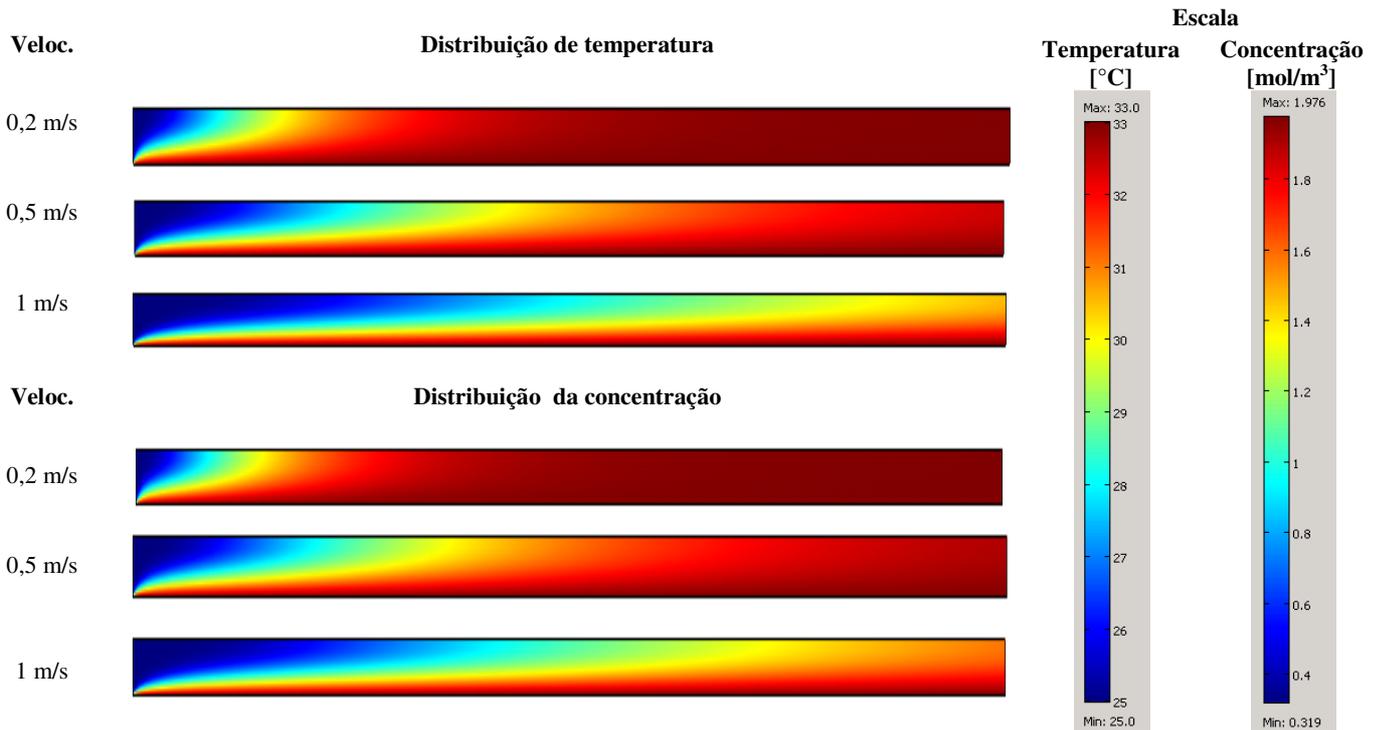


Figura 28- Distribuição da temperatura e concentração no domínio, para várias velocidades de entrada; as representações não se encontram à escala 1:1

Para a gama de velocidades considerada na Figura 28, os números de Reynolds tomam os valores 49, 124 e 250. Na Figura 29 encontram-se representados os perfis de temperatura e concentração em três secções verticais distintas. As secções consideradas foram 0,25, 0,5 e 0,75 (abscissa adimensional da geometria), sendo a velocidade de entrada do escoamento igual a 0,5 m/s.

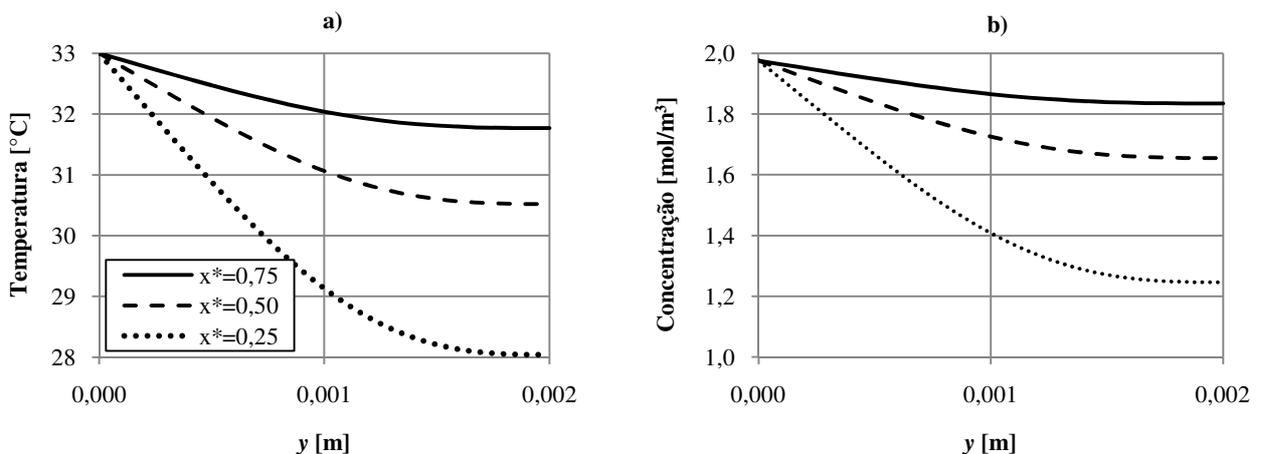


Figura 29- Perfis em diversas secções verticais ($x^*=0,25$, $0,5$ e $0,75$; abscissa adimensional da geometria) da a) temperatura e b) concentração; a velocidade de entrada do escoamento é igual a 0,5 m/s

A redução da espessura das camadas limite de temperatura e concentração, por via do aumento da velocidade, provoca o aumento dos fluxos ao longo da placa inferior (Figura 30).

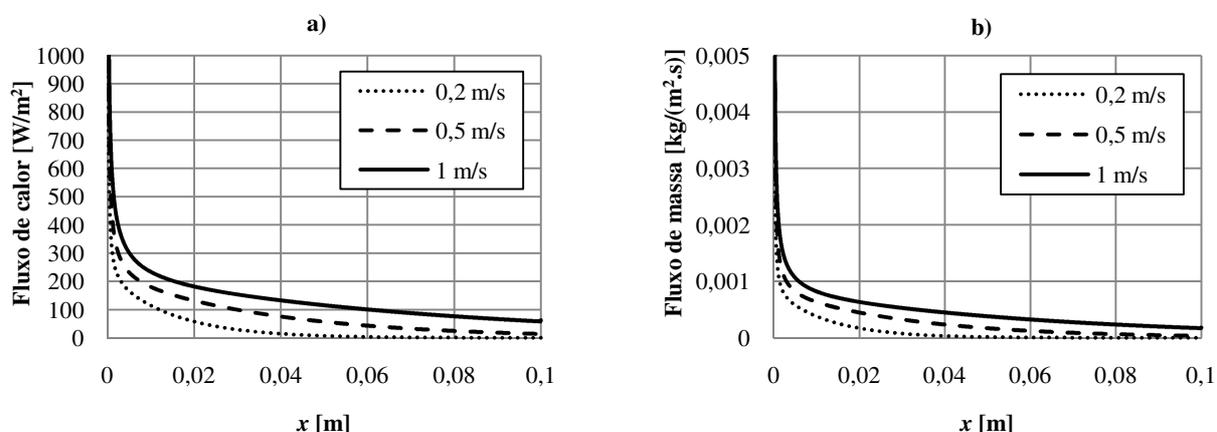


Figura 30- Efeito da velocidade de entrada sobre a) Fluxo de calor por convecção e condução através da fronteira inferior e b) Fluxo de massa por convecção e difusão através da fronteira inferior

Integrando os fluxos ao longo da placa inferior, por unidade de comprimento na perpendicular ao plano da Figura 26, obtém-se o calor e a massa removidos (Figura 31).

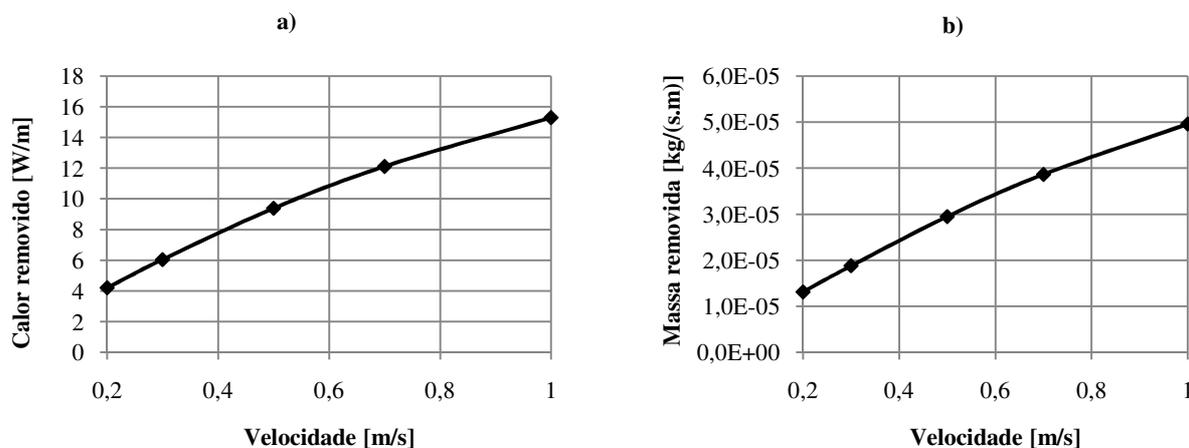


Figura 31- a) Calor removido ao longo de toda a fronteira inferior, b) Massa removida ao longo de toda a fronteira inferior

Expressando a massa removida em termos de calor removido por evaporação, multiplicando a massa removida pelo calor latente de vaporização a 33°C ($2422,901 \times 10^3$ J/kg; [28]), pode comparar-se os dois fenómenos (condução/convecção e evaporação) relativamente à remoção de calor (Figura 32). Verifica-se que é removida uma maior quantidade de calor através da evaporação do que através da condução/convecção. Para a gama de velocidades considerada na Figura 32, o peso relativo do calor removido por evaporação, varia entre 88 e 89% do calor total.

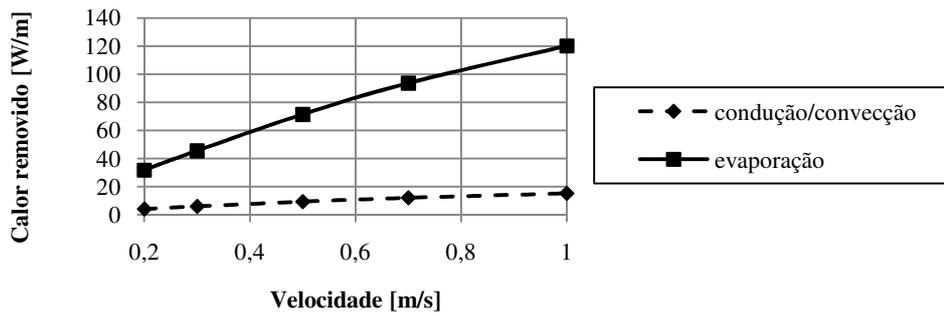


Figura 32 – Calor removido por condução/convecção e evaporação para várias velocidades de entrada

Para o caso da temperatura de entrada variável entre 20°C e 38°C, e mantendo todas as restantes condições de fronteira constantes (inclusive a concentração de vapor de água no ar à entrada, 0,648 mol/m³; isto equivale a admitir humidade relativa variável, devido à variação da pressão de saturação com a temperatura), obtiveram-se os resultados da Figura 33 para as distribuições de temperatura e concentração ao longo do domínio⁸.

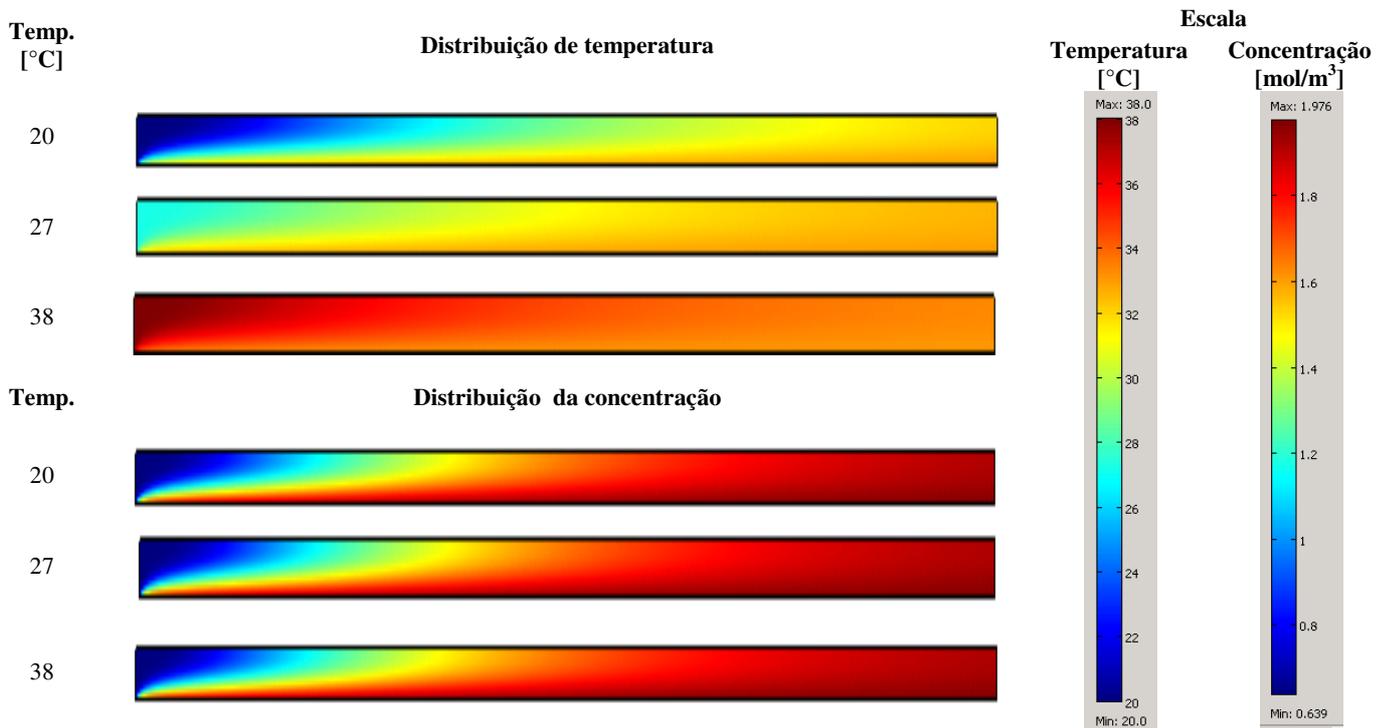


Figura 33- Distribuição da temperatura e concentração no domínio, para várias temperaturas de entrada; as representações não se encontram à escala 1:1

Obtiveram-se também os resultados dados pela Figura 34, para o fluxo de calor e de massa através da fronteira inferior.

⁸ ficheiro *Comsol: Modelo 1 – Param - temp*

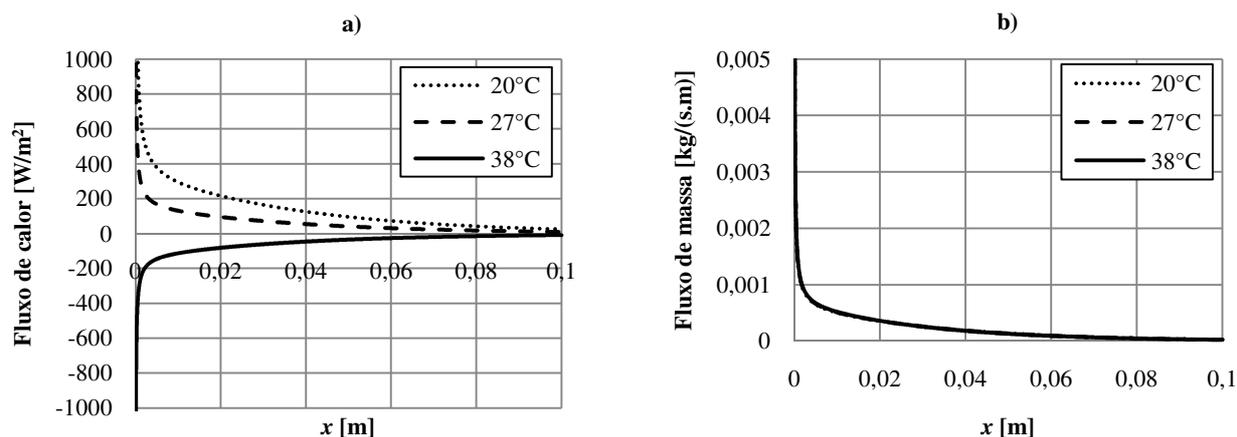


Figura 34- a) Fluxo de calor por convecção e condução através da fronteira inferior, b) Fluxo de massa por convecção e difusão através da fronteira inferior

Na Figura 35, encontram-se representados o calor e massa removidos ao longo de toda a fronteira inferior em função da temperatura de entrada.

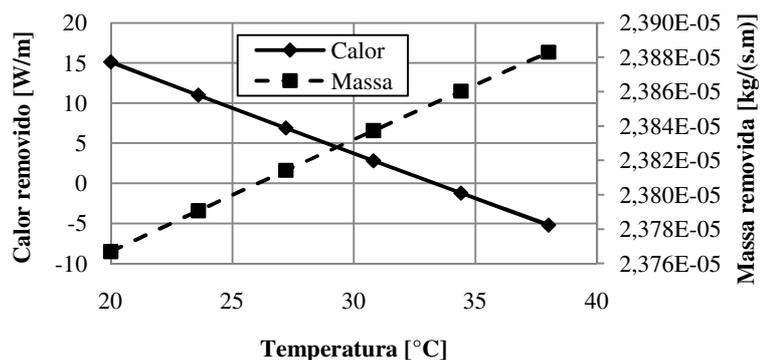


Figura 35- Calor e massa removidos ao longo de toda a fronteira inferior em função da temperatura de entrada

Através da Figura 36, verifica-se que, para a gama de temperaturas consideradas, a evaporação representa entre 79 e 100% do calor total removido.

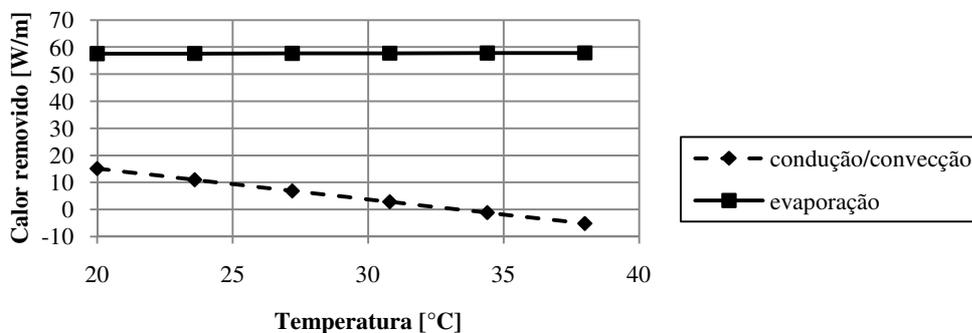


Figura 36- Calor removida por condução/convecção e evaporação para várias temperaturas de entrada

Como seria de esperar, o aumento da temperatura de entrada para além da temperatura da superfície inferior (33°C), traduz-se num ganho de calor em termos de condução/convecção, para a pele. A quantidade de calor removida por evaporação a 20°C , representa cerca de 80% de todo o calor removido, mas representa 100% quando a temperatura da superfície inferior é igual ou menor que a temperatura de entrada. Apesar das concentrações de vapor de água à entrada e junto à superfície inferior permanecerem constantes no intervalo de temperatura considerado, a massa removida sofre um ligeiro aumento (0,5%) devido ao aumento da difusividade do vapor de água com a temperatura (Figura 27).

Os resultados relativos ao estudo paramétrico da humidade relativa⁹, encontram-se representados nas Figuras 38-40.

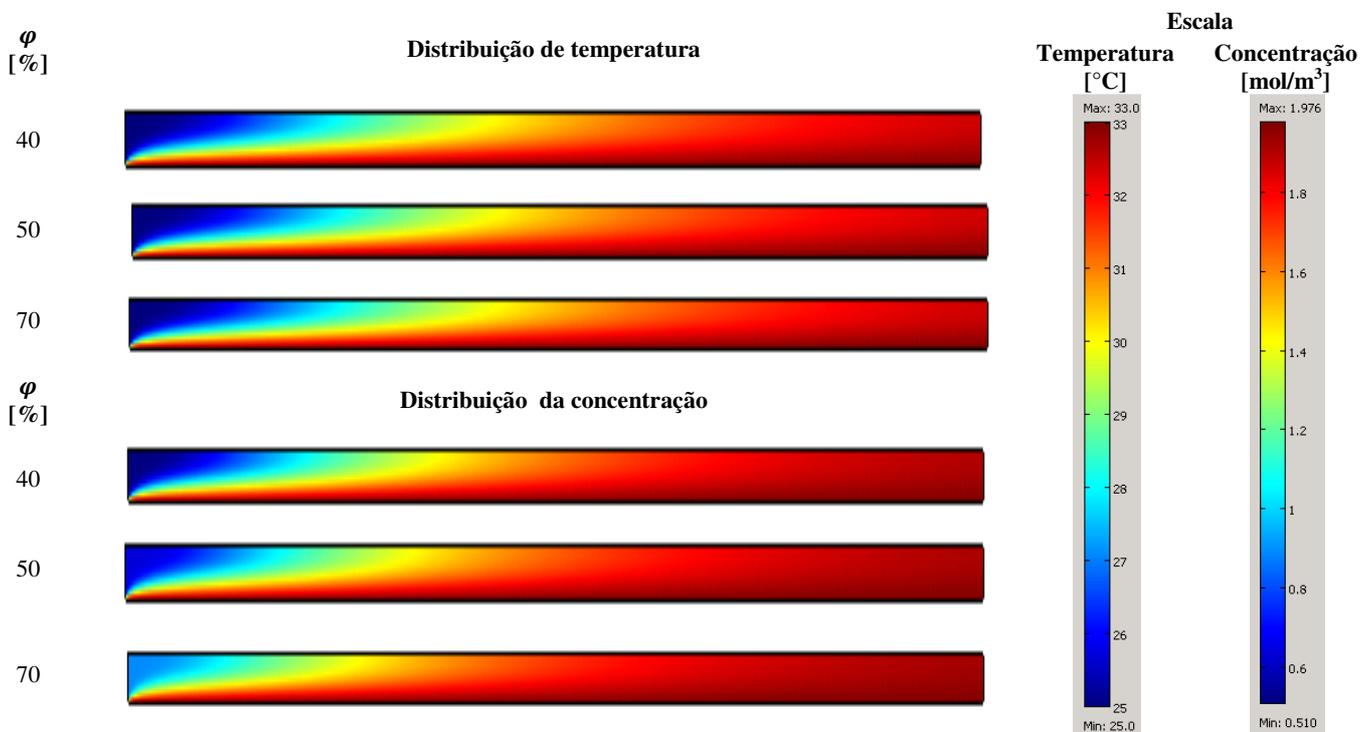


Figura 37- Distribuições da temperatura e concentração no domínio, para diversos valores de humidade relativa; as representações não se encontram à escala 1:1

A variação da humidade relativa à entrada influencia apenas a quantidade de massa removida (Figura 38 e Figura 39). O aumento da humidade relativa provoca um aumento da concentração de vapor de água à entrada e, conseqüentemente, reduz o gradiente de concentração entre a fronteira inferior e o restante domínio. À excepção da humidade relativa que é variável, os dados obtidos na Figura 38 e Figura 39 referem-se às condições de fronteira apresentadas na Tabela 6.

⁹ ficheiro *Comsol: Modelo 1 - Param - RH*

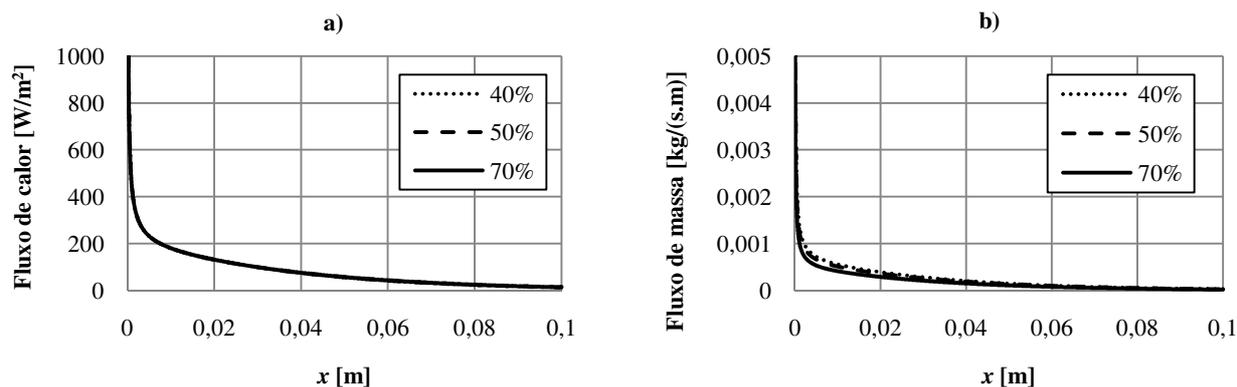


Figura 38- a) Fluxo de calor por convecção e condução através da fronteira inferior, b) Fluxo de massa por convecção e difusão através da fronteira inferior

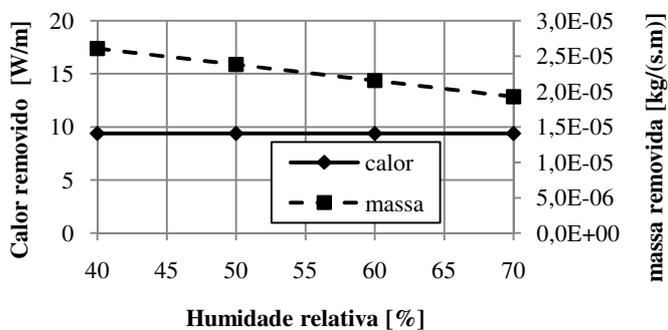


Figura 39- Calor e massa removida ao longo de toda a fronteira inferior

Através da Figura 40, verifica-se que, para a gama de humidade relativa considerada, a evaporação representa entre 83 e 87% do calor total removido.

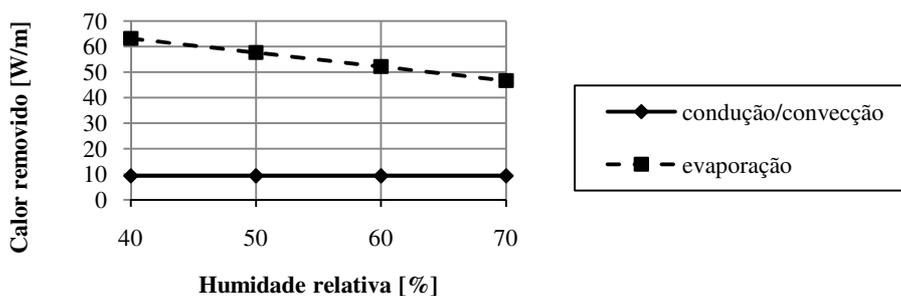


Figura 40- Calor removido por condução/convecção e evaporação para vários valores de humidade relativa à entrada

Na Figura 41 é representada, de forma sumária, a variação do calor removido total (condução/convecção e evaporação) em função da velocidade, temperatura e humidade relativa, na fronteira de entrada.

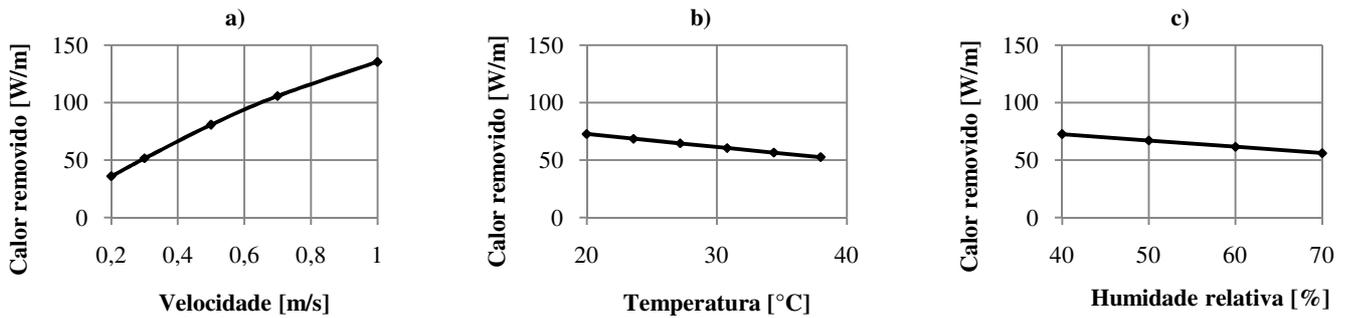


Figura 41- Calor removido por convecção/condução e evaporação em função de parâmetros de entrada: a) velocidade, b) temperatura e c) humidade relativa à entrada

Para cada gráfico da Figura 41, os resultados foram obtidos considerando condições típicas à entrada (temperatura 25°C, concentração 0,648 mol/m³ e velocidade 0,5 m/s) com excepção do parâmetro sob estudo (incrementado como mostrado nos gráficos). Com estes resultados, conclui-se que a velocidade do escoamento é o parâmetro que mais influencia a remoção de calor e de massa, principalmente por evaporação. A temperatura e a humidade relativa à entrada do escoamento afectam, em menor escala, a transferência de calor e de massa.

5.2 Geometria 2

5.2.1 Descrição e formas de implementação

Numa segunda geometria, pretende-se analisar a influência da inclusão de uma meia 100% algodão e 1mm de espessura, sobre a superfície da pele (Figura 1 e Figura 42).

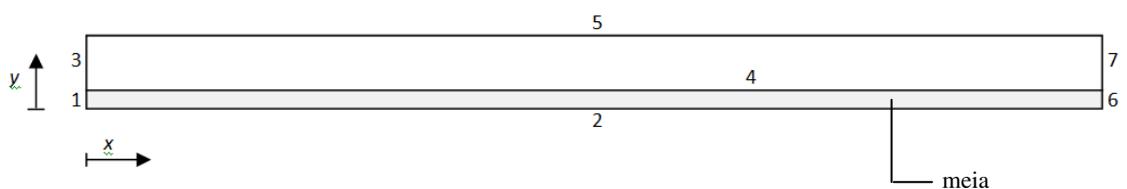


Figura 42 - Representação esquemática da Geometria 2

De modo a facilitar a comparação entre as geometrias, todas as dimensões e condições de fronteira utilizadas na Geometria 1 serão mantidas nesta nova geometria, sendo aqui repetidas por meio da Tabela 7. Nesta nova geometria, a pele e a entrada de ar são representadas pela fronteira 2 e 3, respectivamente.

Tabela 7- Condições de fronteira da Geometria 2

Fronteira	Modelo				Transferência de calor		Transferência de massa	
	Escoamento	Tipo de fronteira	Condição de fronteira	Veloc.	Pressão relativa	Temp.	Condição de fronteira	Conc.
1	-	-	-	-	-	-	Isolamento	-
2	-	-	-	-	-	33°C	Concentração	1,976 mol/m ³
3	Entrada	Velocidade	0,5 m/s	-	-	25°C	Concentração	0,639 mol/m ³
4	Parede	Não escorregamento	-	-	-	-	-	-
5	Parede	Não escorregamento	-	-	-	-	Isolamento	-
6	-	-	-	-	-	-	Isolamento	-
7	Saída	Pressão	-	0	-	-	Fluxo convectivo	-

A descrição dos vários fenómenos presentes no domínio é baseada no modelo de Gibson e Charmchi [39] que contempla algumas simplificações no domínio do material têxtil, nomeadamente inexistência de fase líquida, inexistência de convecção de fase líquida ou gasosa, e transporte de massa apenas através da fase gasosa.

A determinação das várias propriedades do têxtil teve por base uma análise do tipo “volume de controlo” ao têxtil (Figura 43). Nesse volume de controlo considera-se que estão presentes as fibras do têxtil, a água retida (*bounded water*) e os poros onde existe uma mistura gasosa constituída por ar e vapor de água.

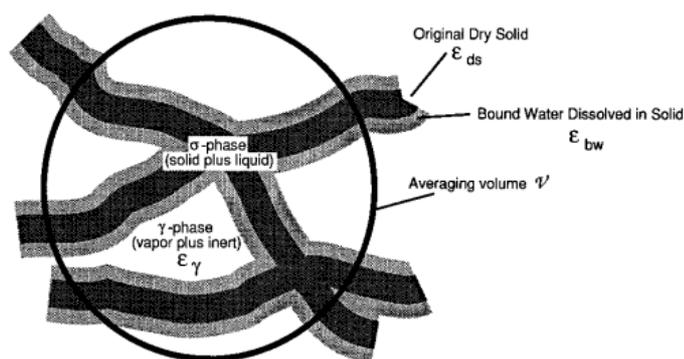


Figura 43- Volume de controlo numa determinada zona do têxtil [39]

As equações-base utilizadas pelos modelos do *Comsol* encontram-se descritas no Anexo C. Os parâmetros utilizados nas várias equações são descritos de seguida.

A condutividade térmica efectiva do têxtil (k_{ef}) é dada pela expressão [39]:

$$k_{ef} = k_{\gamma} \cdot \frac{[1 + (\varepsilon_{bw} + \varepsilon_{ds})] \cdot k_{\sigma} + \varepsilon_{\gamma} \cdot k_{\gamma}}{\varepsilon_{\gamma} \cdot k_{\sigma} + [1 + (\varepsilon_{bw} + \varepsilon_{ds})] \cdot k_{\gamma}} \quad (26)$$

em que k_{γ} representa a condutividade térmica da mistura gasosa (ar e vapor de água) presente nos poros do têxtil, ε_{bw} a fracção de volume ocupado por água retida (*bounded water*), ε_{ds} a fracção de volume ocupado pela fase sólida seca, ε_{γ} a fracção de volume ocupado pelo gás e k_{σ} a condutividade térmica da fibra. A equação referida anteriormente, bem como as restantes a ser descritas nesta secção, são introduzidas no *Comsol* como *Subdomain Expressions*.

O balanço ao volume de controlo relativamente à fracção de volume ocupado pelo gás, fibra e água retida é representado pela equação seguinte [39]:

$$\varepsilon_{\gamma} + \varepsilon_{bw} + \varepsilon_{ds} = 1 \quad (27)$$

A condutividade térmica do ar húmido presente nos poros do têxtil (k_{γ}) resulta da média ponderada em relação à massa volúmica do vapor e de ar seco [39]:

$$k_{\gamma} = \frac{k_v \cdot \rho_v + k_a \cdot \rho_a}{\rho_v + \rho_a} \quad (28)$$

Para as condições consideradas (temperatura compreendida entre 20 e 38°C e humidade relativa entre 40 e 70%), foi calculada a variação da massa volúmica do ar seco e do vapor de água, através da equação dos gases ideais, de onde se verificou que a massa volúmica do ar seco é no mínimo cerca de 35 vezes superior à massa volúmica do vapor (à temperatura de 38°C e 70% de humidade relativa). Utilizando a Eq. (28), verificou-se que as propriedades do ar seco são responsáveis, no mínimo, por 98% do valor da condutividade da mistura (ar e vapor de água). Por este motivo, foi considerado que a condutividade da mistura presente nos poros é suficientemente bem representada pela condutividade do ar seco que, por sua vez, é descrita em função da temperatura.

$$k_{\gamma} \cong k_a(T) \quad (29)$$

Tal como a condutividade do ar húmido, a condutividade da fibra (k_{σ}) é também uma média ponderada [39] entre as propriedades da água e da fibra seca:

$$k_{\sigma} = \frac{k_w \cdot \rho_w \cdot \varepsilon_{bw} + k_{ds} \cdot \rho_{ds} \cdot \varepsilon_{ds}}{\rho_w \cdot \varepsilon_{bw} + \rho_{ds} \cdot \varepsilon_{ds}} \quad (30)$$

em que k_w é a condutividade térmica da água e k_{ds} a condutividade térmica da fibra seca. A condutividade térmica da água em função da temperatura foi incorporada no *Comsol* através de uma função de acordo com os valores apresentados em Raznjevic [28]. A condutividade térmica da fibra seca (algodão) encontra-se descrita na Tabela 8.

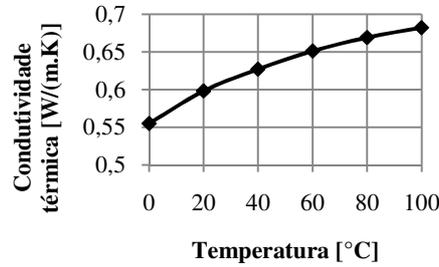


Figura 44- Condutividade térmica da água em função da temperatura [28]

A fracção de volume ocupado por água retida no têxtil é dada pela curva de sorção [39]:

$$\varepsilon_{bw} = 0,578 \cdot R_f \cdot \left(\varepsilon_{ds} \cdot \frac{\rho_{ds}}{\rho_w} \right) \cdot \varphi \cdot \left[\frac{1}{0,321 + \varphi} + \frac{1}{1,262 - \varphi} \right] \quad (31)$$

em que ρ_{ds} é a massa volúmica da fibra seca, R_f é a massa de água retida no têxtil por massa de têxtil seco, doravante denominado de teor em água no têxtil, e $\varphi[-]$ é a humidade relativa. A equação acima permite conhecer a distribuição de água retida em todo o têxtil. Na equação referida anteriormente, considera-se que o equilíbrio entre a humidade relativa do ar presente nos poros e o material têxtil se atinge instantaneamente. A humidade relativa (φ) na equação anterior é obtida através da seguinte equação:

$$\varphi = \frac{C_v \cdot \bar{R} \cdot T}{P_{sat}} \quad (32)$$

A massa volúmica, fracção de volume e calor específico da fibra seca encontram-se descritos na Tabela 8. A massa volúmica da água (ρ_w) é considerada constante e de valor igual a 1000 kg/m³. Como referido no subcapítulo 5.2.1, a fibra considerada para a meia é o algodão.

Tabela 8- Propriedades físicas de diversos materiais têxteis no estado seco [39]

Material	Massa volúmica ρ_{ds} [kg/m ³]	Fracção de volume de fibra ε_{ds} [-]	Calor específico Cp_{ds} [J/(kg · K)]	Condutividade térmica k_{ds} [W/(m · K)]	Tortuosidade τ [-]
Lã	1300	0,381	1360	0,20	2,35
Seda	1340	0,361	1380	0,20	3,94
Algodão	1550	0,336	1210	0,16	2,12
Lã/Polyester	1354	0,384	1348	0,16	2,14
Nylon/Algodão	1345	0,409	1320	0,20	2,49
Nylon	1140	0,360	1430	0,25	1,82
Polyester	1390	0,293	1340	0,14	1,50

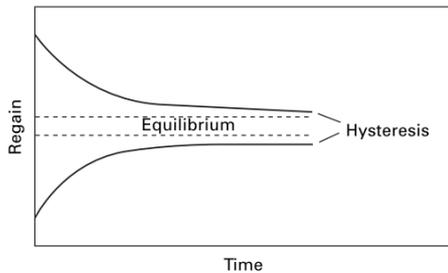


Figura 45- Evolução do teor em água no têxtil colocado num determinado ambiente até atingir equilíbrio [40]

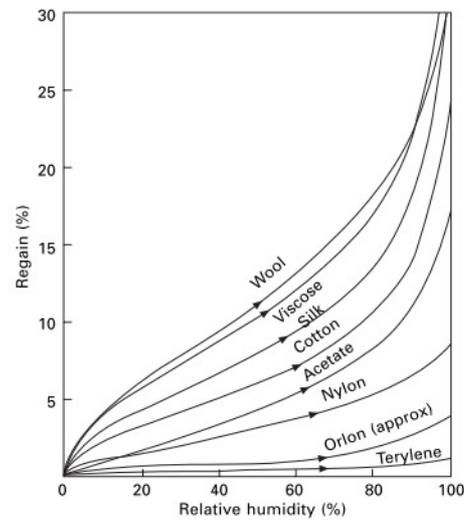


Figura 46- Variação do teor em água no têxtil com a humidade relativa para diversos materiais [40]

O valor de equilíbrio do teor em água no têxtil (R_f ; Figura 45) é função da humidade relativa presente nos poros de acordo com o representado na Figura 46. A partir da imagem da Figura 46, foram extraídos os valores numéricos do teor em água no têxtil do algodão através do programa *GetData Graph Digitizer 2.24*. Os valores produzidos pelo software sob a forma de tabela foram posteriormente incorporados no *Comsol* através de uma função¹⁰.

A difusividade efectiva do vapor de água através do têxtil (D_{ef}) é descrita pela seguinte equação [39]:

$$D_{ef} = \frac{D \cdot \varepsilon_v}{\tau} \quad (33)$$

em que τ representa a tortuosidade, um parâmetro geométrico que quantifica adimensionalmente a complexidade do caminho a percorrer pelo vapor de água. O valor de tortuosidade para vários têxteis encontra-se definido na Tabela 8. O cálculo da difusividade do vapor de água através do ar (D) tem por base a mesma expressão utilizada para o cálculo da difusividade do vapor de água na Geometria 1 (Eq. (25)).

A massa volúmica efectiva do têxtil (ρ_{ef}) é definida através de uma média ponderada em relação à fracção volúmica de cada um dos constituintes do volume de controlo [41]:

$$\rho_{ef} = \varepsilon_{bw} \cdot \rho_w + \varepsilon_{ds} \cdot \rho_{ds} + \varepsilon_v (\rho_v + \rho_a) \quad (34)$$

¹⁰ *Options > Functions > New > Function name: "nome desejado da função" > Use data from: File > File name: "localização do ficheiro no formato .txt" > OK > OK*

em que a massa volúmica do vapor (ρ_v) e do ar (ρ_a) são obtidas através das seguintes expressões, definidas em *Subdomain Expressions*:

$$\rho_v = C_v \cdot 0,018 \quad (35)$$

$$\rho_a = \frac{P_{atm}}{\bar{R} \cdot T} \quad (36)$$

O calor específico a pressão constante efectivo do têxtil é também definido através de uma média ponderada, e é expresso pela seguinte equação [41]:

$$Cp_{ef} = \frac{\varepsilon_{bw} \cdot \rho_w \cdot Cp_w + \varepsilon_{ds} \cdot \rho_{ds} \cdot Cp_{ds} + \varepsilon_\gamma \cdot [\rho_v \cdot Cp_v + \rho_a \cdot Cp_a]}{\rho_{ef}} \quad (37)$$

O calor específico a pressão constante da água (Cp_w), ar (Cp_a) e vapor de água (Cp_v) são expressos à pressão atmosférica em função da temperatura. Tendo por base Raznjevic [28], os valores de calor específico são mais uma vez adicionados ao *Comsol* através de uma função.

Apesar das simulações a realizar contemplarem apenas estado estacionário, foram implementados os parâmetros massa volúmica e calor específico a pressão constante do têxtil, de modo a estudar a sua variabilidade em função das condições de fronteira, e assim informar da sua importância para futuras simulações em estado transiente.

A malha seleccionada para resolver o problema em estudo, apresenta-se no Anexo A.3. O tempo de computação necessário é de 8 minutos (Anexo B).

5.2.2 Distribuição de parâmetros ao longo do domínio

De forma a confirmar a correcção das expressões introduzidas no simulador, analisou-se parâmetro a parâmetro e verificou-se se os valores obtidos se encontram dentro da gama de valores esperados, e se apresentam também a evolução esperada. De salientar que todas as representações gráficas apresentadas de seguida têm por base as condições de fronteira definidas na Tabela 7 e as propriedades do algodão definidas na Tabela 8. A Figura 47 mostra a variação da humidade relativa ao longo dos subdomínios, tendo por base a Eq. (32).

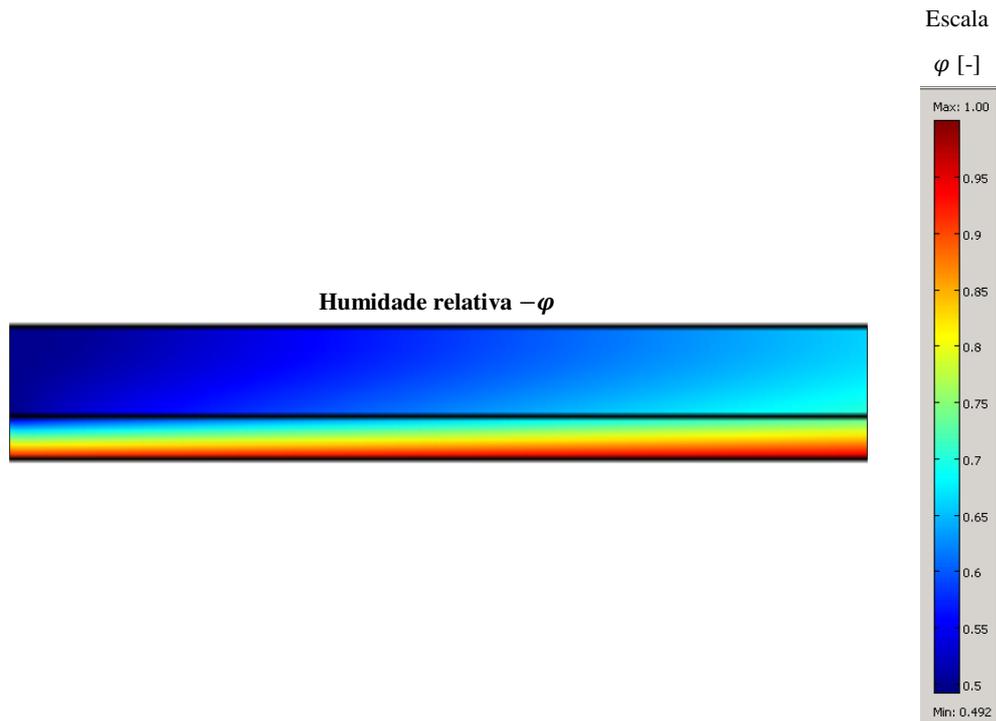


Figura 47- Distribuição da humidade relativa ao longo do domínio; a geometria não se encontra à escala 1:1

A Figura 47 evidencia uma variação da humidade relativa, tanto na direcção do eixo das ordenadas como na direcção do eixo das abcissas. A Figura 48 mostra a distribuição da condutividade do gás, da condutividade da fibra, e da condutividade efectiva do têxtil, resultante da acção conjugada da condutividade do gás e da condutividade da fibra (Eq. (26)).

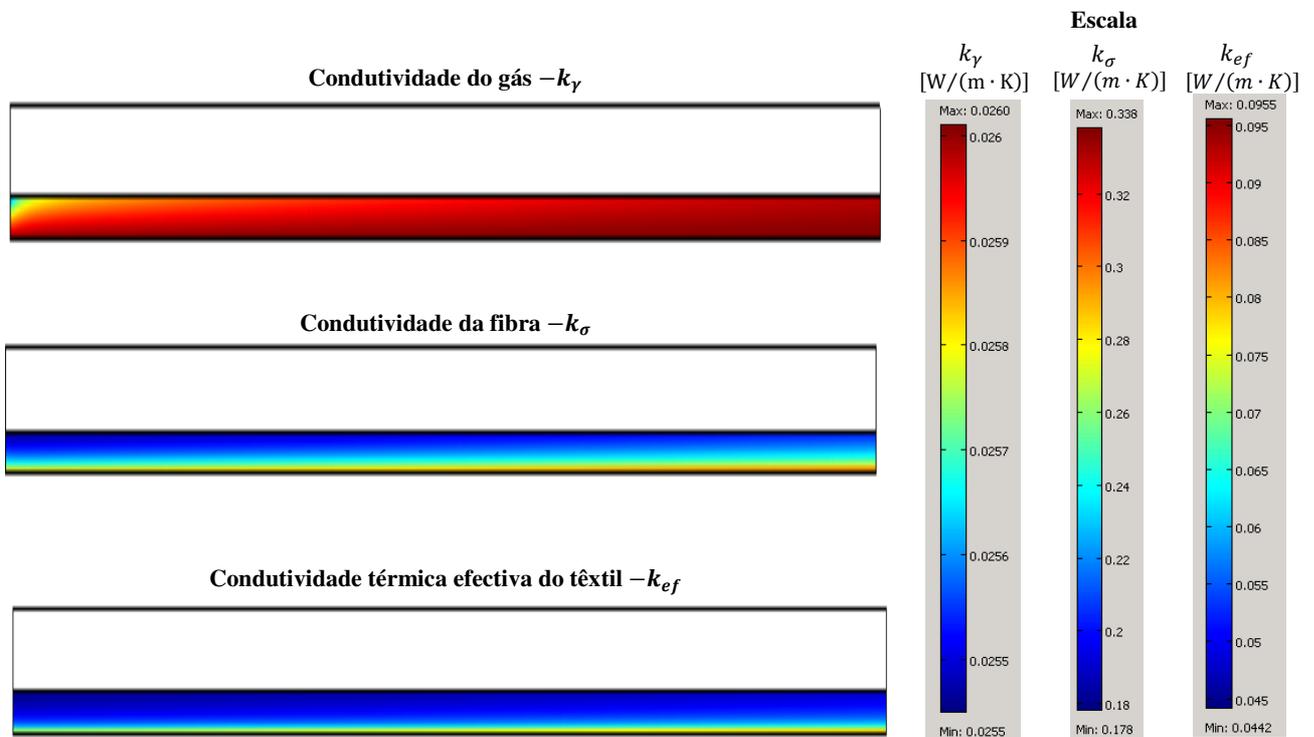


Figura 48- Distribuição ao longo do subdomínio têxtil da condutividade do gás, condutividade da fibra e da condutividade térmica efectiva; as geometrias não se encontram à escala 1:1

Na Figura 49 encontram-se representados os perfis em três secções verticais ($x^*=0,25, 0,5$ e $0,75$; abcissa adimensional da geometria) no subdomínio do têxtil da condutividade do gás, da condutividade da fibra e da condutividade térmica efectiva do têxtil.

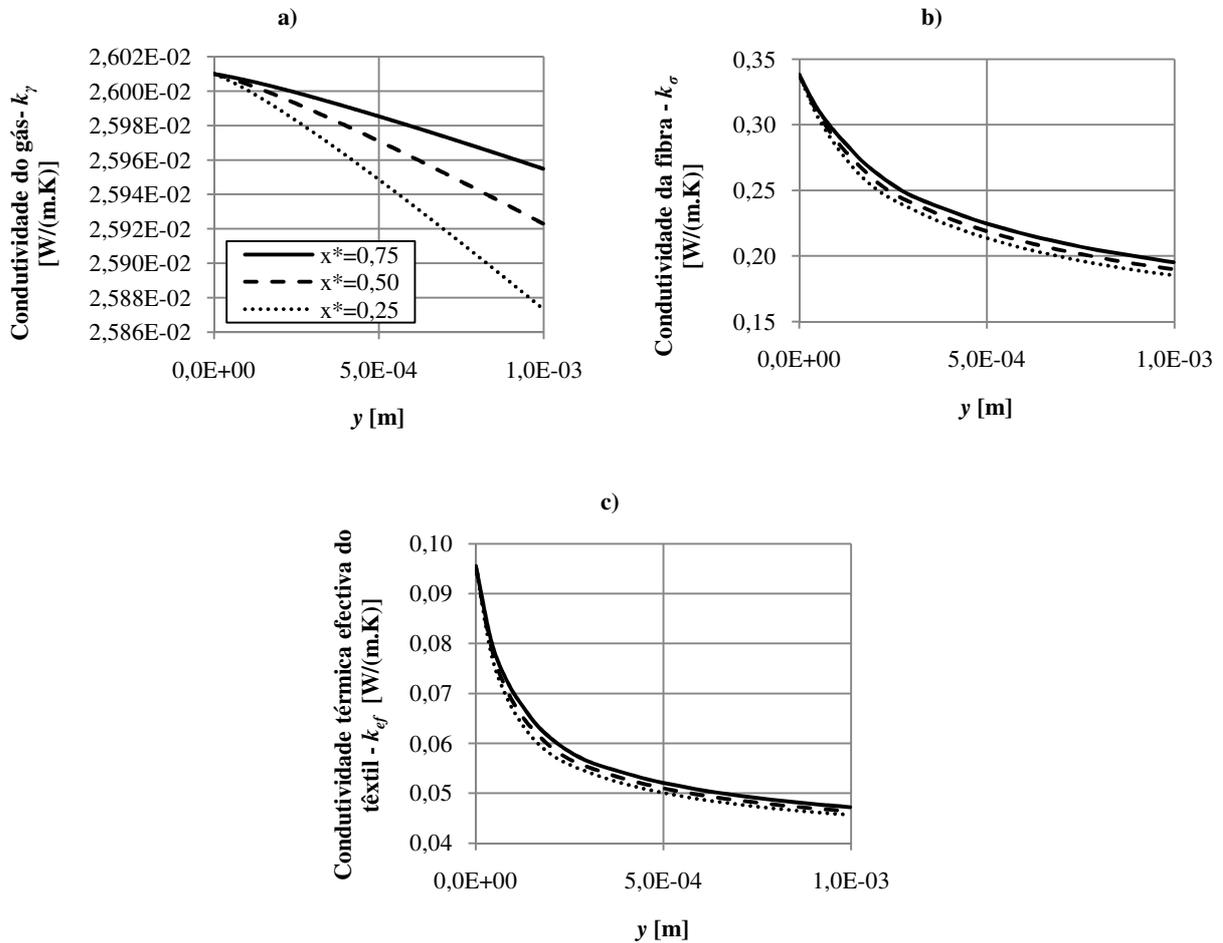


Figura 49- Perfis em diversas secções verticais ($x^*=0,25;0,5$ e $0,75$; abcissa adimensional da geometria) no subdomínio do têxtil da a) condutividade do gás, b) condutividade da fibra e c) condutividade térmica efectiva do têxtil

A condutividade térmica efectiva média resultante da integração ao longo do domínio do têxtil é $0,059 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Na Figura 50 é representada a distribuição da fracção de volume ocupado por água retida (ϵ_{bw}) e a fracção de volume ocupado pelo gás (ϵ_γ) que, adicionadas à fracção de volume ocupado pela fase sólida (ϵ_{ds}), satisfazem a Eq. (27).

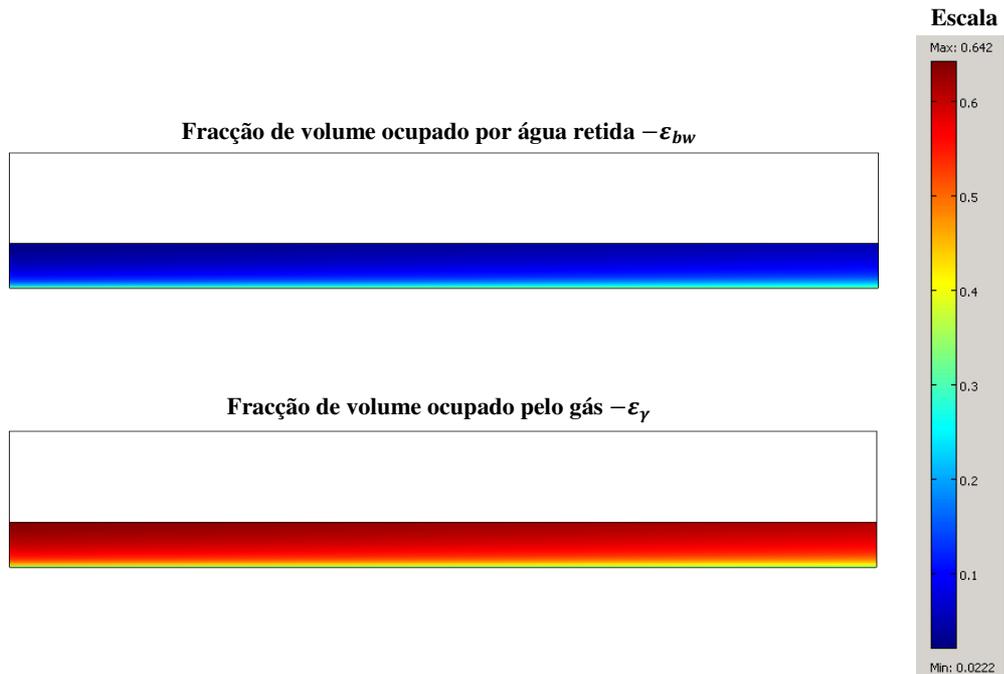


Figura 50- Distribuição ao longo do subdomínio têxtil, da fracção de volume ocupado por água retida e fracção de volume ocupado pelo gás; as geometrias não se encontram à escala 1:1

As distribuições da massa volúmica efectiva e do calor específico do têxtil, ao longo do subdomínio, encontram-se representadas na Figura 51.

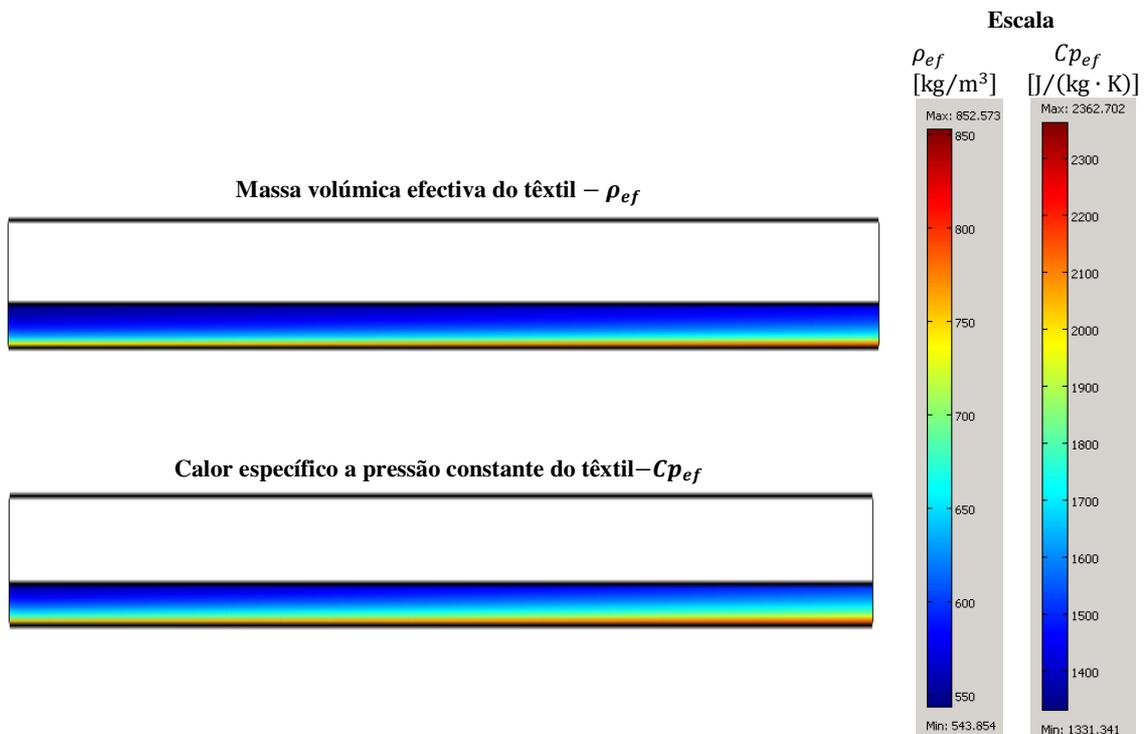


Figura 51- Distribuição ao longo do subdomínio têxtil da massa volúmica efectiva e do calor específico a pressão constante; as geometrias não se encontram à escala 1:1

A massa volúmica efectiva e o calor específico a pressão constante do têxtil, têm o valor médio $651[\text{kg}/\text{m}^3]$ e $1774[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$, respectivamente. Na Figura 52 encontra-se representada a distribuição da difusividade do vapor de água através do ar e através do têxtil.

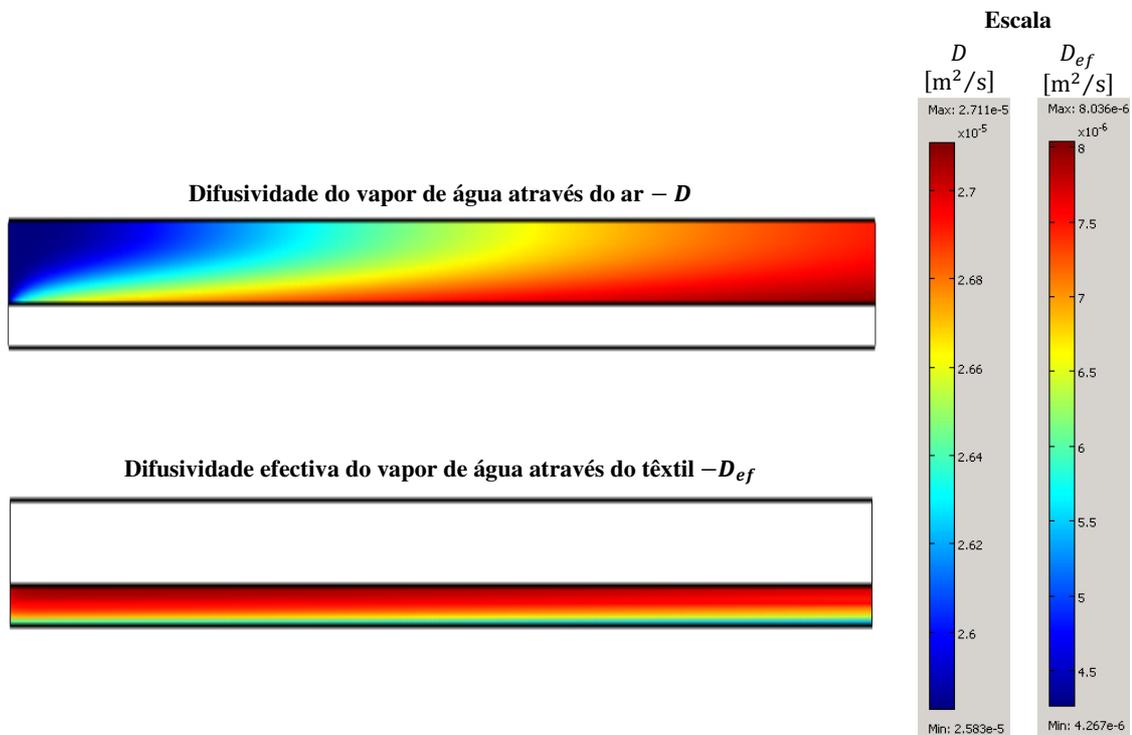


Figura 52- Distribuição da difusividade do vapor de água através do ar e através do têxtil; as geometrias não se encontram à escala 1:1

A escala da Figura 52 mostra uma clara diferença entre a difusividade do vapor de água através do ar e através do têxtil. Como explicitado para a Geometria 1 (secção 5.1.1), a difusividade apresenta reduzida variação com a temperatura. Por essa razão, a maior difusividade do vapor de água, no material têxtil junto à superfície superior, resulta da maior fracção de volume de gás nessa mesma zona (Figura 50). A difusividade efectiva do vapor de água no têxtil apresenta o valor médio de $6,8 \times 10^{-6}[\text{m}^2/\text{s}]$.

Os fluxos de calor e massa ao longo da fronteira inferior, resultantes da influência dos vários parâmetros, encontram-se representados na Figura 53. Integrando ao longo da fronteira inferior, obtém-se $7,87 \text{ W}/\text{m}$ e $1,06 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ para o calor e massa removidos, respectivamente.

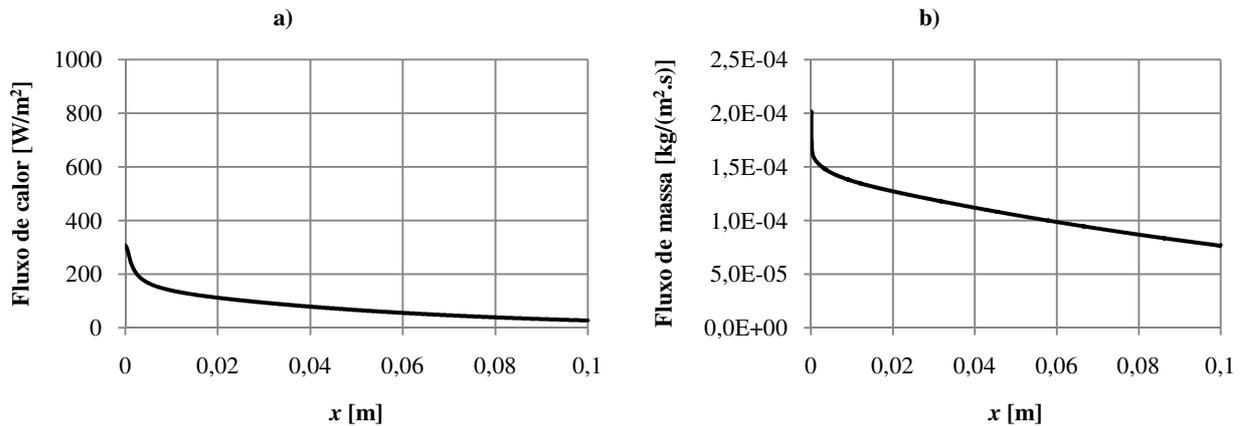


Figura 53- a) Fluxo de calor por condução através da fronteira inferior, b) Fluxo de massa por difusão através da fronteira inferior

5.2.3 Testes Paramétricos relativos às condições de entrada

Para esta geometria foram também realizadas várias simulações paramétricas, em que se mantiveram constantes as condições de fronteira (de acordo com o reportado na Tabela 7) e se consideraram, em cada simulação, várias velocidades, temperaturas e concentrações de entrada.

5.2.3.1 Velocidade de entrada

A Figura 54 mostra o resultado das várias simulações paramétricas relativamente à velocidade de entrada do escoamento¹¹. Para a gama de velocidades considerada nas simulações paramétricas, o número de Reynolds encontra-se compreendido entre 49 ($u=0,2$ m/s) e 252 ($u=1$ m/s).

¹¹ ficheiro *Comsol: Modelo 2 - Param - veloc*

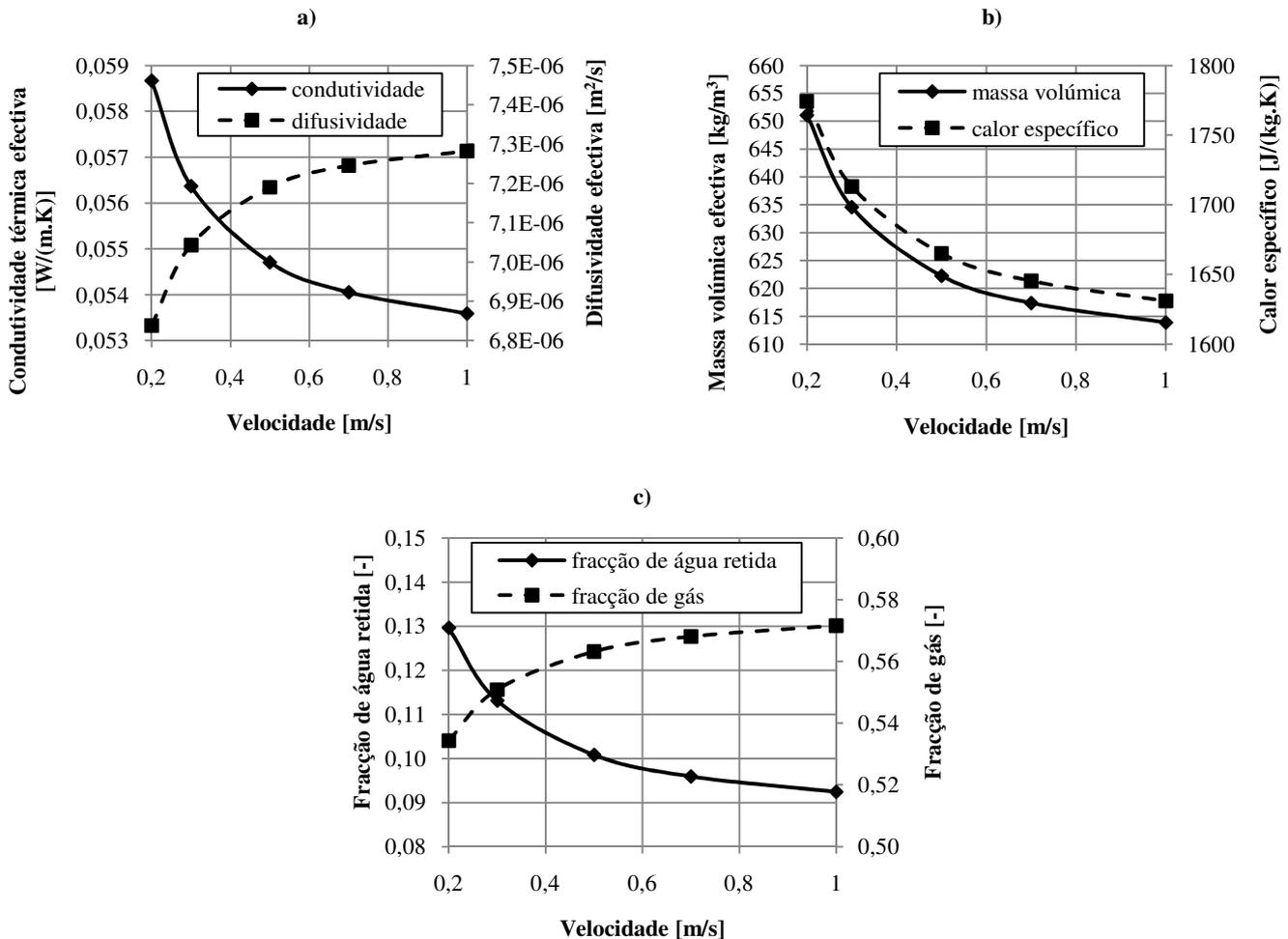


Figura 54- Efeito da velocidade do escoamento de ar nas propriedades do domínio têxtil (meia): a) condutividade térmica efectiva e difusividade efectiva, b) massa volúmica efectiva e calor específico e c) fracção de volume ocupado por água retida e fracção de gás (a fracção de volume sólido é constante e igual a 0,336 (Tabela 8))

Os valores de condutividade térmica efectiva apresentados estão de acordo com o reportado na bibliografia (0,03 W/(m · K) [42]; 0,046 – 0,053 W/(m · K) [43]; 0,043 – 0,072 W/(m · K) [44]). Morton *et al.* [40] reportam $1,22 \times 10^3$ a $1,35 \times 10^3$ J/(kg · K) para o calor específico da fibra seca, o que é consistente com os valores obtidos uma vez que a presença de água no têxtil aumenta o calor específico ($Cp_w = 4186$ J/(kg · K) a 25°C). O aumento da velocidade de entrada (Figura 54a) provoca a redução da condutividade térmica efectiva do têxtil, devido à redução da fracção de volume ocupado pela água retida (Figura 54c), que apresenta condutividade superior à do ar. Na gama de velocidades considerada, a fracção de água retida apresenta uma redução de cerca de 30%. Como a fracção de ar no têxtil aumenta com o aumento da velocidade, necessariamente, a massa volúmica e o calor específico baixam (Figura 54b). Na Figura 55 encontram-se representados o calor e massa removidos ao longo de toda a fronteira inferior em função da velocidade de entrada.

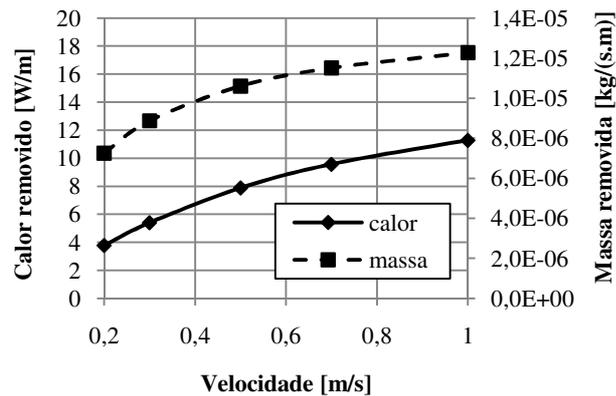


Figura 55- Calor e massa removidos ao longo de toda a fronteira inferior em função da velocidade de entrada

Apesar da condutividade térmica do têxtil diminuir com o aumento da velocidade, o calor removido pela fronteira 2 aumenta (Figura 55). Este facto é explicado pela redução da temperatura na fronteira 4, a que está associado um maior gradiente de temperaturas entre a fronteira 2 e a fronteira 4 que, por sua vez, resulta no aumento da transferência de calor por condução entre estas. Como a quantidade de água retida diminui com a velocidade (Figura 54c), o ar passa a ocupar os espaços que antes eram ocupados pela água retida, o que, consequentemente, facilita o transporte de vapor através do têxtil (Figura 54a). Daí resulta que a quantidade de massa removida pela fronteira inferior aumente com a velocidade (Figura 55).

De modo análogo ao efectuado com a Geometria 1, expressa-se a massa removida em termos de calor removido por evaporação, multiplicando a massa removida pelo calor latente de vaporização a 33°C ($2422,901 \times 10^3$ J/kg; [20]), e assim, compara-se os dois fenómenos (condução e evaporação) relativamente à remoção de calor (Figura 56). O peso relativo da evaporação na quantidade de calor removido, para a gama de velocidades considerada, varia entre 72 e 82%.

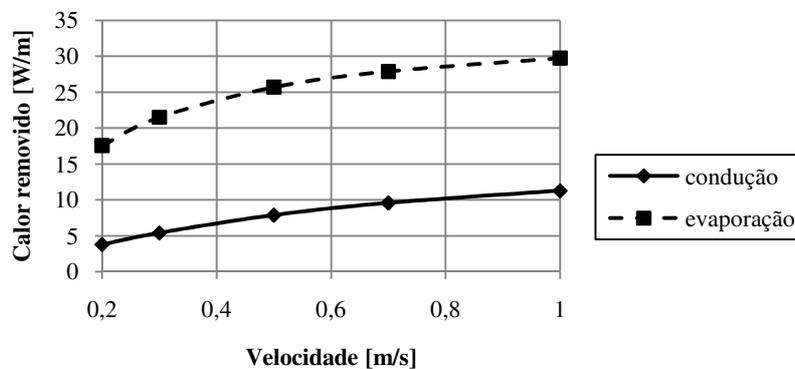


Figura 56- Calor removido por condução e evaporação para várias velocidades de entrada

5.2.3.2 Temperatura de entrada

Na Figura 57 encontra-se representado o resultado das simulações paramétricas relativamente à temperatura de entrada a variar entre 20 e 38°C¹².

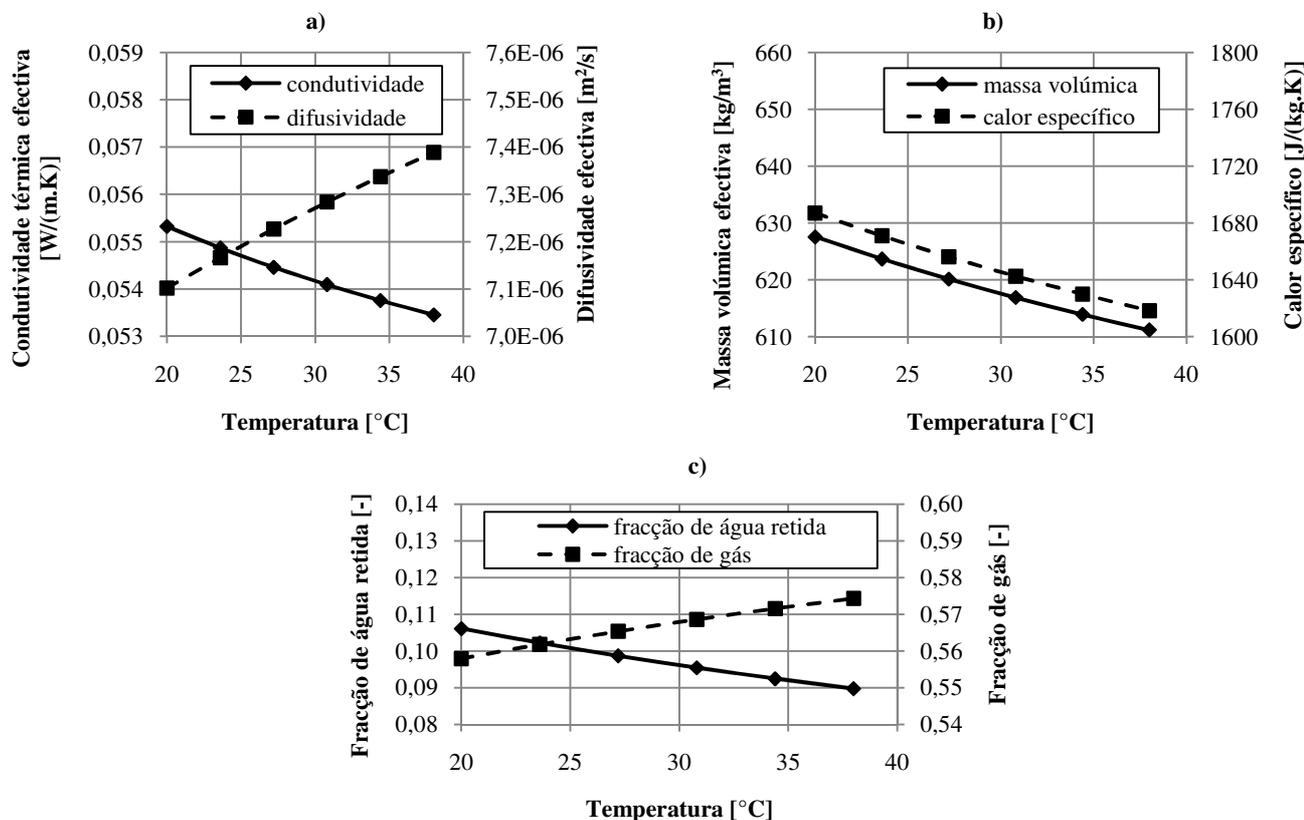


Figura 57- Efeito da temperatura do escoamento de ar nas propriedades do domínio têxtil (meia): a) condutividade térmica efectiva e difusividade efectiva, b) massa volúmica efectiva e calor específico e c) fracção de volume ocupado por água retida (a fracção de volume sólido é constante e igual a 0,336 (Tabela 8))

Quando a temperatura de entrada varia entre 20 e 38°C, a condutividade térmica sofre uma ligeira redução (3,5%; Figura 57a) devido à sua dependência em relação à água retida (Figura 57c). Apesar das condutividades do ar e da água aumentarem com a temperatura (Figura 44), o efeito da redução da quantidade de água retida é superior ao do aumento da condutividade da água e do ar. Por sua vez, a diminuição da quantidade de água retida com o aumento da temperatura (Figura 57c) pode ser explicado pela diminuição da humidade relativa. A difusividade efectiva do vapor de água através do têxtil (Figura 57a) aumenta em consequência de uma maior percentagem de ar presente no têxtil (resultante da diminuição da água retida (Figura 57c)) mas também pelo ligeiro aumento da difusividade do vapor de água através do ar (Figura 27). Na Figura 58 encontra-se representado o calor e massa removidos ao longo de toda a fronteira inferior em função da temperatura de entrada.

¹² ficheiro *Comsol: Modelo 2 - Param - temp*

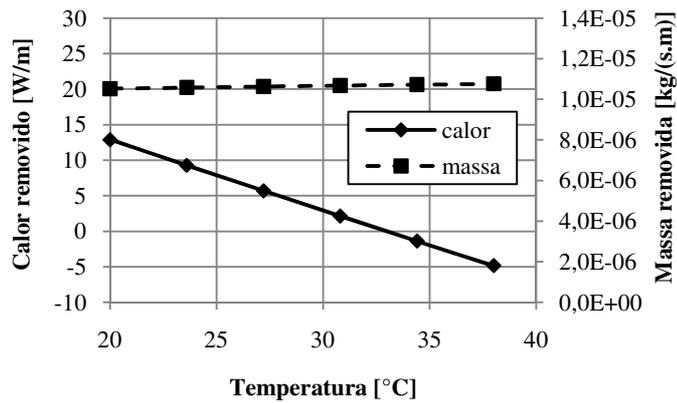


Figura 58- Calor e massa removida ao longo de toda a fronteira inferior em função da temperatura de entrada

A comparação dos dois fenómenos (condução e evaporação), para diferentes temperaturas de entrada, é representada na Figura 59. Mais uma vez, para temperaturas de entrada superiores à temperatura da fronteira inferior, o calor é removido apenas por evaporação, apresentando o peso relativo de 66% para a temperatura de 20°C.

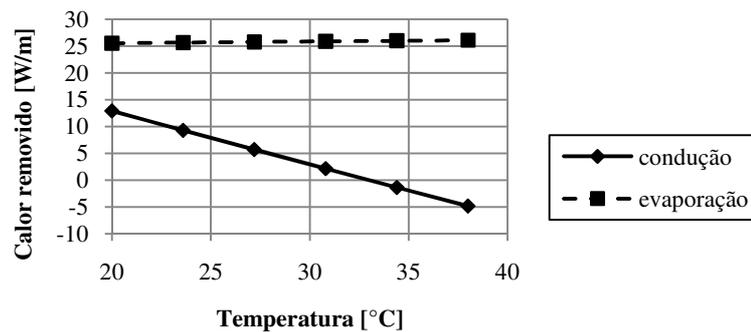


Figura 59- Calor removido por condução e evaporação para várias temperaturas de entrada

5.2.3.3 Humidade relativa

Na Figura 60 encontra-se representado o efeito da variação da humidade relativa em diversos parâmetros¹³.

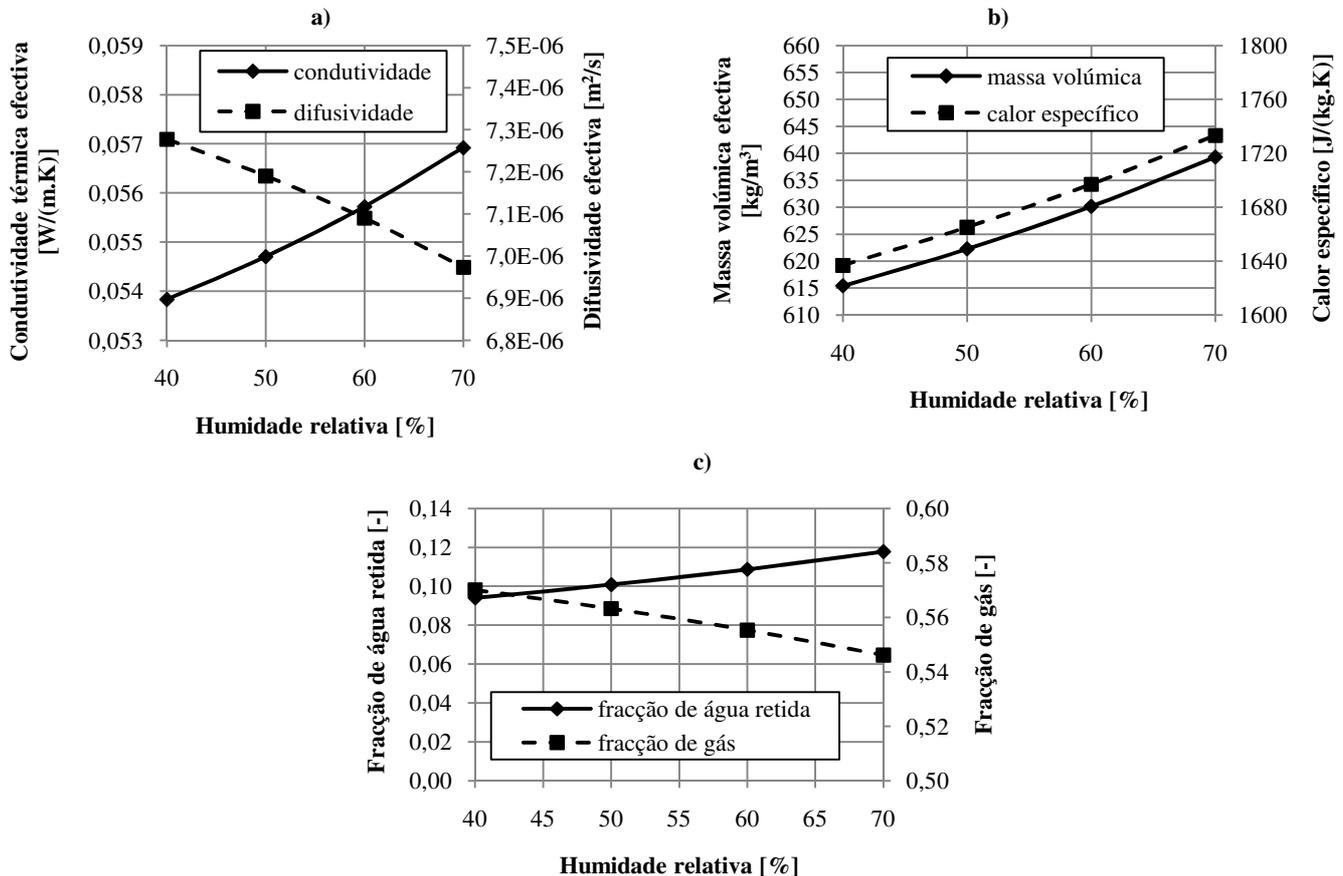


Figura 60- Efeito da humidade relativa do escoamento de ar nas propriedades do domínio têxtil (meia): a) condutividade térmica efectiva e difusividade efectiva, b) massa volúmica efectiva e calor específico e c) fracção de volume ocupado por água retida e fracção de gás (a fracção de volume sólido é constante e igual a 0,336 (Tabela 8))

O facto de o material têxtil (algodão) ser bastante higroscópico faz com que o aumento da humidade relativa à entrada resulte em maior quantidade de água retida no têxtil (Figura 60c). E, como a condutividade da água é superior à do ar, o aumento da quantidade de água retida traduz-se, necessariamente, num aumento da condutividade do têxtil (Figura 60a). Como a fracção de água retida no têxtil aumenta (Figura 60c), a dificuldade no transporte de massa cresce, uma vez que a difusividade efectiva diminui (Figura 60a). Na Figura 61 encontra-se representado o calor e massa removidos ao longo de toda a fronteira inferior em função da humidade relativa.

¹³ ficheiro Comsol: Modelo 2 - Param - RH

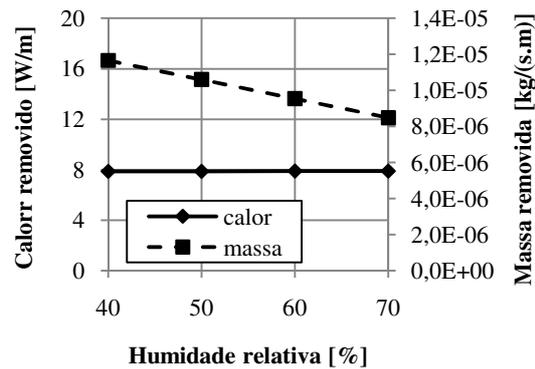


Figura 61- Calor e massa removida ao longo de toda a fronteira inferior em função da humidade relativa à entrada

A comparação dos dois fenómenos (condução e evaporação), para diferentes valores de humidade relativa, encontra-se representada na Figura 62. O peso relativo da evaporação está compreendido entre 72 e 78%.

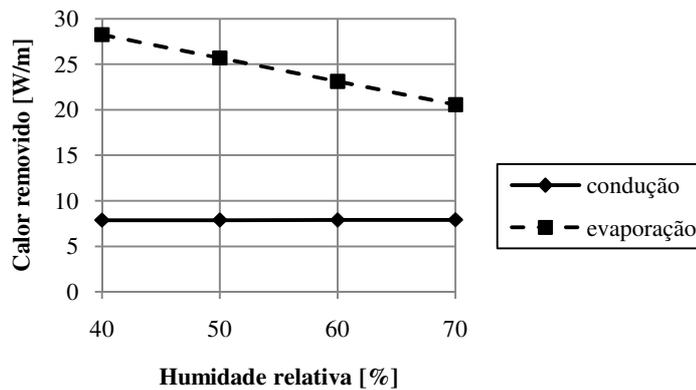


Figura 62- Calor removido por condução e evaporação para vários valores de humidade relativa

5.2.4 Testes paramétricos relativos às propriedades do têxtil

De modo a estudar a influência de vários tipos de têxteis (como os descritos na Tabela 8) na condutividade térmica efectiva, difusividade efectiva, quantidade de calor e de massa removidos, etc., foram feitas simulações paramétricas em que se mantiveram constantes as condições de fronteira (de acordo com o reportado na Tabela 3) e se consideraram em cada simulação vários valores de massa volúmica, fracção de sólido, condutividade térmica e tortuosidade. No estudo de cada parâmetro, foram consideradas as propriedades do algodão. Os parâmetros calor específico da fibra seca (Cp_{ds}) e massa volúmica da fibra seca (ρ_{ds}) apenas intervêm no termo da equação da energia variável com o tempo, pelo que em estado estacionário a massa e calor removidos não variam com estes parâmetros. Na Figura 63

encontra-se representado a influência da fracção de volume sólido em vários parâmetros de interesse¹⁴.

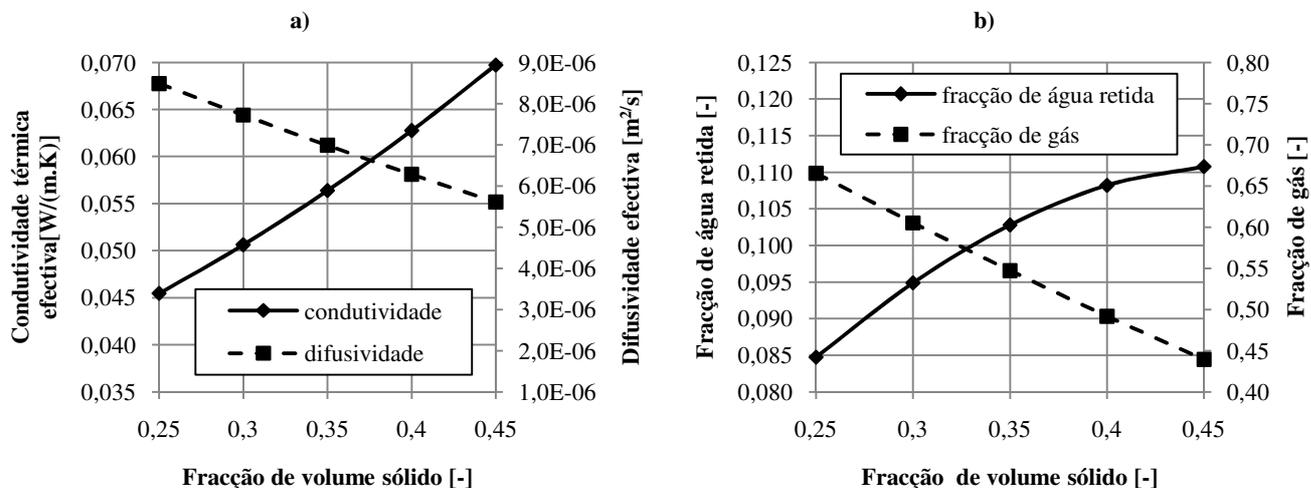


Figura 63- Efeito da fracção de volume sólido em vários parâmetros: a) condutividade térmica efectiva e difusividade efectiva, b) fracção de água retida e fracção de gás

Como seria de esperar, o aumento da fracção de volume sólido implica necessariamente o aumento da condutividade térmica efectiva (Figura 63a), visto que a condutividade térmica da fibra seca (0,336 W/(m · K); Tabela 8) é bastante superior à condutividade do gás (cerca de 0,025 W/(m · K); Eq. (29)), mas mais baixa que a condutividade da água retida (Figura 44). No entanto, apesar da fracção de água retida aumentar ligeiramente (Figura 63b) com o aumento da fracção de volume sólido, esta apresenta um peso reduzido (aproximadamente 10%), daí que a sua influência na condutividade térmica efectiva seja também reduzida. O aumento da fracção de volume sólido provoca também a redução da difusividade efectiva do têxtil (Figura 63a), visto que apesar de a tortuosidade se manter constante, o meio por onde ocorre a difusão (poros), vê a sua fracção de volume no têxtil, diminuída (Figura 63b). Na Figura 64 encontra-se representado o efeito da tortuosidade em vários parâmetros de interesse¹⁵.

¹⁴ ficheiro Comsol: Modelo 2 - Param - E_ds

¹⁵ ficheiro Comsol: Modelo 2 - Param - tortuosidade

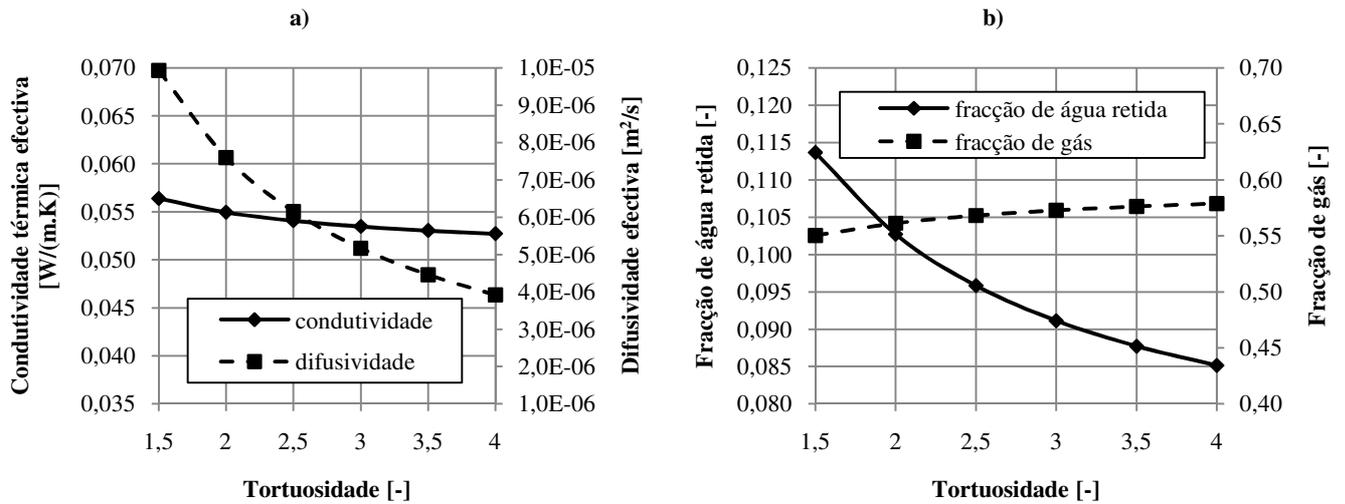


Figura 64- Efeito da tortuosidade em vários parâmetros: a) condutividade térmica efectiva e difusividade efectiva, b) fracção de água retida e fracção de gás (a fracção de volume sólido é constante e igual a 0,336 (Tabela 8))

Para a gama de tortuosidades considerada (Figura 64a), o aumento desta provoca a redução da difusividade efectiva em cerca de 60%. Por outro lado, a tortuosidade praticamente não tem influência na condutividade térmica efectiva. Na Figura 65 encontram-se os resultados das várias simulações paramétricas em relação à remoção de calor e massa.

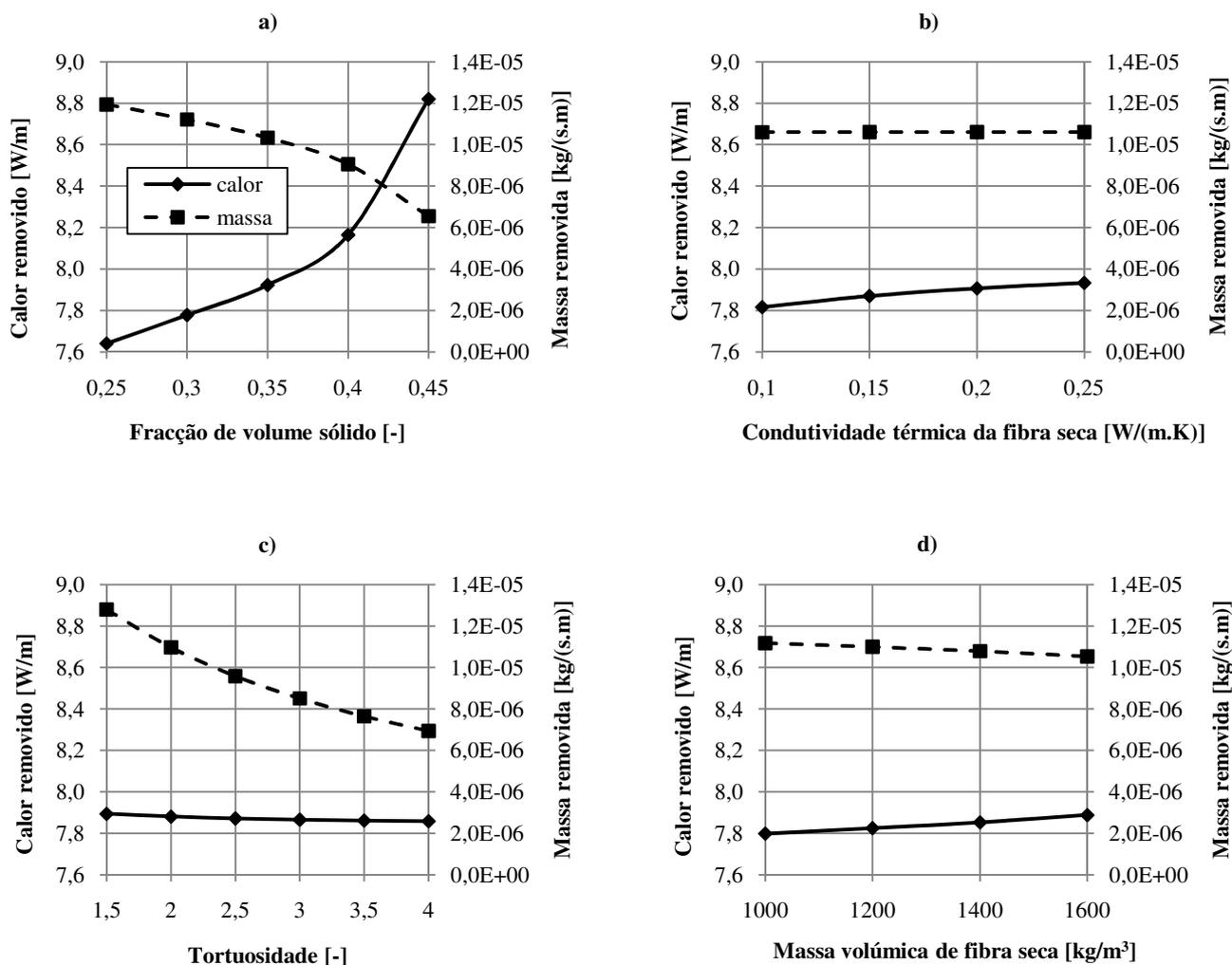


Figura 65- Calor e massa removidos ao longo de toda a fronteira inferior em função de: a) fracção de volume sólido, b) condutividade térmica da fibra seca¹⁶, c) tortuosidade e d) massa volúmica da fibra seca¹⁷

Verifica-se que a fracção de volume sólido (ε_{ds}) apresenta uma forte influência no calor e massa removidos (Figura 65a). O aumento do calor removido deve-se ao aumento da condutividade térmica efectiva do têxtil por via do aumento da fracção de volume sólido (Figura 63a). Em contrapartida, o aumento da fracção de volume sólido reduz a fracção de volume ocupado pelo ar (Figura 63b), o que implica uma maior resistência à transferência de massa, pelo que, consequentemente, a massa removida diminui (Figura 65a). A condutividade térmica da fibra seca não afecta de forma muito significativa o calor e a massa removidos (Figura 65b). O aumento da tortuosidade provoca a redução da difusividade efectiva através do têxtil, o que resulta na diminuição da massa removida (Figura 65c). Este efeito decorre do facto da tortuosidade estar relacionado com a complexidade do caminho a percorrer pelo vapor de água. Relativamente à massa volúmica da fibra seca, esta apresenta reduzida influência, tanto no calor como na massa removidos (Figura 65d). Na Figura 66 encontra-se representada a comparação entre o calor removido por condução e evaporação para diferentes

¹⁶ ficheiro Comsol: Modelo 2 - Param - K_ds

¹⁷ ficheiro Comsol: Modelo 2 - Param - rho_ds

valores de fracção de volume sólido, condutividade térmica da fibra seca, tortuosidade e massa volúmica da fibra seca.

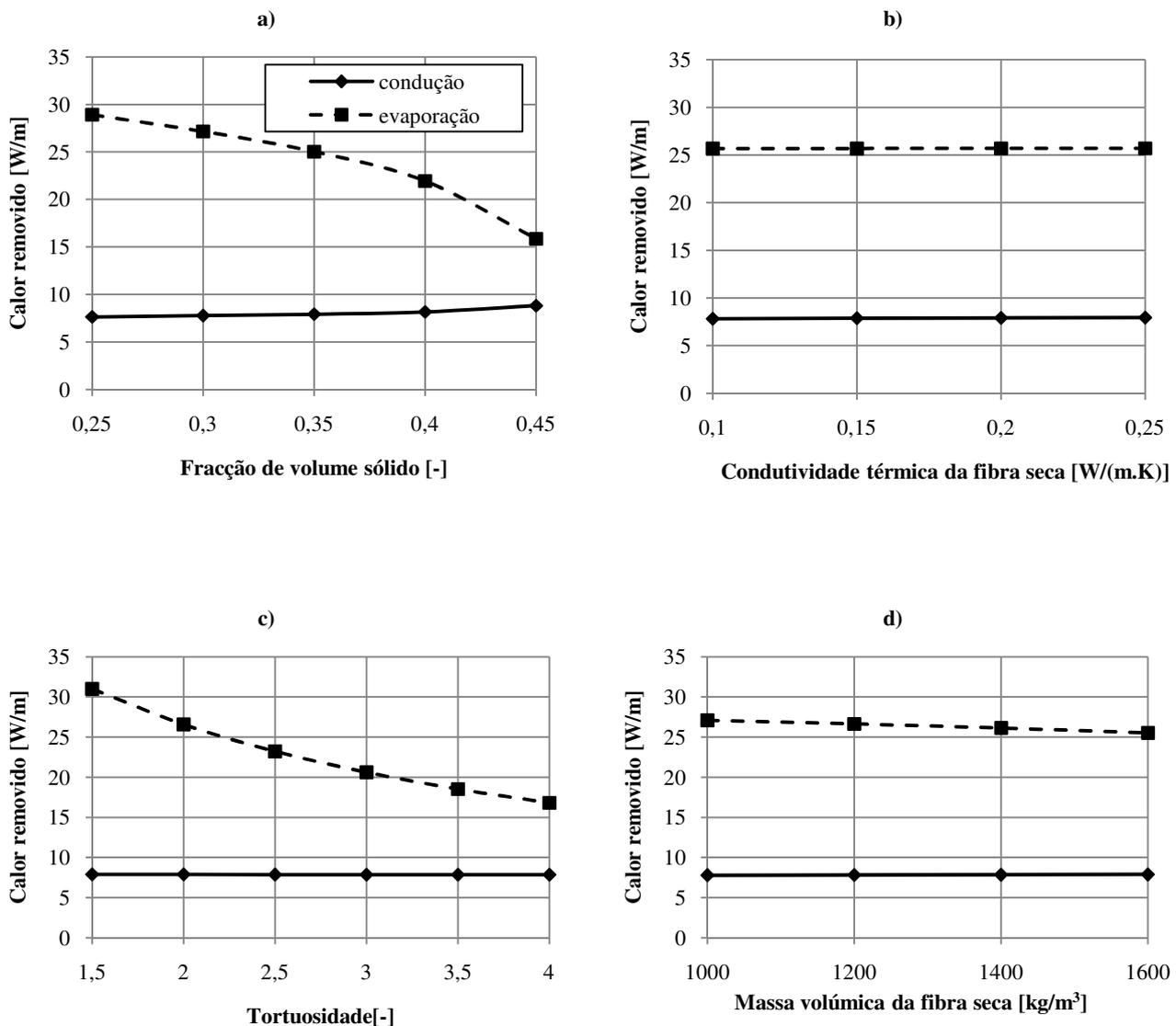


Figura 66- Calor removido por condução e evaporação em função da: a) fracção de volume sólido, b) condutividade térmica da fibra seca, c) tortuosidade e d) massa volúmica da fibra seca

De forma sumária, pode afirmar-se que a fracção de volume sólido e a tortuosidade são os parâmetros que mais influenciam o calor e massa removidos na fronteira inferior.

Não foram realizadas simulações em estado transiente devido ao facto de as equações dos modelos do *Comsol* não serem, sem alteração, totalmente compatíveis com as equações de conservação de massa que, em regime transiente, descrevem situações em que tem lugar transferência de calor/massa aquando da sorção/dessorção de água na fibra têxtil ([39]; para mais informações ver Anexo C). O material têxtil considerado (algodão) para as simulações, e a lã, são materiais bastante higroscópicos, que se caracterizam por apresentar elevada capacidade para reter vapor de água. Ao processo de retenção de vapor de água, durante o regime transiente, está associada a libertação de calor de sorção, que tem como consequência o aumento da temperatura do têxtil (Figura 67). Quando os têxteis são submetidos a mudanças

súbitas de humidade relativa, estes apresentam diferentes instantes de tempo em que atingem a temperatura máxima. Esta diferença temporal está associada aos diferentes valores de difusividade do vapor de água através do têxtil, mas também aos diferentes diâmetros das fibras em questão, já que para uma dada massa de têxtil, a um baixo diâmetro está associada uma maior área, e portanto a retenção de vapor de água será mais rápida [45].

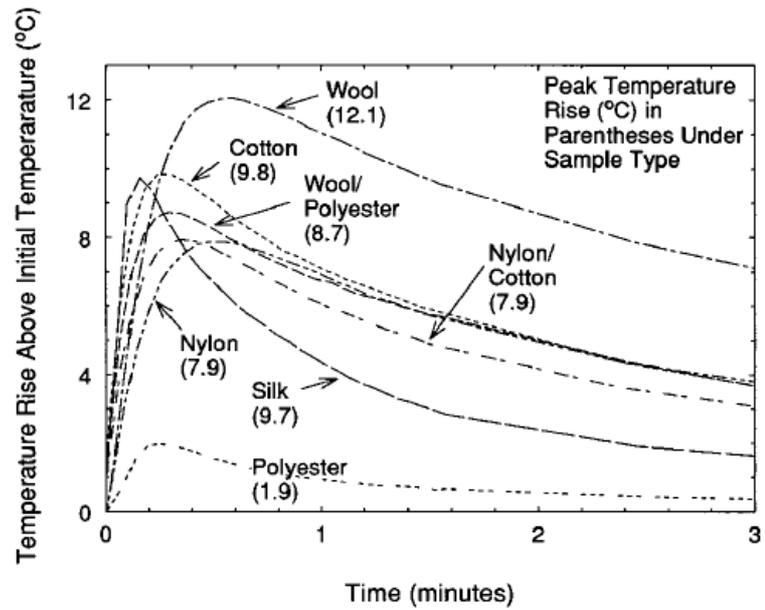


Figura 67- Variação da temperatura de diversos materiais ao longo do tempo, quando a humidade relativa é alterada de 0% para 100% [39]

5.3 Geometria 3

5.3.1 Descrição e formas de implementação

A Figura 68 é uma representação esquemática da nova geometria e representa uma determinada secção do pé, composta pela pele, meia, calçado e meio ambiente. Esta geometria contempla dois subdomínio já considerados na Geometria 2, um representativo da meia (A) e outro da camada de ar presente imediatamente acima desta (B) e contempla ainda dois subdomínios adicionais: um subdomínio representativo do calçado (C) e outro representativo do ambiente em torno deste (D).

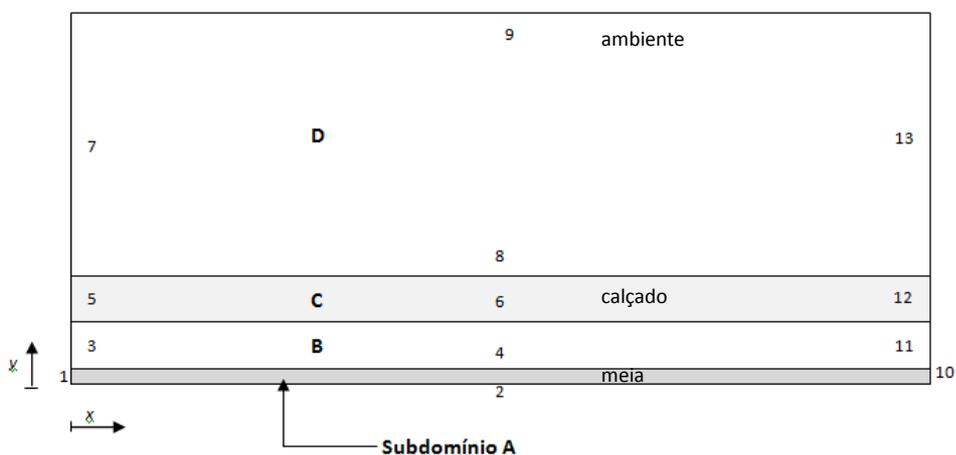


Figura 68- Representação esquemática da Geometria 3

Na Tabela 9 encontram-se descritos os fenómenos e dimensões consideradas em cada subdomínio.

Tabela 9- Dimensões e fenómenos presentes em cada subdomínio

Subdomínio	Dimensões [m × m]	Fenómenos
A Meia	0,1 × 0,001	Condução + Difusão
B Escoamento interno	0,1 × 0,002	Condução + Difusão + Convecção (calor e massa) + Escoamento
C Calçado	0,1 × 0,002	Condução + Difusão + Escoamento meio poroso
D Escoamento externo	0,1 × 0,030	Condução + Difusão + Convecção (calor e massa) + Escoamento

As condições de fronteira relativas a esta nova geometria encontram-se descritas na Tabela 10.

Tabela 10- Condições de fronteira da Geometria 3

	Fronteira						
	1	2	3	4,5 e 6	7	9, 11, e 13	8, 10 e 12
Velocidade média [m/s]	-	-	0,5	-	1,11	-	-
Concentração de vapor [mol/m ³]	-	1,976	0,648	-	0,648	-	-
Temperatura [°C]	-	33	25	-	25	-	-
Pressão relativa [Pa]	-	-	-	-	-	0	-

O subdomínio representativo do ambiente (D) é definido à entrada (7) em termos de temperatura, velocidade e concentração de vapor de água. A velocidade à entrada (7) é a correspondente à velocidade de locomoção do ser humano (4 km/h \cong 1,11 m/s; [35]). Neste subdomínio ocorre transferência de calor por convecção e condução, e transferência de massa por convecção e difusão, não sendo considerado o efeito da radiação. Para este subdomínio, foi considerada a espessura de 0,03m (espessura que não interfere nas camadas limite térmica e de concentração e consequentemente na quantidade de calor e massa removidos).

Como a Figura 68 é uma secção representativa do que se passa numa determinada zona do calçado e portanto, a pressão relativa na fronteira 11 pode ser superior a 0 Pa, foi considerado que a pressão relativa nessa fronteira seria no máximo 10 Pa (aproximadamente 3 vezes o gradiente de pressão existente entre a entrada e a saída do escoamento na Geometria 2, \approx 3,4 Pa).

Para o subdomínio referente ao calçado (C), foram consideradas as propriedades do *nylon* (Tabela 8), como sendo representativas do calçado. Considera-se que este subdomínio tem 0,002m de espessura e que através do mesmo há transferência de calor por condução, transferência de massa por difusão e ainda possibilidade de escoamento através do meio poroso.

No *Comsol* existem dois modelos para simular o escoamento através de um meio poroso: um que tem por base a lei de Darcy e outro baseado nas equações de Brinkman. A lei de Darcy, é uma expressão empírica que descreve o escoamento através de um meio poroso em termos de um gradiente de pressão e de permeabilidade do meio poroso [46-47]:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K_D} \cdot v \quad (38)$$

em que v (m/s) representa a velocidade aparente do fluido no meio poroso, μ (kg/(m · s)) a viscosidade dinâmica do fluido que atravessa o meio poroso, ∇p (Pa) o gradiente de pressão e K_D (m²) a permeabilidade do mesmo.

A lei de Darcy é válida quando o número de Reynolds baseado no diâmetro das fibras se situa bastante abaixo de 10 [48-49]. Para valores superiores, os efeitos de inércia tornam-se mais

significativos e a queda de pressão em função da velocidade deixa de apresentar comportamento linear [49]. Nesse caso, Nield *et al.* [49] sugerem a utilização de uma extensão da lei de Darcy, a equação de Forchheimer que, no entanto, não é consensual. Seja como for, esta última abordagem é desnecessária, já que, no presente caso, o número de Reynolds baseado no diâmetro da fibra (20 a 50 μm para o algodão e cerca de 25 μm para o *nylon*; [50]) encontra-se bastante abaixo de 10 (0,01-0,03), o que garante a aplicabilidade da lei de Darcy ao problema em questão.

A equação de Brinkman é semi-empírica e apresenta a seguinte forma:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K_D} \cdot v + \tilde{\mu} \cdot \nabla^2 v \quad (39)$$

em que $\tilde{\mu}$ representa o parâmetro de viscosidade efectiva. Usualmente, as equações de Brinkman são consideradas uma extensão da lei de Darcy [46, 51-52]. No entanto, Nield *et al.* [49] afirmam que essa consideração não é correcta na medida em que Brinkman não adicionou apenas mais um termo à lei de Darcy, mas sim obteve uma relação entre a permeabilidade e a porosidade num domínio poroso constituído por esferas. No *Comsol* a equação de Brinkman encontra-se inserida na equação de Navier- Stokes:

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + \left(\frac{\eta}{K_D} + Q \right) u = \nabla \left[-P \cdot I + \frac{1}{\varepsilon} \left\{ \eta (\nabla u + (\nabla u)^T) - \left(\frac{2}{3} \eta - k_{av} \right) (\nabla \cdot u) I \right\} \right] + F \quad (40)$$

Assim, quando a porosidade tende para 1 e a permeabilidade tende para infinito, a equação acima reduz-se à equação clássica de Navier-Stokes. No entanto, a equação de Brinkman carece de validação experimental, principalmente para elevados valores de permeabilidade e porosidade [49, 53-54]. Como referido anteriormente, a lei de Darcy é aplicável ao problema em questão pelo que o escoamento através do calçado (C) foi modelizado com base na Eq. (38).

A permeabilidade do têxtil é função de vários factores, tais como espessura, humidade relativa, número de fios, número de fibras que compõem o fio, forma de entrelaçamento dos mesmos e fracção de volume sólido. Na literatura são referidas várias formas de estimar a permeabilidade, tais como expressões que permitem calcular a permeabilidade numa dada direcção (materiais anisotrópicos), através da definição do diâmetro da fibra, da fracção de volume sólido, e através de uma função de distribuição de probabilidade, que define o arranjo das fibras [55].

Na literatura são também mencionadas diversas formas de medição experimental da permeabilidade, com base em procedimentos normalizados ([56-59]) ou formas alternativas de medição ([41]). De acordo com Gibson *et al.* [41], é possível expressar a resistência ao

escoamento de um determinado têxtil através da resistência aparente ao escoamento de Darcy (R_D):

$$R_D = -\frac{\Delta p}{\mu \cdot v} \quad (41)$$

o que implica, por manipulação das Equações (38) e (41), que a resistência aparente ao escoamento de Darcy pode ser obtida por:

$$K_D = \frac{\Delta x}{R_D} \quad (42)$$

Na Figura 69 é representado, para diversos materiais, um conjunto de valores experimentais de resistência aparente ao escoamento de Darcy (R_D), em função da humidade relativa. Esta figura evidencia a influência da higroscopicidade de diversos materiais na resistência aparente ao escoamento de Darcy (R_D).

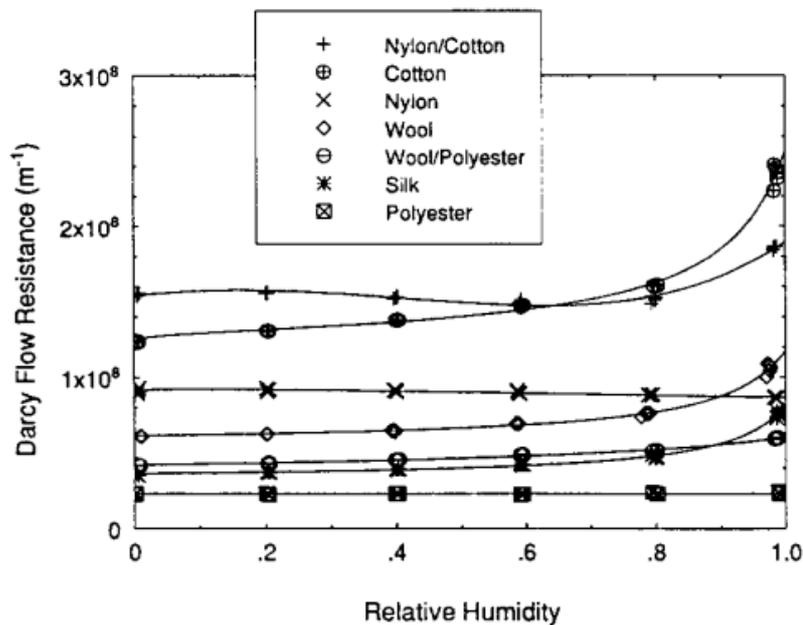


Figura 69- Resistência aparente ao escoamento de Darcy em função da humidade relativa [41]

Devido ao facto de o *nylon* apresentar reduzido grau de higroscopicidade, a resistência aparente ao escoamento de Darcy praticamente não se altera em função da humidade relativa. A Tabela 11 apresenta os valores de resistência aparente ao escoamento de Darcy dos diversos materiais contidos na Figura 69, para o caso de humidade relativa 0% e 100%. Esta tabela apresenta ainda os valores de permeabilidade obtidos através da Eq. (42).

Tabela 11- Resistência aparente ao escoamento de Darcy e permeabilidade para vários materiais em situações de humidade relativa extrema (0 e 100%; adaptado de Gibson [41])

Material	Espessura (Δx) [m] $\times 10^3$	Resistência aparente ao escoamento de Darcy (R_D) [m ⁻¹] $\times 10^8$		Permeabilidade (K_D) [m ²] $\times 10^{11}$	
		$\varphi = 0\%$	$\varphi = 100\%$	$\varphi = 0\%$	$\varphi = 100\%$
Lã	0,643	0,614	1,080	1,05	0,595
Seda	0,135	0,353	0,760	0,382	0,178
Algodão	0,384	1,230	2,400	0,312	0,160
Lã/Polyester	0,442	0,425	0,595	1,04	0,743
Nylon/Algodão	0,463	1,500	1,850	0,309	0,250
Nylon	0,861	0,930	0,868	0,926	0,992
Polyester	0,589	0,226	0,226	2,61	2,61

Como a permeabilidade do *nylon* apresenta reduzida variação com a humidade relativa, será considerado que a permeabilidade não depende da humidade.

Para a descrição dos parâmetros de transferência de calor e de massa no subdomínio poroso e da meia, são igualmente aplicáveis as Equações (26) a (37). As características do *nylon* são dadas pela Tabela 8 e o teor em água no têxtil em função da humidade relativa é dado pela Figura 46.

Tal como realizado para a Geometria 2, foi implementado a ponte entre os modelos de escoamento, transferência de calor e transferência de massa. Isto implica que o modelo de escoamento depende da distribuição de temperatura e concentração resultantes do modelo de transferência de calor e transferência de massa, respectivamente. O modelo de transferência de calor encontra-se descrito em função da condutividade térmica (do têxtil, do ar e da água), da massa volúmica efectiva e do calor específico efectivo que, por sua vez, encontram-se descritos em função de outros parâmetros, tais como as propriedades físicas do têxtil seco e da humidade relativa. Por fim, o modelo de transferência de massa encontra-se descrito em função da difusividade através do ar, e da difusividade através do têxtil, que é dependente da fracção de gás presente neste.

Na Tabela 12 encontram-se definidas as condições de fronteira para os vários modelos utilizados na ferramenta de simulação.

Tabela 12- Condições de fronteira para os modelos de escoamento, transferência de calor, transferência de massa escoamento no meio poroso

Modelo										
Fronteira	Escoamento				Transferência de calor		Transferência de massa		Escoamento de Darcy	
	Tipo de fronteira	Condição de fronteira	Veloc.	Pressão relativa	Tipo de fronteira	Temp.	Condição de fronteira	Conc.	Condição de fronteira	Pressão relativa
1	-	-	-	-	Isolamento	-	Isolamento	-	-	-
2	-	-	-	-	Temp.	33°C	Conc.	1,976 mol/m ³	-	-
3	Entrada	Velocidade	0,5 m/s	-	Temp.	25°C	Conc.	0,639 mol/m ³	-	-
4	Parede	Não escorregamento	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	Isolamento	-	Isolamento	-	-	-
6	Parede	Não escorregamento	-	-	-	-	-	-	Pressão	p^{18}
7	Entrada	Velocidade	1,11 m/s	-	Temp.	25°C	Conc.	0,639 mol/m ³	-	-
8	Parede	Não escorregamento	-	-	Fluxo convectivo	-	-	-	Pressão	p
9	Saída	Pressão	-	0	Fluxo convectivo	-	Fluxo convectivo	-	-	-
10	-	-	-	-	Isolamento	-	Isolamento	-	-	-
11	Saída	Pressão	-	0	Fluxo convectivo	-	Fluxo convectivo	-	-	-
12	-	-	-	-	Isolamento	-	Isolamento	-	-	-
13	Saída	Pressão	-	0	Fluxo convectivo	-	Fluxo convectivo	-	-	-

¹⁸ variável interna do modelo de escoamento

5.3.2 Discussão de resultados e Testes paramétricos

Na Figura 70 são mostradas as distribuições de temperatura, de concentração e respectivo campo de velocidades, para as condições reportadas na Tabela 10 e considerando as propriedades do algodão e do *nylon* (Tabela 8) para os subdomínio da meia e do calçado, respectivamente. É ainda representada a distribuição de pressão relativa no domínio, acompanhado pelo campo de velocidades de Darcy presente no subdomínio poroso. De notar que as representações presentes na Figura 70 foram obtidas para a permeabilidade de $0,9 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ e pressão relativa à saída do escoamento interno de 0 Pascal.

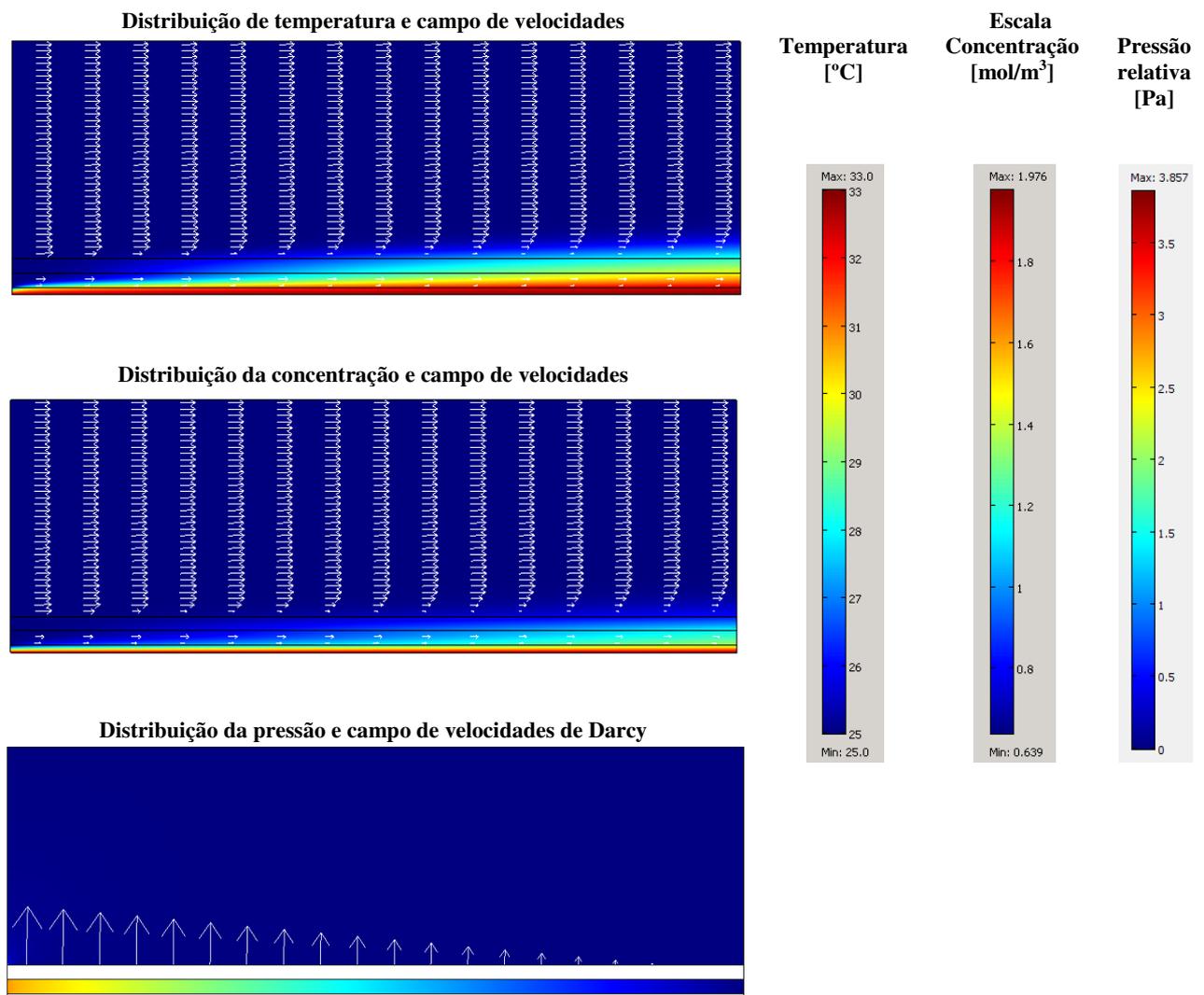


Figura 70- Distribuição da temperatura, concentração e pressão relativa no domínio; as representações dos vectores de velocidade e velocidade de Darcy não se encontram à escala

O escoamento externo, representado na Figura 70, é análogo ao escoamento sobre placa plana, em que o número de Reynolds de transição se situa em torno de 5×10^5 . Neste caso em concreto o número de Reynolds toma o valor de 6765, pelo que se situa bastante abaixo do regime de transição.

Verifica-se, através da Figura 70, que devido ao maior gradiente de pressões (através do subdomínio poroso) existente à entrada, a velocidade de Darcy tende a ser mais elevada nessa zona, decrescendo ao longo do subdomínio. A distribuição dos parâmetros no domínio poroso, tais como a condutividade da fibra, a condutividade efectiva do têxtil ou ainda a difusividade efectiva do vapor de água através do têxtil, encontram-se representados no Anexo D.

Foram realizadas várias simulações paramétricas em que se mantiveram constantes as condições de fronteira e se consideraram várias permeabilidades. De modo a simular o que se passa em diferentes secções do calçado, nas simulações paramétricas foram considerados valores distintos de pressão relativa (0, 5 e 10 Pa) à saída do escoamento interno (fronteira 11). Na Figura 71a, encontra-se representado a variação da velocidade média em função da permeabilidade do meio poroso e da pressão relativa à saída (fronteira 11). Para melhor se entender a repartição de caudais, na Figura 71b é representada a percentagem do caudal mássico proveniente da fronteira 3 (entrada) que escoam através da fronteira 11. Esta percentagem é representada em função da permeabilidade e da pressão presente na fronteira 11. Nesta figura, as diferentes curvas apresentam diferentes valores máximo de permeabilidade, já que fisicamente, não é possível ocorrer uma elevada pressão à saída do escoamento interno e ao mesmo tempo ter-se uma elevada permeabilidade do meio poroso.

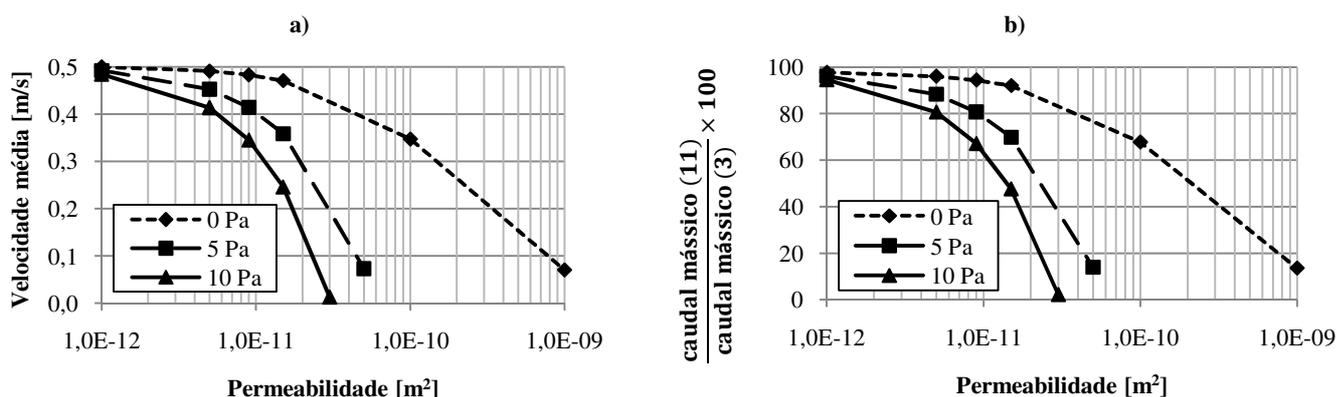


Figura 71- Efeito da permeabilidade e da pressão relativa na fronteira 11 na a) velocidade média¹⁹ na fronteira 11 e b) Percentagem de caudal mássico que escoam através da fronteira 11 em relação ao caudal mássico na entrada (3); os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 10

O aumento da permeabilidade faz crescer a relevância do escoamento através do meio poroso, o que implica a diminuição do caudal/velocidade no escoamento interno. Para o caso de permeabilidade constante e considerando valores crescentes de pressão relativa à saída do escoamento interno, verifica-se um aumento do caudal mássico através da fronteira superior (6), decorrente de um gradiente de pressão maior entre o escoamento interno e externo. A velocidade média de Darcy através do subdomínio poroso (C) encontra-se representada, na Figura 72, em função da sua permeabilidade.

¹⁹ ficheiros Comsol: Modelo 3 - Param - permeab - P=0; Modelo 3 - Param - permeab - P=5; Modelo 3 - Param - permeab - P=10

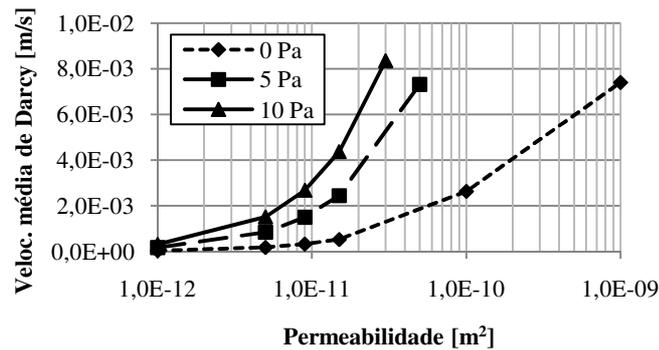


Figura 72- Velocidade média de Darcy em função da permeabilidade do meio poroso e da pressão relativa à saída do escoamento interno (11); os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 10

A Figura 72 traduz a lei de Darcy (Eq. (38)), evidenciando que o aumento da permeabilidade e/ou aumento do gradiente de pressão entre as fronteiras do domínio poroso, se traduz no aumento da velocidade aparente de Darcy. Na Figura 73 encontra-se representado o efeito da permeabilidade no gradiente de pressão existente entre a entrada (3) e a saída (11) do escoamento.

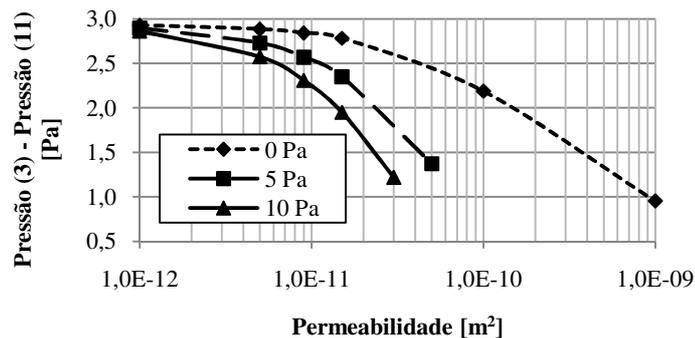


Figura 73- Efeito da permeabilidade e da pressão relativa à saída do escoamento interno (11), no gradiente de pressão existente entre a entrada (3) e a saída (11) do escoamento interno; os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 10

A Figura 73 revela que o gradiente de pressão entre a entrada (3) e a saída (11), necessário para garantir a velocidade de entrada de 0,5 m/s, diminui com o aumento da permeabilidade e com o aumento da pressão à saída. Isto acontece pois o aumento da permeabilidade e da pressão à saída provoca o aumento da velocidade de Darcy. A figura fornece também informação acerca do ventilador necessário para promover o escoamento de ar. Por exemplo, para a condição de fronteira de 0 Pascal na saída (11) e permeabilidade $1,5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, o ventilador terá de impor no mínimo cerca de 2,8 Pa à sua saída (correspondente à entrada 3), para se obter a velocidade de 0,5 m/s à entrada. Na Figura 74, encontra-se representado o efeito da permeabilidade do meio poroso e da pressão relativa à saída do escoamento interno, no calor e massa removidos da fronteira 2.

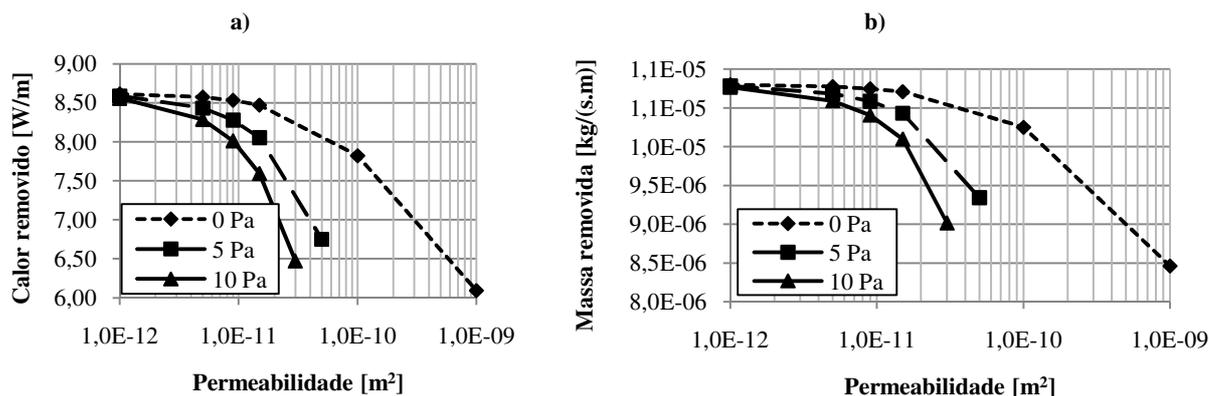


Figura 74- Efeito da permeabilidade do meio poroso e da pressão relativa na fronteira 11 na: a) Calor removido da fronteira 2 e b) Massa removida da fronteira 2; os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 10

A Figura 74 evidencia a diminuição do calor e da massa removidos por via do aumento da permeabilidade e/ou aumento da pressão relativa na fronteira 11. Esta diminuição é explicada, pelo facto de o aumento da permeabilidade permitir fluxos de Darcy superiores o que implica diminuição do fluxo de ar ao longo da meia. Na Figura 75, encontra-se representada a comparação entre o calor removido por condução e o calor removido por evaporação, para diferentes valores de permeabilidade e de pressão relativa à saída do escoamento interno.

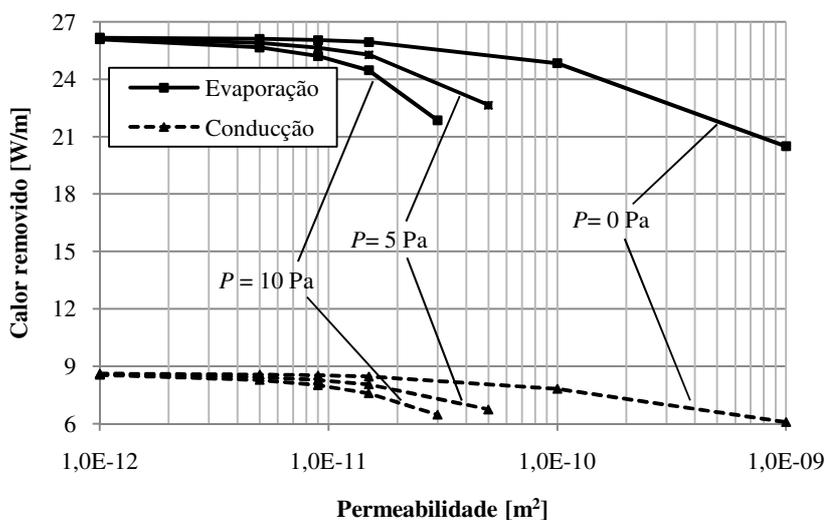


Figura 75- Efeito da permeabilidade e da pressão relativa à saída do escoamento interno no calor removido por condução e evaporação da fronteira inferior (2); os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 10

Os resultados apresentados na Figura 75 são qualitativamente semelhantes aos apresentados na Figura 56, na medida em que a variação da permeabilidade se traduz indirectamente na variação da velocidade presente no escoamento interno. A figura permite concluir que, o aumento da permeabilidade traduz-se numa maior redução do calor removido por condução (cerca de 25%) em comparação com a redução do calor removido por evaporação (cerca de 17%).

Verifica-se que cerca de 24% da potência removida da fronteira 2 (pele) ocorre através da fronteira 6 por condução de calor (único fenómeno de transferência de calor considerado no

domínio poroso), sendo que o restante ocorre pela fronteira 11. Nesta geometria a percentagem de calor removida por condução (24%) é independente da permeabilidade, já que o aumento desta não se traduz na diminuição da fracção de volume sólido (ϵ_{ds}) e consequente redução da condutividade térmica efectiva (k_{ef}), ou seja, nesta geometria a fracção de volume sólido é independente da permeabilidade. Nestas mesmas condições, cerca de 13% da massa removida da fronteira 2 atravessa a fronteira 6 (por difusão).

Com esta geometria, verifica-se que a permeabilidade do calçado é de grande importância para a definição das características do ventilador, já que permeabilidades elevadas requerem maior potência para retirar a mesma quantidade de calor em comparação com permeabilidades mais baixas. No entanto, como não foi considerada convecção através do meio poroso, os resultados de calor e massa removidos pecam por defeito, principalmente para valores de permeabilidade mais elevados, onde o efeito da convecção no meio poroso é mais relevante.

5.4 Comparação de resultados

A Figura 76 mostra a comparação das diversas geometrias estudadas, em termos de calor removido e massa removida para diferentes valores de velocidade de entrada do escoamento interno. Os dados presentes na Figura 76 (exceptuando a velocidade de entrada do escoamento) referem-se às condições reportadas na Tabela 6 (Geometria 1), Tabela 7 (Geometria 2) e Tabela 10 (Geometria 3), considerando dois valores de permeabilidade.

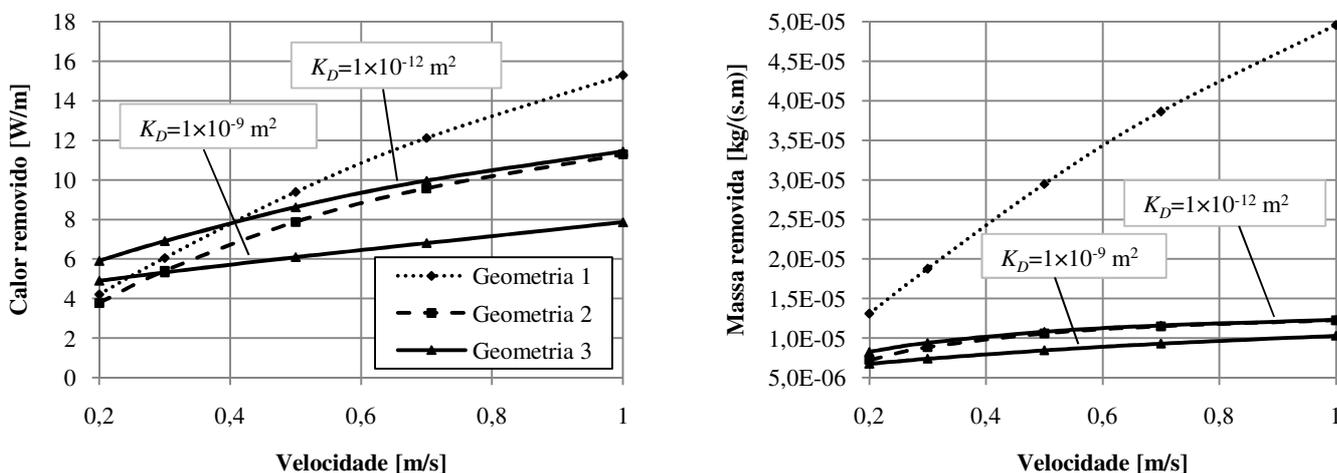


Figura 76- Comparação das três geometrias²⁰ estudadas em termos de calor e massa removidos, para diferentes valores de velocidade; os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 6 (Geometria 1), Tabela 7 (Geometria 2) e Tabela 10 (Geometria 3)

Comparando a Geometria 2 com a Geometria 3 em termos de remoção de calor, verifica-se que os resultados são influenciados por dois principais factores: o caudal mássico circulante e

²⁰ ficheiros *Consol: Modelo 1 - Param - veloc* (Geometria 1); *Modelo 2 - Param - veloc* (Geometria 2); *Modelo 3 - Param - veloc - P=0 K=1e-12* (Geometria 3; $K_D=1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$); *Modelo 3 - Param - veloc - P=0 K=1e-9* (Geometria 3; $K_D=1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$)

o fluxo de calor através da fronteira superior. Para valores baixos de velocidade de entrada do escoamento, em que o gradiente de pressão é mais baixo, há maior remoção de calor com a Geometria 3 devido à presença do meio poroso por onde ocorre condução de calor (cerca de 24% como referido acima; na Geometria 2 considera-se que não existe fluxo de calor através da fronteira superior). No entanto, para valores elevados de permeabilidade ($1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$) e a partir de determinados valores de velocidade de entrada, o efeito do escoamento (sem convecção) através do meio poroso na Geometria 3, torna-se superior ao efeito da condução de calor através da fronteira superior, o que resulta numa menor remoção com a Geometria 3. A Figura 76 mostra também que a introdução da meia nas Geometrias 2 e 3 tem uma forte influência na massa removida da fronteira inferior, como visto anteriormente, principalmente devido à tortuosidade e fracção de volume sólido (ver Figura 65). Na Figura 77 encontra-se representada a influência da temperatura de entrada dos escoamentos, interno e externo (no caso da Geometria 3), no calor e massa removidos da fronteira inferior, para as várias geometrias consideradas.

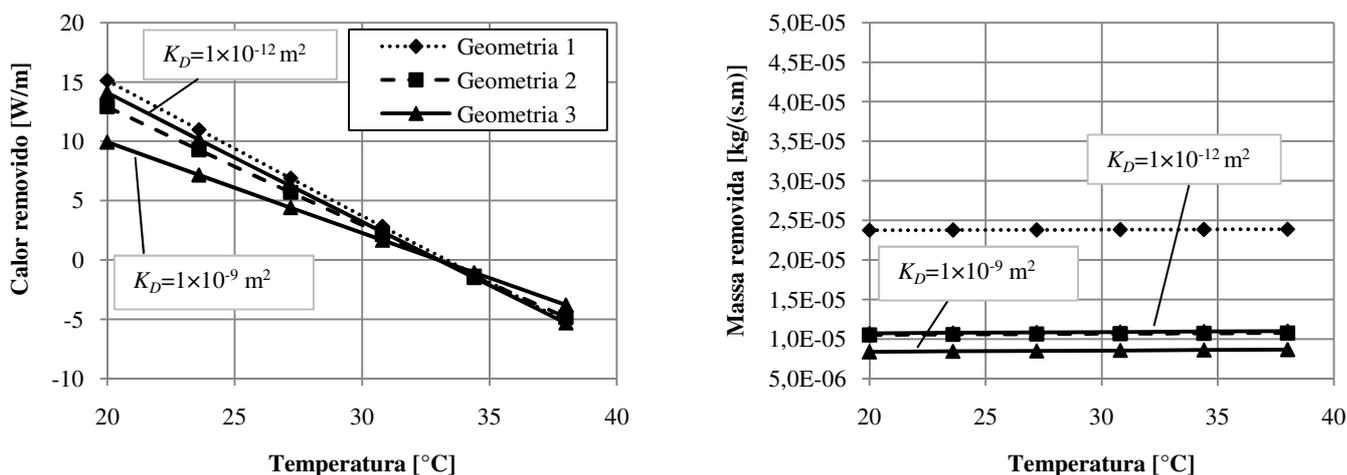


Figura 77- Comparação das três geometrias²¹ estudadas em termos de calor e massa removidos, para diferentes valores de temperatura; os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 6 (Geometria 1), Tabela 7 (Geometria 2) e Tabela 10 (Geometria 3); por uma questão de coerência, para a Geometria 3 a temperatura de entrada dos escoamentos interno e externo, é a mesma

Apesar da presença de permeabilidade, e portanto menor caudal de ar no escoamento interno, na Geometria 3 com baixa permeabilidade ($K_D = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$) é removida maior quantidade de calor devido à condução de calor através do meio poroso. No entanto, para as velocidades de entrada em questão, caso se considere o material *nylon* com permeabilidade na gama $10^{-9} - 10^{-12} \text{ m}^2$ para descrever o subdomínio poroso, verifica-se que o calor removido apresenta um comportamento próximo do obtido com a Geometria 2. A Figura 78 apresenta os valores de calor e massa removidos, em função da humidade relativa à entrada dos escoamentos interno e externo, para as geometrias estudadas.

²¹ ficheiros *Consol: Modelo 1 - Param - temp* (Geometria 1); *Modelo 2 - Param - temp* (Geometria 2); *Modelo 3 - Param - temp - P=0 K=1e-12* (Geometria 3; $K_D = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$); *Modelo 3 - Param - temp - P=0 K=1e-9* (Geometria 3; $K_D = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$)

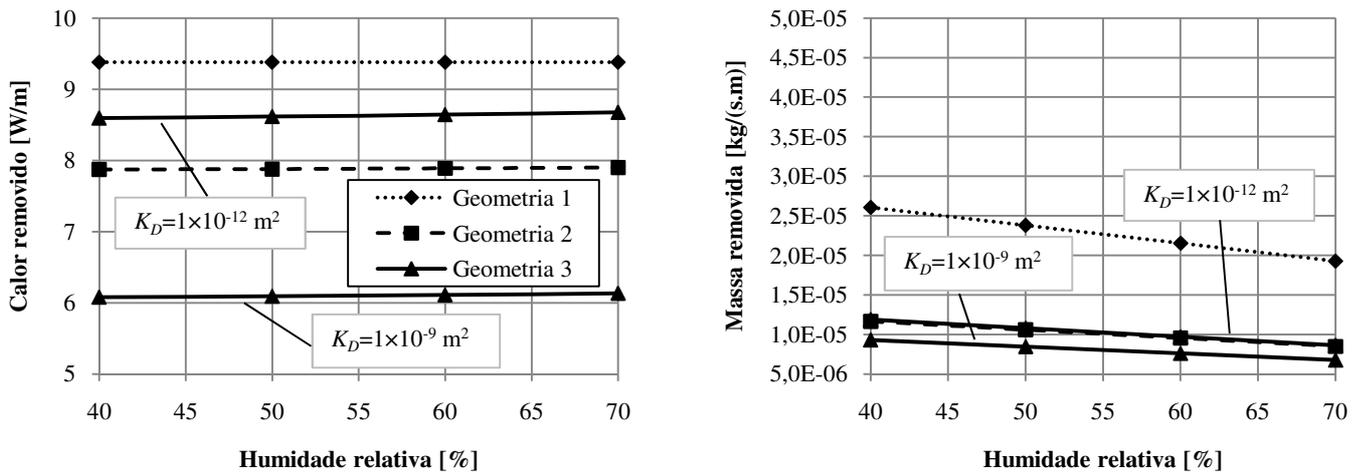


Figura 78- Comparação das três geometrias²² estudadas em termos de calor e massa removidos, para diferentes valores de humidade relativa; os valores apresentados têm por base as condições de fronteira dadas pela Tabela 6 (Geometria 1), Tabela 7 (Geometria 2) e Tabela 10 (Geometria 3); por uma questão de coerência, para a Geometria 3 a humidade relativa de entrada dos escoamentos interno e externo, é a mesma

Para a gama de humidade relativa considerada, e para baixas permeabilidades ($K_D=1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$), a massa removida da fronteira inferior na Geometria 3 é idêntica à massa removida no caso da Geometria 2. Isto acontece porque, apesar de o caudal (do escoamento interno) ser menor na Geometria 3 (o que, por si só, origina menor remoção ao longo da meia), existe difusão de massa através do meio poroso, o que compensa o efeito da diminuição de caudal. O mesmo não se passa em relação ao calor removido, uma vez que a remoção de calor da fronteira inferior não é a mesma com ambas as geometrias (Figura 78). Este facto indica que a utilização da Geometria 2 (em vez da 3), como forma de reduzir o esforço computacional, não é adequado/aceitável.

²² ficheiros Comsol: Modelo 1 - Param - RH (Geometria 1); Modelo 2 - Param - RH (Geometria 2); Modelo 3 - Param - RH - P=0 K=1e-12 (Geometria 3; $K_D=1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$); Modelo 3 - Param - RH - P=0 K=1e-9 (Geometria 3; $K_D=1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$)

6 Conclusões

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de construir um modelo capaz de descrever os principais fenómenos de transferência de calor e de massa em torno de um pé, para estudar a influência de vários parâmetros no calor e massa removidos. Através da comparação das três geometrias estudadas, foi possível perceber a importância dos domínios incorporados.

Através da descrição das propriedades de massa e calor segundo uma análise do tipo volume de controlo ao domínio do têxtil e ao domínio do calçado, a Geometria 3 permite descrever de forma detalhada os principais fenómenos de transferência de calor e de massa, desde a superfície da pele ao ambiente circundante do calçado.

Foram feitas várias simulações paramétricas de forma a estudar a importância de diversos parâmetros no calor e massa removidos do pé. Verificou-se que a tortuosidade e a fracção de volume sólido do têxtil são os parâmetros que mais influenciam a transferência de calor e massa. A velocidade do escoamento interno apresenta também forte influência no calor e massa removidos do pé.

A permeabilidade do calçado é um parâmetro com elevada influência no calor e massa removidos do pé, na medida em que afecta o caudal de ar que circula acima da meia, daí que este parâmetro seja de primordial importância para a escolha das características do ventilador. Embora a diminuição da permeabilidade provoque uma redução da difusividade do vapor de água através do calçado, esta redução é compensada pelo maior caudal circulante acima da meia. Conclui-se também que, indirectamente, a permeabilidade é também importante na definição do sistema de alimentação a usar, na medida em que afectará a sua autonomia.

Na Geometria 3, para que possa ser removido calor e massa do pé, a permeabilidade do meio poroso no máximo deverá ser tal, que permita a circulação de caudal de ar sobre a meia. No entanto, na geometria real existirão perdas de carga localizadas ao qual está associado um gradiente de pressão entre a entrada e saída mais elevado, o que terá como consequência, que um maior caudal de ar fluirá através do subdomínio poroso. Por isso, para que possa ser removida a quantidade de calor e massa necessários, a permeabilidade máxima admissível terá que ser nesse caso inferior.

A reduzida percentagem de calor e massa através do subdomínio do calçado é devida à ausência de convecção através do calçado e à velocidade do escoamento interno relativamente elevada, o que leva a concluir que a condutividade térmica do calçado e a difusividade de vapor de água através do calçado não sejam parâmetros que influenciem de forma significativa a remoção de calor e massa.

Os modelos implementados permitem a simulação dos fenómenos de transferência de calor e de massa em diferentes zonas do corpo humano, por exemplo, considerando peças de vestuário.

7 Trabalhos Futuros

Ao longo deste trabalho verificou-se que em regime transiente os modelos pré-definidos não se adaptavam às equações a implementar, bem como, não permitiam simular o efeito da convecção através de um domínio poroso. Por este motivo, como trabalhos futuros torna-se necessário a implementação do efeito da convecção. Após a adaptação dos modelos à simulação em regime transiente, seria interessante verificar com reagem os têxteis ao efeito de mudanças súbitas de temperatura e/ou de humidade relativa.

Para tornar o modelo ainda mais completo, poder-se-á incluir o transporte de massa através das fibras do têxtil, o efeito da capilaridade e a permeabilidade do calçado em função da porosidade.

Com o objectivo de encontrar uma solução de compromisso entre a precisão de resultados e o esforço computacional requerido, torna-se necessário estudar em *3D* a importância de vários parâmetros.

Por fim, será necessária a optimização do sistema de arrefecimento do calçado em termos de consumos energéticos e remoção de calor/massa.

Referências

- [1] CeNTI. (2011). "Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes." Acedido a 19/01/2011, de http://www.centi.pt/content/view/26/38/lang.pt_PT/.
- [2] Bailey, R., Fisher, R., e Hoffberg, S. (2008). Intelligent footwear. ProMDX Technology, Inc., New York, (US). U.S. patent 7395614
- [3] Afonso, C. (2007). Refrigeração. Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. p. 65-76, 84-92.
- [4] Chen, S. (1994). Shoe with a built-in cooling apparatus. U.S. patent 5367788
- [5] Silva, R., Ferreira, M., Pinto, V., Pereira, C., Sousa, F., Guerreiro, R., e Pereira, F. (2010). Actuating system for active and autonomous control of the temperature inside the footwear. Simões, J. PCT/PT2010/000002.
- [6] Ricco, B. e Valori, D. (2003). Shoe with an active air-conditioning device. U.S. patent 6594917
- [7] Regen, P. (2004). Systems and Methods for Ventilation of Footwear. Boys, D. PCT/US2004/013129.
- [8] Sessa, R. (1995). Footwear sole with bulbous protrusions and pneumatic ventilation. U.S. patent 5400526
- [9] Lin, C. (2006). Air-ventilating insole. U.S. application number 2006/0032082.
- [10] Polycarpe, P. (2000). Climate controlled shoe. U.S. patent 6041518
- [11] Shows, M. (2006). Foot pain-relieving articles and methods thereof. U.S. patent 7017283
- [12] Shows, M. (2009). Foot pain-relieving articles and method thereof. U.S. patent 7497032.
- [13] Proetex. (2009). "Heat and Temperature Functions." Acedido a 01/10/2010, de <http://www.proetex.org/final%20proetex%20learning/heat%20and%20temperature.htm>.
- [14] Shop, J.T. (2010). "Cool Cushion - Car Seat Fan Cooler." Acedido a 19/10/2010, de <http://www.japantrendshop.com/cool-cushion-car-seat-fan-cooler-p-565.html>.
- [15] Nike. "Nike Precool Vest." Acedido a 19/10/2010, de <http://www.nike.com/nikelab/site.html#/product/precool-vest/detail>.
- [16] Outlast. (2010). "PCM technology for highest demands." Acedido a 01/10/2010, de <http://www.outlast.com/index.php?id=95&L=0>.
- [17] Carson, M., Rouen, M., Lutz, C., e McBarron, J. (2010). "Extravehicular Mobility Unit." Acedido a 20/12/2010, de <http://history.nasa.gov/SP-368/s6ch6.htm>.
- [18] N.A.S.A. (2009). Liquid Cooling and Ventilation Garment, N.A.S.A.

- [19] Stomatex. (2010). "Stomatex Technology." Acedido a 01/10/2010, de <http://www.stomatex.com/faqs.htm>.
- [20] Gupta, S. (2008). "All Weather Clothing." Acedido a 17/10/2010, de <http://www.techexchange.com/thelibrary/allweather.html>.
- [21] Tanabe, S., Arens, E., Bauman, F., Zhang, H., e Madsen, T. (1994). "Evaluating Thermal Environments by Using a Thermal Manikin with Controlled Skin Surface Temperature." *ASHRAE Transactions* 100(1): 39-48.
- [22] Atmaca, I. e Yigit, A. (2006). "Predicting the effect of relative humidity on skin temperature and skin wettedness." *Journal of Thermal Biology* 31(5): 442-452.
- [23] Taylor, N., Caldwell, J., e Mekjavic, I. (2006). "The sweating foot: Local differences in sweat secretion during exercise-induced hyperthermia." 77(10): 8.
- [24] Kerassidis, S. (1994). "Is palmar and plantar sweating thermoregulatory?" *Acta Physiologica Scandinavica* 152(3): 259-263.
- [25] Weiner, J. (1945). "The regional distribution of sweating." *The Journal of Physiology* 104(1): 32-40.
- [26] Grahn, D., Dillon, J., e Heller, H. (2009). "Heat Loss Through the Glabrous Skin Surfaces of Heavily Insulated, Heat-Stressed Individuals." 131(7).
- [27] Rebay, M., Arfaoui, A., e Taiar, R. (2008). Thermo-mechanical characterisation of the interaction foot-athletic shoe during the exercise. 5th European Thermal-Sciences Conference. Netherlands.
- [28] Raznjevic, K. (1970). *Tables et Diagrammes Thermodynamiques*, Editions Eyrolles. p. 117,118.
- [29] Comsol (2005). *Chemical Engineering Module - User's Guide*, Comsol.
- [30] White, F. (2003). *Fluid Mechanics*. Boston, McGraw-Hill. p. 260.
- [31] Incropera, F., Dewitt, D., Bergman, T., e Lavine, A. (2008). *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. p. 325.
- [32] Chen, R. (1973). "Flow in the Entrance Region at Low Reynolds Numbers." *J. Fluids Eng.* 95: 153-158.
- [33] Rohsenow, W., Hartnett, J., e Cho, Y. (1998). *Forced Convection, Internal Flow in Ducts*. *Handbook of Heat Transfer*, McGraw-Hill.
- [34] Atkinson, B., Brocklebank, M., Card, C., e Smith, J. (1969). "Low Reynolds number developing flows." *A.I.Ch.E. Journal* 15(4): 548-553.
- [35] Barber, R. e Emerson, D. (2001). A numerical investigation of low Reynolds number gaseous slip flow at the entrance of circular and parallel plate micro-channels. *European Community on Computational Methods in Applied Sciences*. Swansea, ECCOMAS: 1-20.

- [36] Skelland, A. (1974). *Mass Transfer in Laminar Flow*. Diffusional mass transfer New York, Wiley: 176-179.
- [37] Fiala, D., Lomas, K., e Stohrer, M. (2001). "Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions." *International Journal of Biometeorology* 45(3): 143-159.
- [38] ASHRAE (2009). *Mass Transfer*. ASHRAE Handbook—Fundamentals. 1: 2.
- [39] Gibson, P. e Charmchi, M. (1996). "The Use of Volume-Averaging Techniques to Predict Temperature Transients Due to Water Vapor Sorption in Hygroscopic Porous Polymer Materials." *Journal of Applied Polymer Science* 64: 493-505.
- [40] Morton, W. e Hearle, J. (2008). *Physical Properties of Textile Fibres*. Cambridge, Woodhead Publishing Limited. p. 169.
- [41] Gibson, P. e Charmchi, M. (1997). "Modeling Convection/Diffusion Processes in Porous Textiles With Inclusion of Humidity-Dependent Air Permeability." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 24(5): 709-724.
- [42] ToolBox, T.E. (2011). "Thermal Conductivity of some common Materials." Acedido a 13/01/2011, de http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html.
- [43] Frydrych, I., Dziworska, G., e Bilaska, J. (2002). "Comparative Analysis of the Thermal Insulation Properties of Fabrics Made of Natural and Man-Made Cellulose Fibres." *Fibres & Textiles in Eastern Europe*: 40-44.
- [44] Ogden. (2011). "Physical Properties of Materials." Acedido a 13/01/2011, de <http://www.ogdenmfg.com/pdf/tech9.pdf>.
- [45] Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford, Oxford University Press. p. 352,353.
- [46] Comsol (2008). *Chemical Engineering Module. User's Guide*, Comsol.
- [47] Gibson, P. e Pan, N. (2006). *Thermal and moisture transport in fibrous materials*. Cambridge, Woodhead Publishing Limited. p. 284.
- [48] Liu, H., Patil, P., e Narusawa, U. (2007). "On Darcy-Brinkman Equation: Viscous Flow Between Two Parallel Plates Packed with Regular Square Arrays of Cylinders." *Entropy* 9: 118-131.
- [49] Nield, D. e Bejan, A. (2006). *Convection in Porous Media*, Springer. p. 10.
- [50] Chawla, K. (1998). *Fibrous Materials*. Cambridge, Cambridge University Press. p. 25, 44.
- [51] Medeiros, J., Marcondes, F., e Gurgel, J. (1998). Convecção natural numa cavidade porosa utilizando o modelo generalizado com porosidade variável. VII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas Rio de Janeiro.
- [52] Ingham, D. e Pop, I. (2005). *Transport Phenomena in Porous Media*, Elsevier. p. 428.

- [53] Nield, D. (2004). "Comments on 'A New Model for Viscous Dissipation in Porous Media Across a Range of Permeability Values'." *Transport in Porous Media* 55: 253-254.
- [54] Al-Hadhrami, A. (2003). "A New Model for Viscous Dissipation in Porous Media Across a Range of Permeability Values." *Transport in Porous Media* 53: 117-122.
- [55] Russel, S. e Mao, N. (2003). "Anisotropic liquid absorption in homogeneous two-dimensional nonwoven structures." *Journal of Applied Physics* 94(6): 4135-4138.
- [56] 9237:1995(E), I. (1995). *Textiles - Determination of the permeability of fabrics to air*.
- [57] ASTM Standard Test Method for Air Permeability of Textile Fabrics. ASTM D737-96.
- [58] BS (1978). *Method of test for the determination of the permeability of fabrics to air*. BS 5636:1978.
- [59] DIN (1987). *Testing of Textiles - Determination of the Air Permeability of Fabrics*. DIN 53887.

Anexo A – Testes de Grelha

A. 1 - Geometria referente à validação analítica de resultados

De forma a identificar a malha adequada para a resolução do problema respeitante à Figura 21, foi analisada a evolução da temperatura, velocidade e concentração para refinamentos progressivos da malha. Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 79.

Tabela 13- Número de elementos das grelhas e respectiva associação às figuras abaixo

Grelha	Nº de Elementos	Formato
1	92
2	368	- - - -
3	1472	- - - -
4	5888	- - - -
5	23552	- - - -
6	94208	————

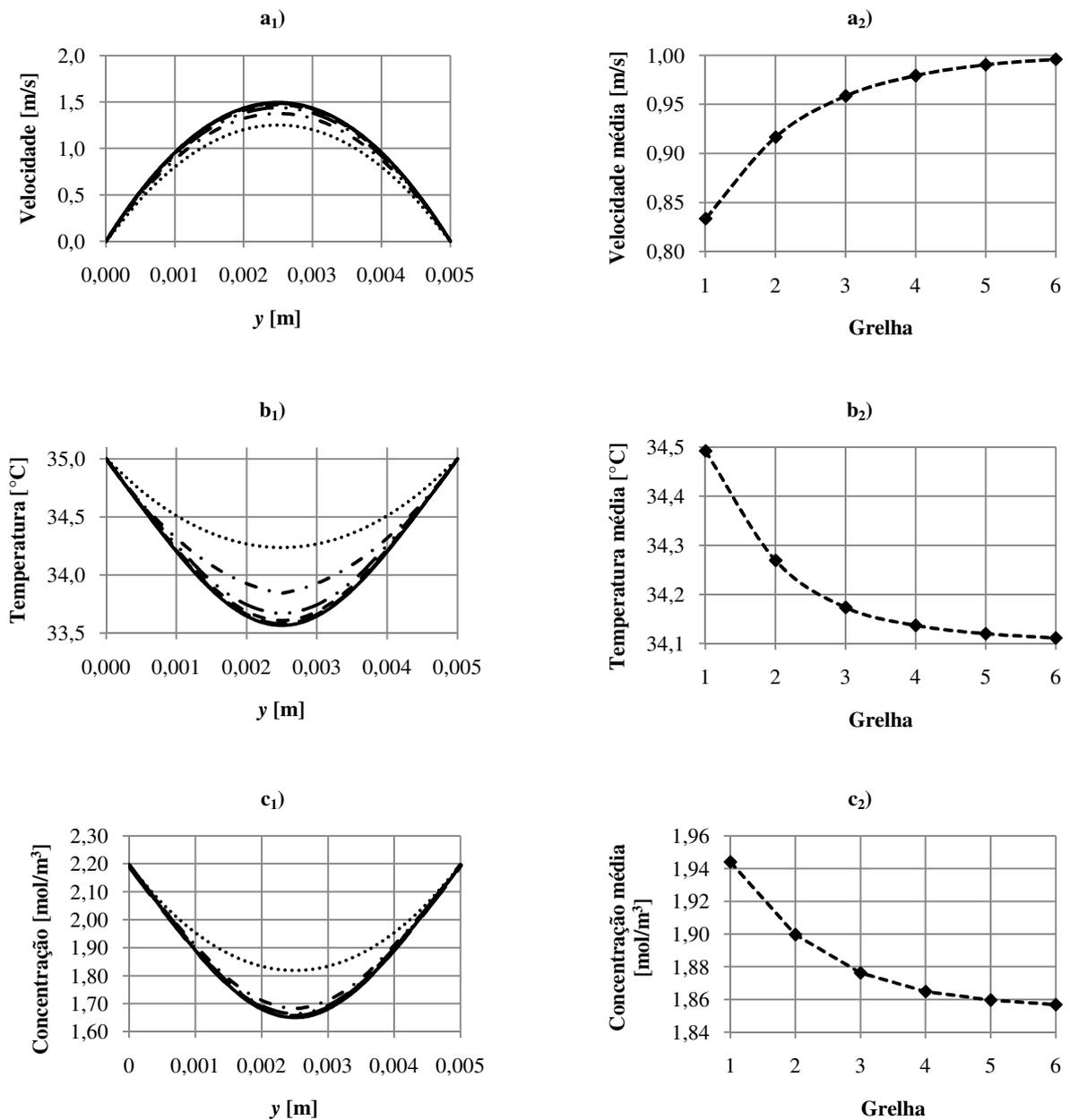


Figura 79- Perfis (índice 1) e valores médios (índice 2) na secção de saída de a) velocidade, b) temperatura e c) concentração de vapor de água

Após os testes de grelha, a Grelha 6 foi considerada adequada para resolver o problema, já que o tempo de computação para este tipo de geometria é relativamente curto (inferior a 5 minutos). Para a obtenção da grelha 6, inicialmente é definido o tamanho da malha, seleccionando *Extremely coarse* em *Free Mesh Parameters*. Posteriormente, a malha é obtida através de refinamentos sucessivos até a malha corresponder a 94208 elementos.

A. 2 - Geometria 1

De forma análoga ao realizado no Anexo A. 1, é identificada a malha adequada à resolução da Geometria 1. Aqui, foi também analisada a evolução da temperatura, velocidade e concentração para refinamentos progressivos da malha. Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 80.

Tabela 14- Número de elementos das grelhas e respectiva associação às figuras abaixo

Grelha	Nº de Elementos	Formato
1	4608	-----
2	18432	- - - - -
3	73728	—————

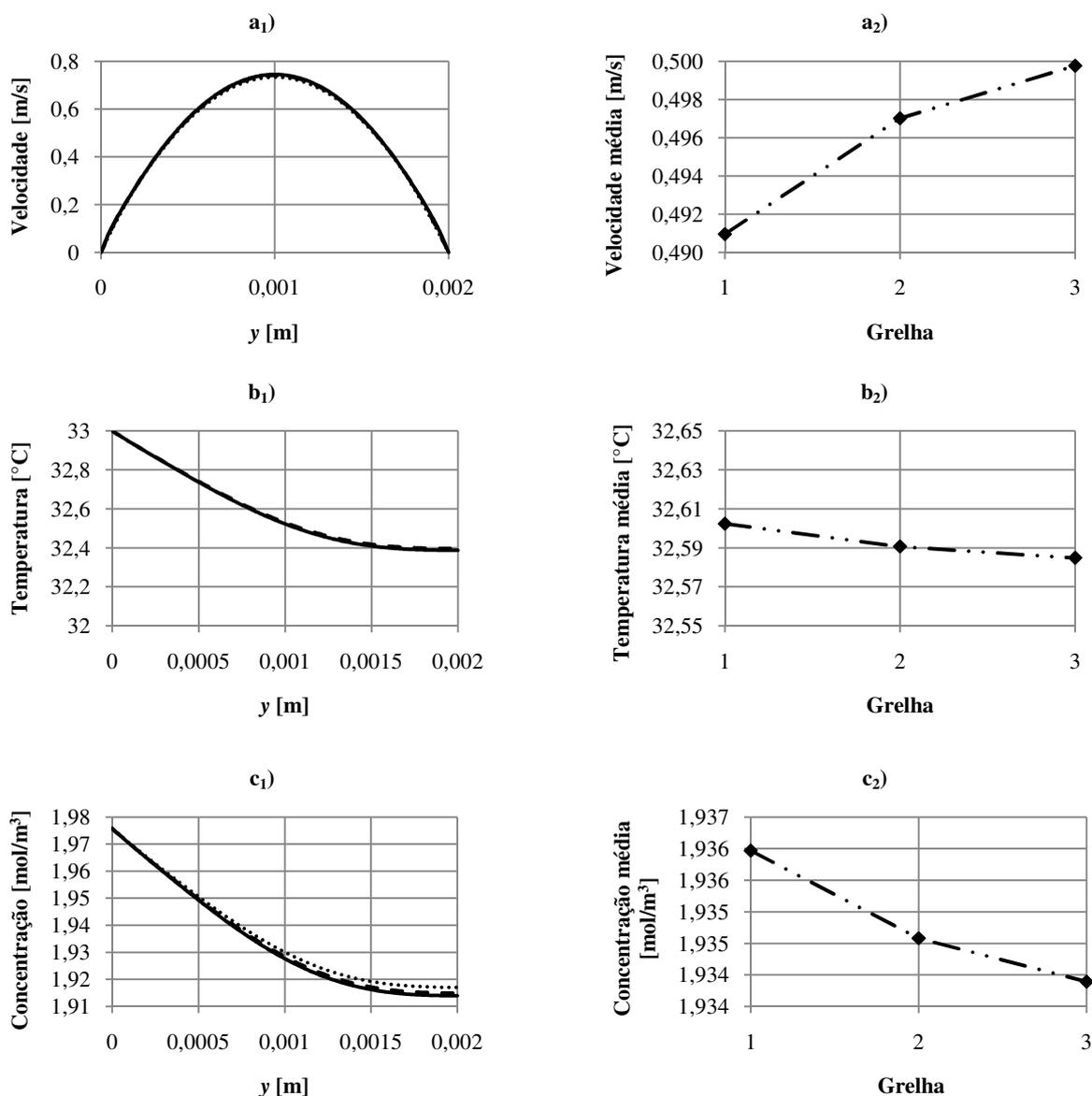


Figura 80- Perfis (índice 1) e valores médios (índice 2) na secção de saída de a) velocidade, b) temperatura e c) concentração de vapor de água

Após os testes de grelha, a Grelha 3 foi considerada adequada para resolver o problema, já que o tempo de computação para este tipo de geometria é relativamente curto (inferior a 5 minutos). Para a obtenção da grelha 3, inicialmente é definido o tamanho da malha, seleccionando *Extremely coarse* em *Free Mesh Parameters*. Posteriormente, a malha é obtida através de refinamentos sucessivos até a malha corresponder a 73728 elementos.

A. 3 - Geometria 2

Os resultados obtidos para a análise da evolução da temperatura, velocidade e concentração na secção de saída relativa ao escoamento e para refinamentos progressivos da malha apresentam-se na Figura 81.

Tabela 15- Número de elementos das grelhas e respectiva associação às figuras abaixo

Grelha	Nº de Elementos	Formato
1	6368	-----
2	25472	— — —
3	101888	—————

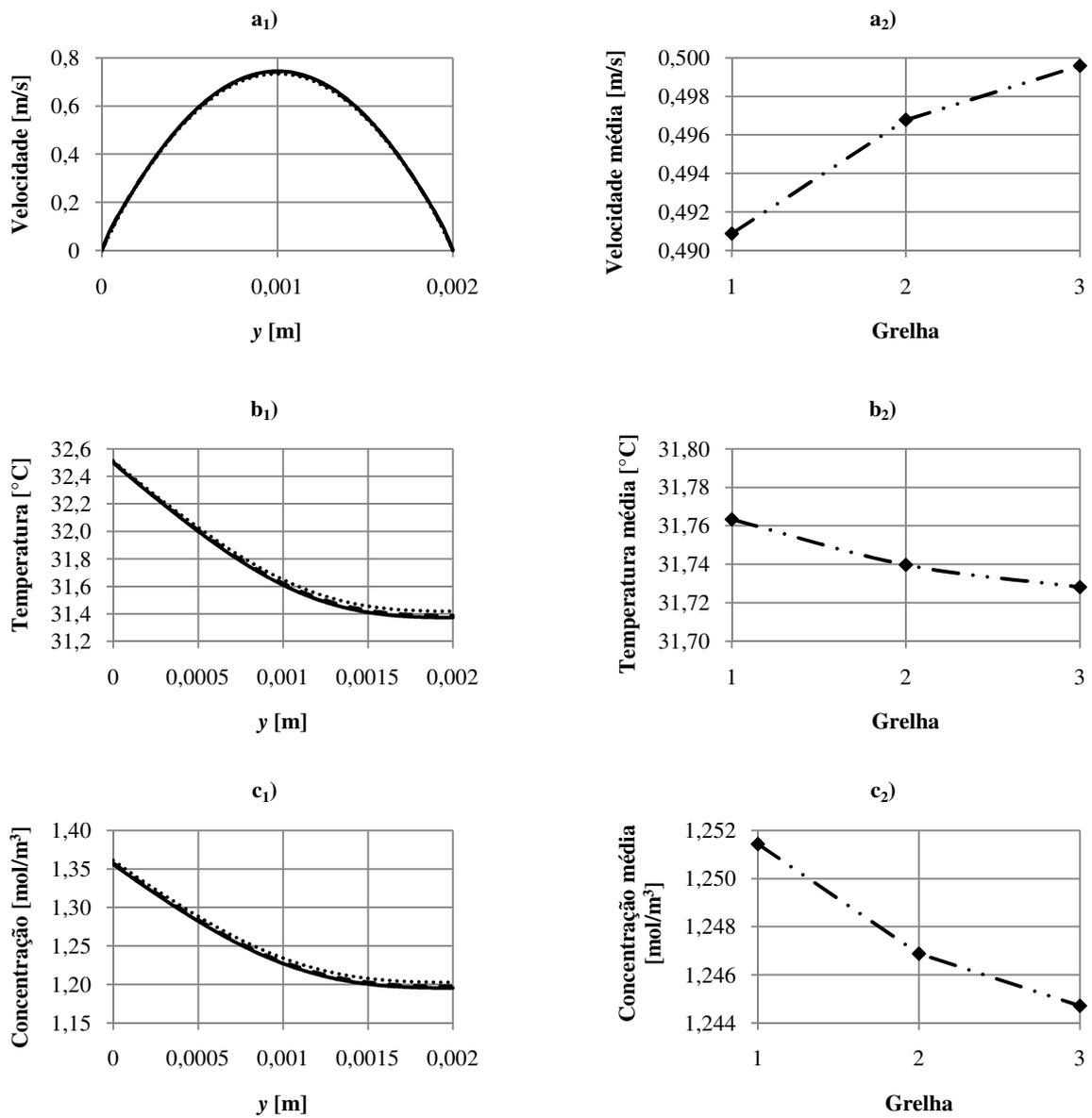


Figura 81- Perfis (índice 1) e valores médios (índice 2) na secção de saída de a) velocidade, b) temperatura e c) concentração de vapor de água

Visto existir um subdomínio têxtil, é também analisado o perfil de temperatura e concentração ao longo de toda a secção média vertical ($x=0,05\text{m}$), representado através da Figura 82.

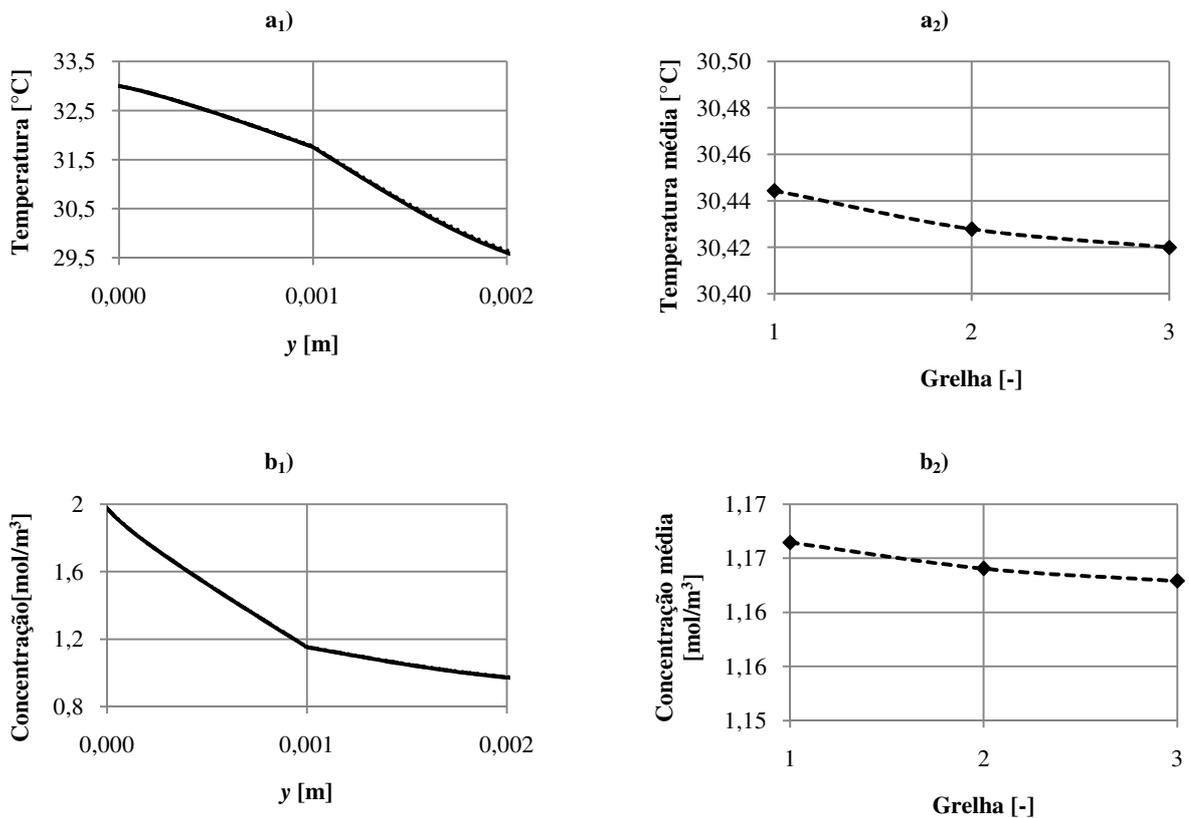


Figura 82- Perfis (índice 1) e valores médios (índice 2) na secção de média vertical ($x=0,05m$) de a) temperatura e b) concentração de vapor de água

Após os testes de grelha, a Grelha 3 foi considerada adequada para resolver a Geometria 2. Esta grelha é obtida, definindo o tamanho da malha, seleccionando *Extremely coarse* em *Free Mesh Parameters*. Posteriormente, a malha é obtida através de refinamentos sucessivos até a malha corresponder a 101888 elementos.

A. 4 - Geometria 3

Para a escolha da malha adequada à Geometria 3 é analisado o perfil de temperaturas e concentração na fronteira 8 (ver Figura 68). São analisados os perfis de temperatura e concentração na secção média vertical ($x=0,05m$) do subdomínio do calçado e do ambiente (Figura 84). Por último, é também analisado na secção média vertical o perfil de velocidades do escoamento externo e o “perfil de velocidades” de Darcy no subdomínio poroso na mesma secção (Figura 85). Os resultados são apresentados para o caso de permeabilidade $0,9 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ do meio poroso e pressão à saída do escoamento interno de 0 Pascal.

Tabela 16- Número de elementos das grelhas e respectiva associação às figuras abaixo

Grelha	Nº de Elementos	Formato
1	16560	-----
2	66240	- - - -
3	264960	————

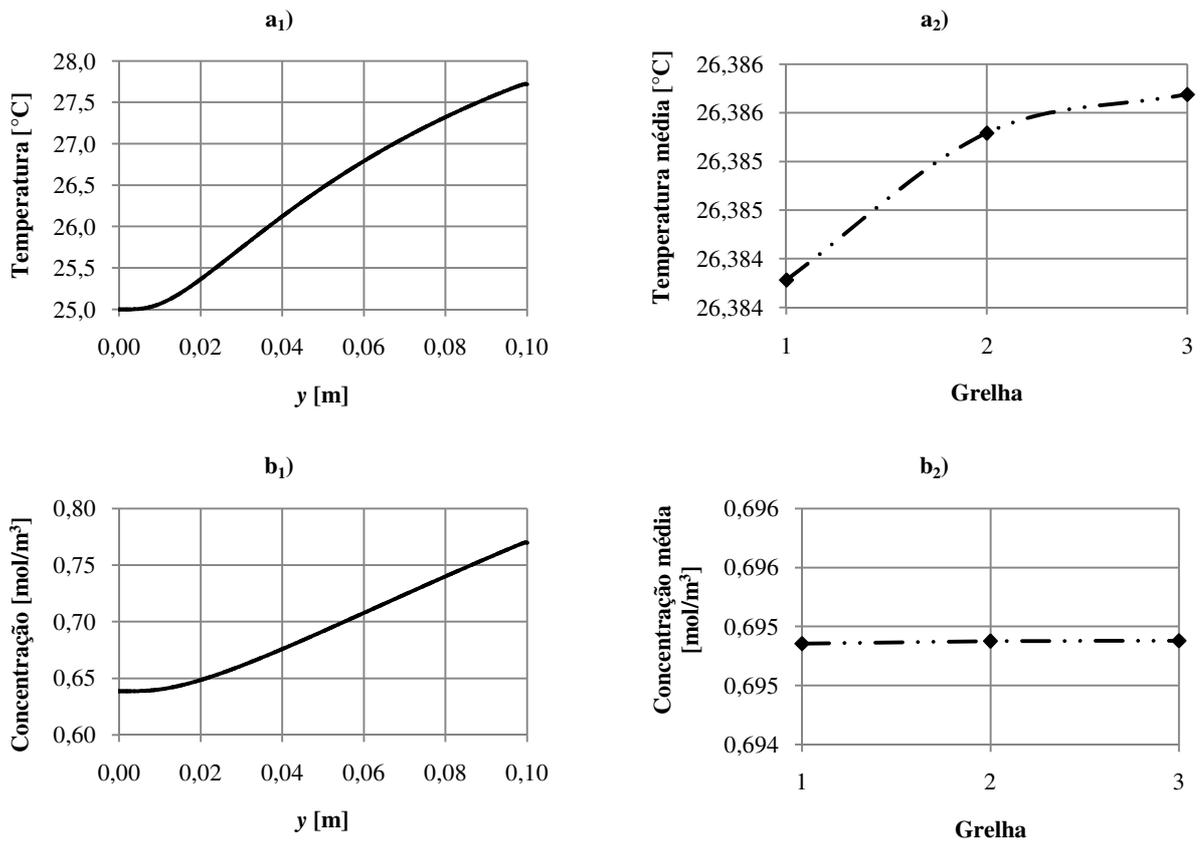


Figura 83- Perfis (índice 1) e valores médios (índice 2) na fronteira 8 (ver Figura 68) de a) Temperatura e b) Concentração de vapor de água

A distribuição de temperatura e concentração na secção média vertical do subdomínio do calçado e do ambiente é representada na Figura 84.

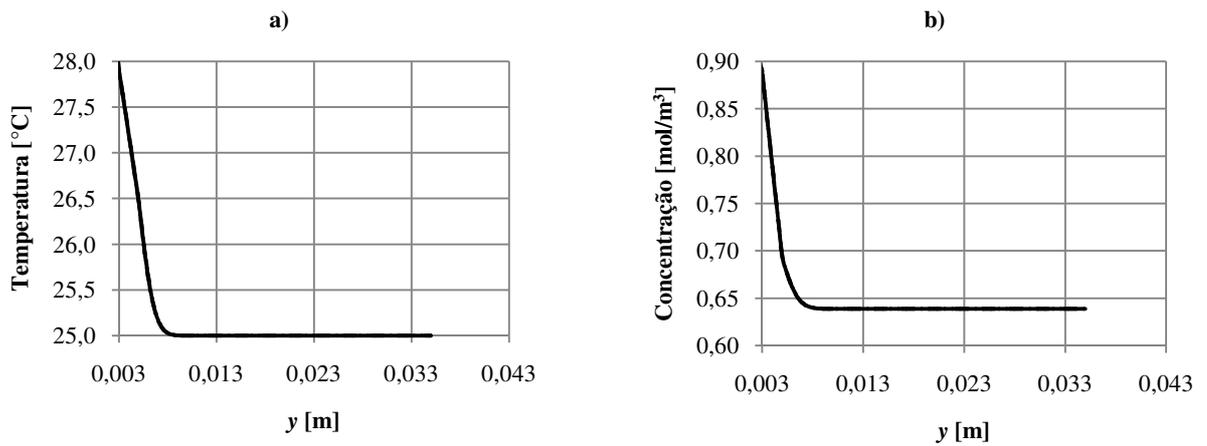


Figura 84- Perfis na secção média vertical ($x=0,05\text{m}$) do calçado e do ambiente de a) Temperatura e b) Concentração de vapor de água

A “distribuição de velocidades” de Darcy na secção média vertical do subdomínio poroso é dada pela Figura 85.

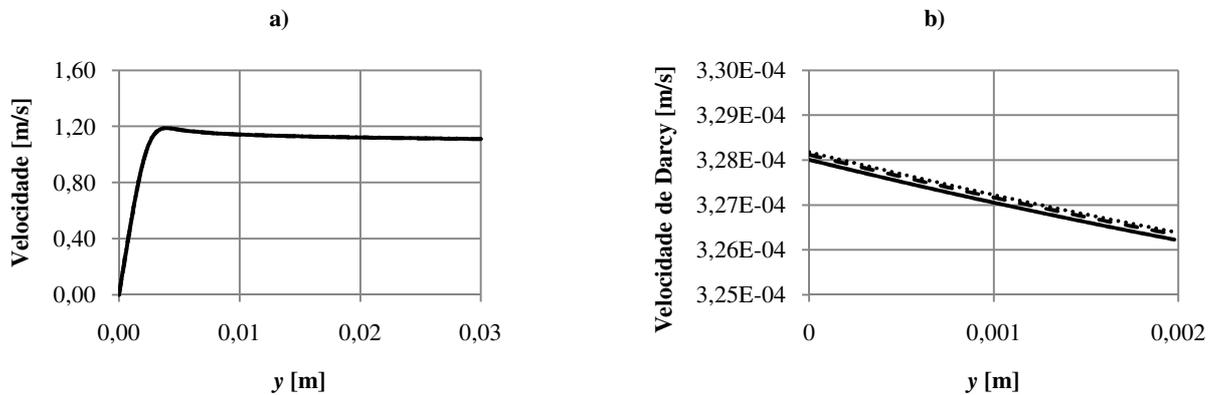


Figura 85- a) Perfil de velocidades na secção $x=0,05\text{m}$ do subdomínio relativo ao escoamento externo b) “Perfil de velocidades” de Darcy na secção $x=0,05\text{m}$ do subdomínio relativo ao meio poroso

Para esta geometria, foi considerada como grelha adequada, a Grelha 3. Exceptuando a opção *Free Mesh Parameters*, que neste caso é definida *Normal*, a Grelha 3 é obtida de forma similar às geometrias 1 e 2, através de refinamentos sucessivos.

Anexo B – Tempos de computação

A Tabela 17 apresenta os tempos de computação, e respectivo número de elementos da malha para as várias geometrias estudadas. Devido ao reduzido tempo de computação destas geometrias, estas foram resolvidas através da resolução simultânea dos vários fenómenos presentes (escoamento, transferência de calor e transferência de massa), daí que os tempos de computação possam ser ainda mais reduzidos através de resolução sequencial dos vários fenómenos. De notar ainda que, os tempos de computação apresentados encontram-se sobrestimados, uma vez que o *hardware* utilizado foi partilhado por vários utilizadores.

Tabela 17- Tempos de computação, nº de elementos da malha e memória RAM utilizada para as várias geometrias estudadas

Geometria	Tempo [minutos]	Nº de elementos da malha	Memória (RAM) utilizada (GB) (aproximadamente)
1	4	73728	2
2	8	101888	3
3	30	264960	10

Na Tabela 18 encontram-se descritas as principais especificações técnicas do hardware utilizado.

Tabela 18- Principais especificações técnicas do *hardware* utilizado

Memória (RAM)	Processador
24 GB	Intel® Core™ i7 950 @3,07 GHz

Anexo C – Equações - base dos modelos utilizados

Os modelos utilizados no estudo numérico têm por base as equações de *Navier- Stokes*, a equação da conservação da massa, a equação da energia, a lei de Fick, e a lei de Darcy.

O modelo utilizado para descrever o movimento de fluidos²³, tem por base as equações de Navier-Stokes, e a equação da conservação da massa. As equações de Navier-Stokes no seu formato geral, apresentam a seguinte forma:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + \eta(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F \quad (43)$$

em que ∂ é o operador diferencial, ∇ é o operador divergente relativo aos graus de liberdade e F são as forças de volume actuantes. A equação da conservação da massa é definida por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot u) = 0 \quad (44)$$

As equações de Navier-Stokes quando combinadas com a equação da conservação da massa, fornecem a descrição do escoamento para fluidos incompressíveis Newtonianos. O modelo de transferência de calor utilizado²⁴ tem por base a equação da energia definida abaixo:

$$\rho \cdot Cp \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k\nabla T) = S + q_s \cdot T - \rho \cdot Cp \cdot u \cdot \nabla T \quad (45)$$

em que S é a fonte de calor e q_s é o coeficiente de produção/absorção de calor. Relativamente à transferência de massa, o modelo utilizado²⁵ tem por base a lei de Fick:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \cdot \nabla c_i) = R_i - u\nabla c_i \quad (46)$$

em que R_i é a taxa de reacção da espécie i . Em regime estacionário, ausência de reacções internas e inexistência de convecção, a Eq. (46) apresenta a seguinte forma:

$$\nabla \cdot (D_i \cdot \nabla c_i) = 0 \quad (47)$$

As equações descritas anteriormente são as equações utilizadas nos três modelos do *Comsol* usadas neste documento. No entanto, as equações que descrevem a ponte entre transporte de calor e de massa num subdomínio têxtil apresentam ligeiras alterações [39]. Considerando o

²³ *Chemical Engineering Module > Momentum Transport > Laminar Flow*

²⁴ *Heat Transfer Module > General Heat Transfer*

²⁵ *Chemical Engineering Module > Mass Transport > Convection and Diffusion*

regime transiente, o termo fonte de calor (S) no subdomínio têxtil presente na Geometria 2 e 3, toma a forma [39]:

$$S = (h_l + h_{vap}) \cdot \dot{m}_{sv} \quad (48)$$

em que h_l (J/kg) é a entalpia de desorção da fase sólida para a fase líquida, h_{vap} (J/kg) é a entalpia de vaporização e \dot{m}_{sv} [kg/(s · m³)] o caudal mássico de desorção da fase sólida para a fase de vapor. Por outro lado a conservação da massa de água é descrita por [39]:

$$\rho_w \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_{bw}) + \dot{m}_{sv} = 0 \quad (49)$$

enquanto que a equação para o transporte de massa toma a seguinte forma [39]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_\gamma \cdot c_v) + \nabla \cdot (-D_{ef} \cdot \nabla c_v) = \frac{\dot{m}_{sv}}{c_v} \quad (50)$$

Porém, como foi considerado apenas regime estacionário, resulta da Eq. (49) que $\dot{m}_{sv} = 0$ e portanto, a Eq. (50) reduz-se à Eq. (47). Ou seja, o modelo de transferência de massa empregue, é válido apenas para estado estacionário. Para a simulação em estado transiente, seria necessário recorrer a modelos que permitam a manipulação das equações (no Comsol denominados por *PDE*) para introduzir a Eq. (49) e adaptar o modelo de transferência de massa de modo a corresponder à Eq. (50).

A lei de Darcy já foi explicitada na página 63, daí que não seja aqui referida novamente.

Anexo D - Distribuição dos parâmetros ao longo da Geometria 3

Neste anexo encontram-se representados a distribuição de alguns parâmetros respeitantes à Geometria 3, com especial destaque para o que ocorre no subdomínio poroso. As figuras aqui representadas referem-se às condições de fronteira reportadas pela Tabela 10, e considerando as características do algodão e do *nylon* para o subdomínio da meia e para o subdomínio poroso, respectivamente (Tabela 8). Para o subdomínio poroso, foi considerada a permeabilidade de $0,9 \times 10^{-11} \text{ m}^2$. A distribuição da humidade relativa ao longo do domínio encontra-se representada na Figura 86.

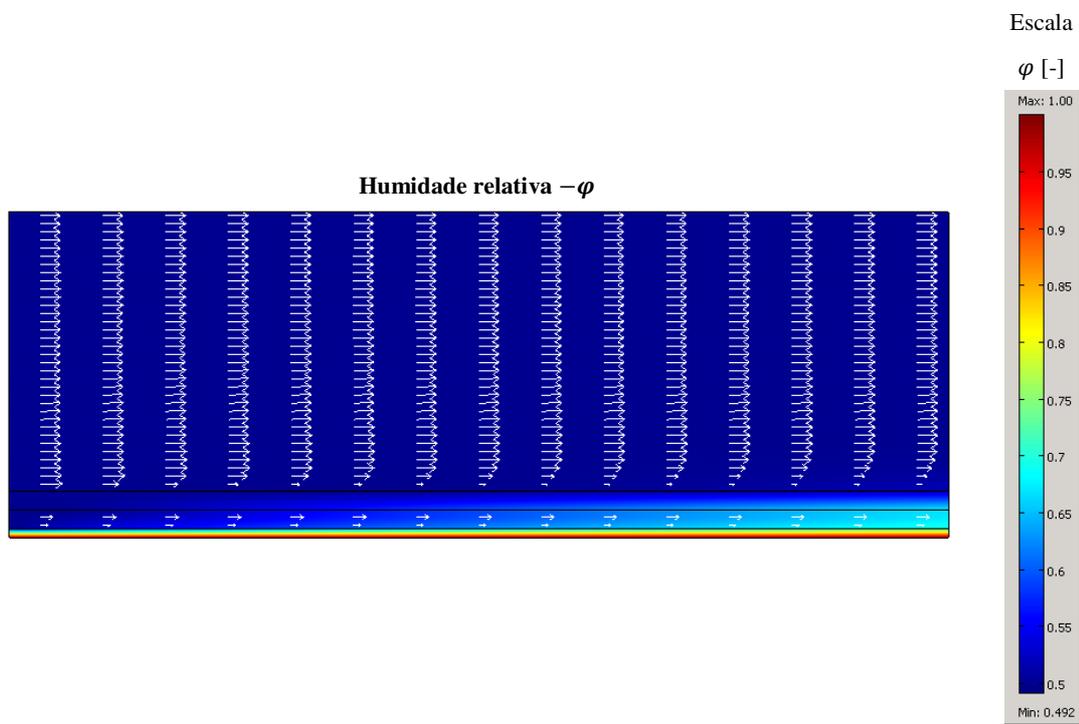


Figura 86- Distribuição da humidade relativa ao longo do domínio

Na Figura 87 encontra-se representada a distribuição da condutividade térmica da fibra e a condutividade térmica efectiva do têxtil no subdomínio poroso.

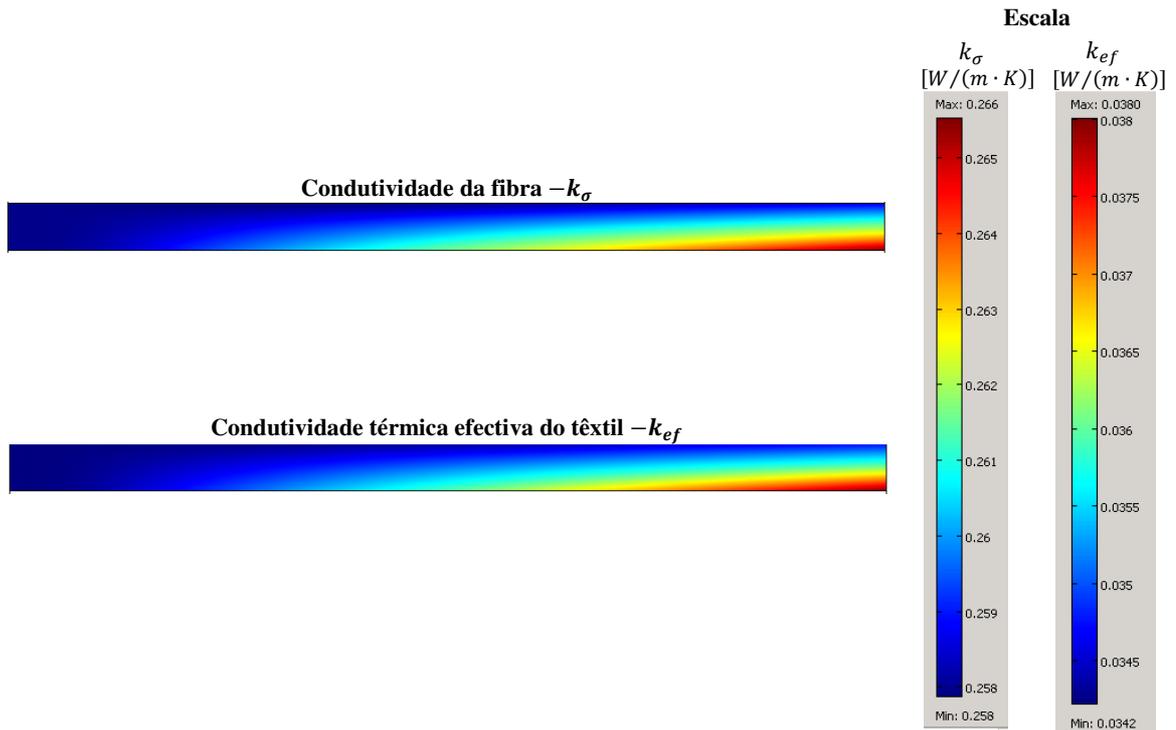


Figura 87- Distribuição ao longo do subdomínio poroso da condutividade da fibra e da condutividade térmica efectiva do têtil

A Figura 87 mostra uma reduzida variação ao longo do subdomínio poroso da condutividade da fibra devido a dois factores: o facto de o *nylon* ser um material com reduzida capacidade para reter água (Figura 46), e o facto do gradiente de temperatura entre a fronteira superior e inferior do subdomínio poroso, ser reduzido. Na Figura 88 é representada a distribuição da fracção de volume ocupado por água retida e a fracção de volume ocupado pelo gás.

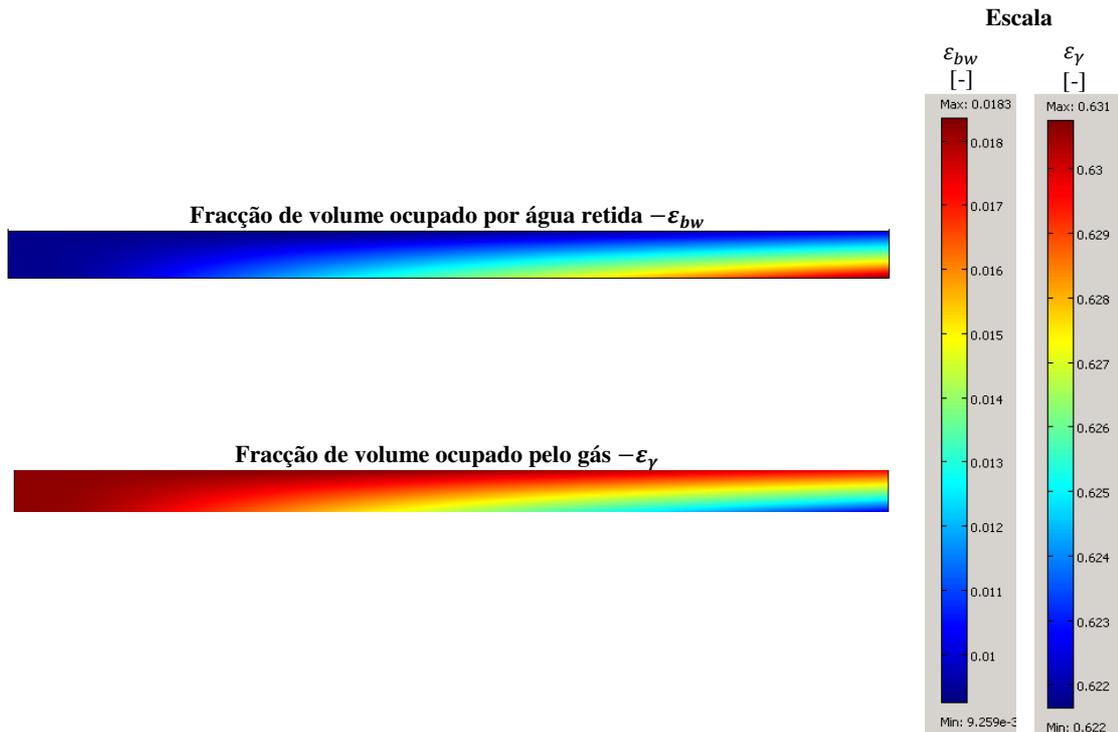


Figura 88- Distribuição ao longo do subdomínio poroso, da fracção de volume ocupado por água retida e fracção de volume ocupado pelo gás

A Figura 88 evidencia a reduzida capacidade do *nylon* para reter o vapor de água. A reduzida quantidade de água retida no *nylon* é também devida à reduzida concentração de vapor presente na vizinhança do subdomínio poroso. Na Figura 89 apresenta-se a distribuição da massa volúmica efectiva do têxtil e o calor específico a pressão constante do têxtil no subdomínio poroso.

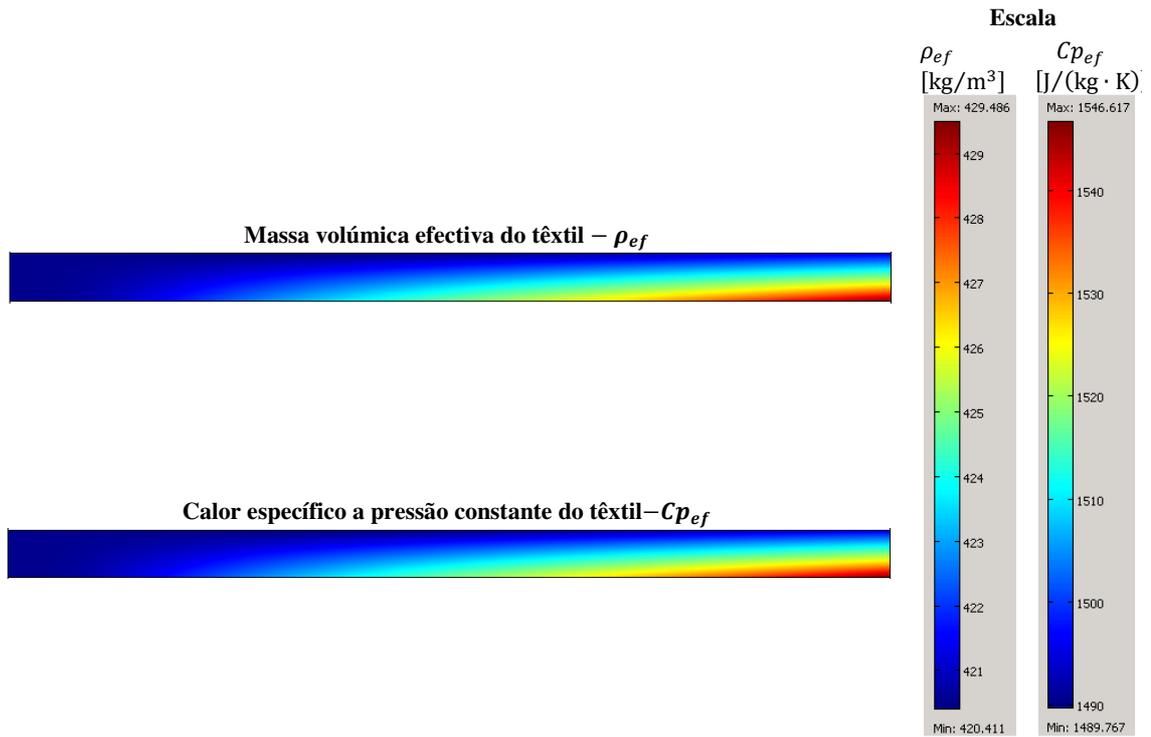


Figura 89- Distribuição ao longo do subdomínio poroso da massa volúmica efectiva e do calor específico a pressão constante

A distribuição da difusividade efectiva do vapor de água através do têxtil no subdomínio poroso, é representado na Figura 90.

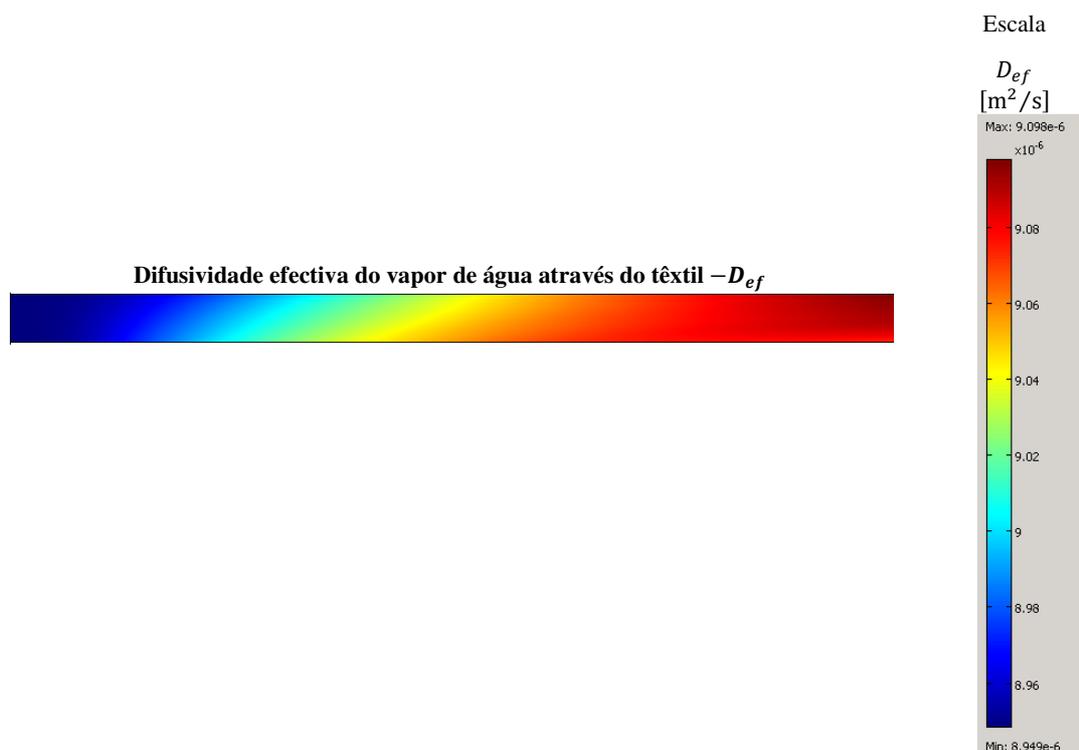


Figura 90- Distribuição da difusividade efectiva do vapor de água através do têxtil no subdomínio poroso

Como seria de esperar a difusividade efectiva do têxtil no subdomínio poroso é mais elevada junto à saída do escoamento interno onde a temperatura é mais elevada. Pelo facto de o *nylon* ser um material com tortuosidade mais baixa do que o algodão, este apresenta valores de difusividade efectiva mais elevados.

Os valores de difusividade efectiva aqui apresentados para o calçado podem ser criticáveis quando comparados com a difusividade efectiva presente na meia, na medida em que seria de esperar que a difusividade efectiva do vapor de água através do calçado fosse inferior à obtida para a meia. No entanto, dada a escassez de valores de difusividade para materiais com construções típicas de calçado, foram assumidos como correctos os valores aqui apresentados.