

Mestrado Integrado em Engenharia Química

***Simulação numérica do transporte de calor e
massa em acabamentos de assentos de
automóvel***

Dissertação de Mestrado

de

Rui Pedro Monteiro Rocha

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

TMG Automotive



Orientadora na FEUP: Doutora Soraia Ferreira Neves

Co-orientador na FEUP: Prof. João Moreira Campos

Orientador na *TMG Automotive*: Doutora Catarina Dias



Departamento de Engenharia Química

Fevereiro de 2018

Agradecimentos

Este trabalho apenas foi possível devido à contribuição dos meus orientadores, Professor João Moreira Campos e Doutora Soraia Ferreira Neves. Aos quais agradeço a disponibilidade, toda a ajuda prestada, apoio praticamente semanal que me forneceram e incrível paciência para comigo, ajudando-me em todos os problemas que foram surgindo neste projecto.

De igual modo agradeço à minha orientadora na *TMG Automotive*, Doutora Catarina Dias, que me fez sentir em casa na empresa que me acolheu e, mesmo com os seus constrangimentos de horário, me forneceu todas as ferramentas que precisava para o estudo.

Também estou grato a todos os colaboradores da *TMG Automotive* com quem contactei, pela sua simpatia e pelo facto de terem sido sempre prestáveis.

Obrigado também a todos os meus amigos e família que me mantiveram motivado e confiante da chegada a um final feliz para a minha dissertação.

Por fim, obrigado à Joana, pelo apoio incondicional.

Resumo

Os acabamentos, componentes do assento automóvel em contacto directo com a superfície da pele, devem eliminar com elevada eficácia o calor metabólico. Nesse sentido a *TMG Automotive*, como produtora deste tipo de materiais, sentiu a necessidade de explorar novos produtos de acabamentos, os acabamentos *respiráveis*. Estes possuem características diferenciadoras que potenciam as trocas de calor e massa. A empresa necessitava de explorar quais as características que um acabamento deste tipo deve ter. Para conhecer essas características e a sua influência houve necessidade de desenvolver uma ferramenta numérica que permite uma análise simples e sistemática. A principal dificuldade dessa análise é a elevada complexidade das trocas que ocorrem entre a pele e o assento do automóvel e a dependência entre diferentes grandezas que as definem. Esta complexidade impossibilita a resolução analítica dos balanços de energia e massa. Para ultrapassar este problema foi desenvolvido um modelo para simulação numérica em estado estacionário que considera como domínio o acabamento do assento, exposto a um ambiente quente com ar praticamente estagnado. Através da discretização das equações de balanço aplicadas ao domínio foi possível obter os valores de fluxo de calor e a taxa de vapor de água para cada um dos estudos realizados. Desta forma é possível analisar as características críticas de um acabamento e verificar a sua influência no transporte de calor e massa na pele. Foi também analisado a forma como variações nas condições ambientais afectam o transporte de massa e calor no acabamento.

As características críticas do acabamento são a espessura, que afecta os fenómenos de transferência de calor e massa, a condutividade térmica de material, que tem a maior influência sobre os fenómenos de transferência de calor e a fracção de sólidos, que afecta a taxa de vapor de água que se verifica à superfície da pele.

Palavras-chave: acabamento; transferência de calor; transferência de massa; simulação numérica

Abstract

The car seat finishing, the part of the car seat that is in direct contact with the skin surface, must provide a pleasant trip to their users. The types of finishing that are currently used (natural leather) do not allow such comfort, because they are not able to provide sufficient heat and water vapor transfer from the surface of the skin. In that perspective, *TMG Automotive*, as a manufacturer of this kind of product, felt the need to explore an innovative way to produce them: the breathable car seat finishing. These have differentiated characteristics that enhance the heat and mass transfers. Although studies have already been made behind closed doors, the company needed to explore which are the characteristics that the finishing needs to have. To know these characteristics and their influence, but also to allow, in future studies, a basis of comparison between products of this type, *TMG Automotive* were looking to develop a tool that allowed its analysis in a simple a systematic fashion. The main difficulty of this analysis is due to the high complexity of the transfers that occur between the surface of the skin and the car seat. Not only that but also the intricate way that the physical characteristics that define such transfers are related. This makes the analytical resolution of the energy and mass balances impossible. To solve this problem and to allow the study that is the objective of this dissertation, a numerical simulation model was developed. This model was developed in steady state and the domain is the finishing of the car seat, exposed to a heated environment with air that is practically stagnated. With the use of a discretization method, the values for heat flux and water vapor index were determined. It was also studied the influence of the environmental conditions on the heat flux and water vapor index in the domain.

In summary, the critical characteristics of the finishing are: i) thickness, that influences both transfer phenomena; ii) thermal conductivity of the solid phase, that affects the heat transfer; iii) the solid fraction, that affects the water vapor fraction that is obtained in the surface of the skin.

Keywords: finishing; mass transfer; heat transfer; numerical simulation

Declaração

Declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.

Rui Pedro Monteiro Rocha

05/02/2018

Índice

1	Introdução	7
1.1	Enquadramento e apresentação do projeto.....	7
1.2	Contributos do trabalho.....	8
1.3	Organização da tese	8
2	Estado da arte	10
2.1	Estratégias usuais de avaliação do assento	10
2.2	Outras estratégias de avaliação do acabamento	13
3	Apresentação do modelo e método de resolução	15
3.1	Apresentação do modelo.....	15
3.1.1	O domínio considerado	15
3.1.2	Considerações sobre as condições ambiente.....	16
3.1.3	Considerações sobre condições fronteira.....	17
3.1.4	Balanços ao domínio.....	18
3.2	Apresentação do método de discretização.....	21
3.2.1	Processo iterativo de cálculo.....	22
3.3	Processo de verificação do modelo.....	23
3.3.1	Testes de grelha.....	23
3.3.2	Verificação da validade do modelo.....	23
3.4	Hipóteses nos estudos paramétricos	24
3.5	Hipóteses para o estudo do efeito das condições ambiente	25
4	Resultados e discussão	28
4.1	Verificação do modelo	28
4.2	Estudo dos parâmetros críticos	29
4.2.1	Efeito da variação da fracção de sólidos	29
4.2.2	Efeito da variação da espessura do acabamento	31
4.2.3	Efeito da quantidade de polímero.....	33

4.2.4	Efeito da variação do coeficiente de condutividade térmica da fase de sólidos ..	34
4.2.5	Efeito da variação da tortuosidade dos poros	35
4.2.6	Efeito da variação da composição da malha	37
4.3	Estudo da influência das condições ambiente do habitáculo	38
4.3.1	Variação da temperatura ambiente	38
4.3.2	Variação da humidade relativa ambiente	40
4.3.3	Variação da velocidade do ar ambiente	41
5	Conclusões	44
6	Avaliação do trabalho realizado	45
6.1	Objetivos Realizados	45
6.2	Limitações e Trabalho Futuro	45
6.3	Apreciação Final	45
Anexo 1. Características físicas do acabamento em estudo		51
Anexo 2. Características físicas dos diferentes componentes e fases do acabamento considerado		52
Anexo 3. Resultados dos testes de grelha realizados		53

Lista de Figuras

Figura 1. Composição típica de um acabamento em pele artificial	7
Figura 2. Assento de automóvel e a sua composição ^[8]	11
Figura 3. Esquema do domínio e dos fenómenos de transferência principais considerados no modelo	16
Figura 4. Representação esquemática de três pontos de grelha do domínio	21
Figura 5. Representação gráfica do perfil de temperatura, T , resultantes da resolução analítica e da resolução do método iterativo (estudo V1)	28
Figura 6. Representação gráfica dos perfis de concentração, C_v , resultantes da resolução analítica e da resolução do método iterativo (estudo V2)	29

Figura 7. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^5$, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, em função dos valores assumidos para a fracção de sólidos, $\varepsilon_{\text{sólidos}}$ (estudos 2 e 3 da Tabela 2)	30
Figura 8. Representação gráfica da difusividade efectiva, $D_{\text{ef}} \times 10^5$, em $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, em função dos valores assumidos para a fracção de sólidos, $\varepsilon_{\text{sólidos}}$ (estudos 2 e 3 da Tabela 2)	30
Figura 9. Representação gráfica da variação do fluxo de calor ganho pela pele, $\dot{q}$, em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, em função dos valores assumidos para a fracção de sólidos, $\varepsilon_{\text{sólidos}}$ (estudos 2 e 3 da Tabela 2)	31
Figura 10. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^5$, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, em função dos valores assumidos para a espessura do acabamento, $L_{\text{acabamento}}$, em m (estudos 4 e 5 da Tabela 2).....	32
Figura 11. Representação gráfica do fluxo de calor na pele, $\dot{q}$, em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, em função dos valores assumidos para a espessura do acabamento, $L_{\text{acabamento}}$, em m (estudos 4 e 5 da Tabela 2).....	32
Figura 12. Representação gráfica da condutividade térmica efectiva, k_{ef} , em $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, em função dos valores assumidos para a fracção de polímero, $\varepsilon_{\text{polímero}}$ (estudos 6 e 7 da Tabela 2).....	33
Figura 13. Representação gráfica do fluxo de calor na pele, $\dot{q}$, em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, em função dos valores assumidos para fracção de polímero, $\varepsilon_{\text{polímero}}$ (estudos 6 e 7 da Tabela 2)	34
Figura 14. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^5$, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, em função dos valores assumidos para a condutividade térmica dos sólidos, $k_{\text{sólidos}}$, em $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ (estudos 8,9, 10, 11 da Tabela 2)	34
Figura 15. Representação gráfica do fluxo de calor na pele, $\dot{q}$, em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, em função dos valores assumidos para a condutividade térmica dos sólidos, $k_{\text{sólidos}}$, em $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ (estudos 8,9, 10 e 11 da Tabela 2).....	35
Figura 16. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^5$, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, em função dos valores assumidos para a tortuosidade, τ (estudos 12 e 13 da Tabela 2).....	36
Figura 17. Representação gráfica da difusividade efectiva, $D_{\text{ef}} \times 10^5$, em $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, em função dos valores assumidos para a tortuosidade, τ (estudos 12 e 13 da Tabela 2).....	36
Figura 18. Representação gráfica do fluxo de calor na pele, $\dot{q}$, em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, em função dos valores assumidos para a tortuosidade, τ (estudos 12 e 13 da Tabela 2).....	37

Figura 19. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^5$, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, em função dos tipos de malha considerados (estudos 14, 15, 16 e 17 da Tabela 2)	37
Figura 20. Representação gráfica do fluxo de calor na pele, $\dot{q}$, em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, em função dos tipos de malha considerados (estudos 14, 15, 16 e 17 da Tabela 2)	38
Figura 21. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^5$, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, em função da temperatura ambiente, T_{amb} , em K	39
Figura 22. Representação gráfica da variação do fluxo de calor na pele, $\dot{q}$, em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, em função da temperatura ambiente, T_{amb} , em K	39
Figura 23. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^5$, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, em função da humidade relativa ambiente, HR_{amb} , em %	40
Figura 24. Representação gráfica do fluxo de calor na pele, $\dot{q}$, em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, em função da humidade relativa ambiente, HR_{amb} , em %	41
Figura 25. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^3$, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, em função da velocidade do ar ambiente, $u_{\text{ar amb}}$, em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	42
Figura 26. Representação gráfica do fluxo de calor na pele, $\dot{q} \times 10^{-2}$, em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, em função da velocidade do ar ambiente, $u_{\text{ar amb}}$, em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	42

Lista de Tabelas

Tabela 1. Condições fronteira para a transferência de calor e de massa no domínio considerado	17
Tabela 2. Características e valores considerados para os estudos paramétricos	24
Tabela 2 (cont). Características e valores considerados para os estudos paramétricos	25
Tabela 3. Grandezas e variação de valores para o estudo da influência das condições ambiente	26
Tabela 4. Valores para μ , Re , Nu , h_c e h_m tendo em conta as diferentes $u_{\text{ar amb}}$	27
Tabela 5. Resultados obtidos para os diferentes testes de grelha realizados	53

Notação e Glossário

C	Concentração	$kg.m^{-3}$
C_p	Calor específico	$J.(kg.K)^{-1}$
D	Difusividade do vapor de água no ar	$m^2.s^{-1}$
h_c	Coefficiente convectivo de transferência de calor	$W.m^{-2}.K^{-1}$
h_m	Coefficiente convectivo de transferência de massa	$m.s^{-1}$
HR	Humidade Relativa	%
k	Condutividade térmica	$W.(m.K)^{-1}$
L	Espessura	m
Le	Número de Lewis	-
M	Massa molar	$kg.mol^{-1}$
$\dot{m}$	Taxa de evaporação de água na pele	$kg.m^{-2}.s^{-1}$
Nu	Número de Nusselt	-
P	Pressão	Pa
Pr	Número de Prandtl	-
$\dot{q}$	Fluxo de calor na pele	$W.m^{-2}$
R	Constante universal dos gases ideais	$J.(K.mol)^{-1}$
Re	Número de Reynolds	-
$Regain_{eq}$	Regain de equilíbrio	$kg_{H_2O}.kg_{fibra}^{-1}$
$Regain_{RH=65\%}$	Regain de equilíbrio para $HR=65\%$	$kg_{H_2O}.kg_{fibra}^{-1}$
T	Temperatura	K
t	Tempo	s
u	Velocidade	$m.s^{-1}$
V	Volume	m^3

Letras gregas

ϵ	<i>Fracção de um componente</i>	-
λ	<i>Calor latente de vaporização da água</i>	$J.kg^{-1}$
μ	<i>Viscosidade cinemática</i>	$kg.(m.s)^{-1}$
ρ	<i>Massa volúmica</i>	$kg.m^{-3}$
τ	<i>Tortuosidade</i>	-

Índices

<i>amb</i>	<i>Ambiente (dentro do habitáculo do veículo)</i>
<i>c</i>	<i>Calor</i>
<i>ef</i>	<i>Efectivo</i>
<i>m</i>	<i>Massa</i>
<i>sat</i>	<i>Saturação</i>
<i>v</i>	<i>Vapor</i>

Lista de Siglas

<i>AC</i>	<i>Ar Condicionado</i>
<i>DHS</i>	<i>Dynamic Heating Sistem</i>
<i>PCM</i>	<i>Phase Changing Materials</i>
<i>PMV</i>	<i>Predicted Mean Vote</i>
<i>PU</i>	<i>Poliuretano</i>
<i>PVC</i>	<i>Policloreto de Vinilo</i>
<i>STAN</i>	<i>Seat Test Automotive Manikin</i>
<i>TPO</i>	<i>Termoplásticos Poliolefínicos</i>

1 Introdução

1.1 Enquadramento e apresentação do projeto

O automóvel, durante o período de utilização em ambientes quentes, é exposto a um conjunto de factores que podem aumentar significativamente a sua temperatura interna, como por exemplo a intensidade da radiação solar ou o fluxo de ar que escoar em torno do veículo^[1]. Como resposta a um aumento de temperatura, o corpo do condutor poderá desencadear mecanismos de termorregulação como a sudorese para eliminar a energia térmica em excesso^[2]. Porém, a evaporação do suor dependerá das propriedades do material em contacto com o corpo, isto é, das propriedades da peça de vestuário e, numa significativa fracção do corpo (p.e. costas e pernas), dependerá dos materiais que constituem o assento do automóvel. A *TMG Automotive* identificou, por isso, a necessidade de desenvolver novos materiais que facilitem a evaporação do suor das zonas do corpo em contacto com o assento. Embora a empresa já tenha realizado alguns estudos sobre o transporte de calor e teor de água no assento, é sua intenção procurar e aprofundar o conhecimento e otimizar o desenvolvimento de acabamentos com propriedades que potenciem a evaporação de suor e a eliminação do calor metabólico.

A pele natural (couro) é frequentemente utilizada como revestimento do assento apresentando um aspecto visual apelativo, longa durabilidade e um toque agradável. No entanto, por ser uma matéria-prima natural é difícil obter a área necessária para revestir o assento (e interior do veículo) com um aspecto visual homogéneo, o que torna esta solução dispendiosa. A alternativa para este problema surgiu com o desenvolvimento de peles artificiais. Neste contexto surge a *TMG Automotive*, como produtora de tecidos plastificados e revestimentos para a indústria automóvel. A empresa desenvolve, entre estes revestimentos, acabamentos em pele artificial, que possuem uma camada superficial e intermédia, aqui chamadas de camada de polímero, e uma camada do avesso, aqui com o nome de camada de malha (Figura 1).

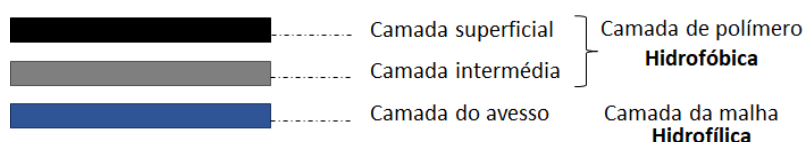


Figura 1. Composição típica de um acabamento em pele artificial

O processo de fabricação de um acabamento consiste na adição de uma camada de malha (ou mistura de malhas) a um composto polimérico laminado (no contexto da *TMG Automotive*

PVC, PU ou TPO). Esse laminado sofre um tratamento na sua superfície com a adição de um composto que minimiza irregularidades da superfície e maximiza a resistência à abrasão. Porém, no final do processo, o acabamento é muito pouco permeável à água e vapor de água, o que o torna inadequado para a finalidade desejada, que é facilitar a remoção de suor da pele. Nesse sentido, surge a necessidade de avaliar diversas características e propriedades do acabamento que facilitem a evaporação de suor.

O presente projeto visa identificar as propriedades do acabamento que limitam o transporte de calor e de massa desde a pele do condutor até ao ambiente do habitáculo do automóvel. Para o efeito desenvolveu-se uma ferramenta numérica que simula a transferência de calor e de massa através do acabamento e permite analisar sistematicamente o efeito de diversas propriedades do acabamento sobre os fluxos de calor e vapor de água (suor) na pele, para diferentes cenários de utilização.

1.2 Contributos do trabalho

Com este trabalho, realizado de raiz, aprofundei e consolidei os meus conhecimentos na área dos fenómenos de transferência (calor e massa) e da mecânica de fluidos. Para além disso, explorei e aprofundei novos conhecimentos no que toca à discretização de equações diferenciais em folhas de cálculo do *Microsoft Office Excel*.

A ferramenta criada, que será utilizada em situações futuras, fornece à *TMG Automotive* conhecimentos que permitem saber que “caminho” escolher na optimização destes novos acabamentos. Para além disso, este trabalho fornece à empresa um conhecimento mais amplo sobre os fenómenos que ocorrem nos acabamentos que possam vir a produzir.

1.3 Organização da tese

Este trabalho encontra-se organizado em seis capítulos.

No primeiro capítulo é realizada uma introdução ao tema em estudo e no segundo é apresentado o estado da arte das tecnologias e modelos, entre eles os de simulação numérica, que permitem estudar o transporte de calor e massa em acabamentos de assentos.

No terceiro capítulo, o modelo desenvolvido é apresentado bem como o domínio de aplicação. Também neste capítulo são apresentadas as condições fronteira consideradas, os balanços de energia e massa para este sistema e também o método de discretização.

No quarto capítulo são apresentados os principais resultados bem como a aplicabilidade do modelo. Depois, surgem os resultados sobre as características críticas do acabamento. Também é demonstrada a influência das condições ambiente do habitáculo.

No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho.

No sexto e último capítulo, o trabalho realizado é avaliado, são analisadas as limitações que existiram, os trabalhos que podem ser desenvolvidos no futuro e é realizada uma apreciação final.

2 Estado da arte

A *TMG Automotive* produz tecidos plastificados e outros revestimentos, por exemplo peles artificiais, para o interior dos automóveis. A importância deste tipo de materiais é cada vez maior pois oferecem sempre menor resistência térmica que outros acabamentos, como por exemplo, acabamentos em pele, proporcionando assim uma viagem mais confortável^[4]. Dentro da variedade de tecidos produzidos pela empresa existem os acabamentos para assentos de automóveis, objecto de estudo deste projecto.

Os acabamentos dos assentos de automóveis são a primeira camada de material do assento em contacto com o condutor e como tal as propriedades e características dos acabamentos deverão ter um impacto relevante nas trocas de calor e de vapor de água entre o condutor e o assento. Em cenários quentes, a influência das propriedades do acabamento que afectam o transporte de vapor de água deverá ser ainda mais significativa, uma vez que o conforto do condutor depende claramente da taxa de suor evaporado para manter o equilíbrio térmico. Nesse sentido, este projecto tem como objectivo o estudo da transferência de calor e massa através do acabamento e a identificação de parâmetros críticos do acabamento que limitam as trocas de calor e a evaporação do suor das zonas do corpo em contacto com o assento. Como primeiro passo, realizou-se um estudo prévio do estado da arte das várias tecnologias inerentes ao projecto. Assim, exploraram-se os métodos usuais de avaliação do desempenho do assento (inclui o acabamento) e do acabamento.

2.1 Estratégias usuais de avaliação do assento

A produção do assento, nos dias de hoje, é baseada apenas na experiência anterior das marcas^[5], tendo sido alvo de poucos estudos, pela elevada complexidade do conjunto de resistências térmicas existentes ao longo do mesmo^[6], o que é contraproducente, pois esta peça, quando não proporciona conforto a nível de postura e temperatura, influencia muito negativamente a condução^[7]. O assento, Figura 2, é constituído, tipicamente, por um suporte rígido para manter a posição, um conjunto de molas, espuma de enchimento e o acabamento (assinalado pela seta vermelha). Uma alteração numa destas partes do assento, como por exemplo a incorporação de ventilação no interior do banco através de ventoinhas eléctricas^[7], pode permitir a optimização da gestão de calor e humidade. Em alternativa, podem ser utilizadas proteções de banco, como por exemplo contas de madeira, que embora proporcionando uma sensação de frescura pelo espaço que criam entre o corpo e o assento, estão longe dos parâmetros de estética e conforto que são necessários^[7]. Por último, outra

alternativa é a instalação de sistemas de ar condicionado, AC, que através da convecção forçada promove um arrefecimento do habitáculo^[7]. Esta alternativa leva, porém a um consumo excessivo de combustível. Neste projecto pretende-se estudar uma alternativa que não necessite do recurso a nenhum tipo de fonte de energia e que passe pela optimização das propriedades do acabamento. Encontrando-a, é possível uma redução de custos para o utilizador e uma diminuição de emissões de gases pelos automóveis em circulação, benéfico para o meio ambiente.



Figura 2. Assento de automóvel e a sua composição^[8]

O assento é produzido com vista ao conforto do condutor o qual passa por vários factores como o barulho, o comportamento do condutor, a velocidade de circulação do automóvel ou até a facilidade na condução do mesmo^[7]. Um dos factores que tem ganhado cada vez mais relevância no estudo desse conforto é a temperatura, que se encontra em terceiro lugar na lista de fatores que influenciam os acidentes, só atrás do álcool e dos cintos de segurança^[9]. Por essa razão é cada vez mais relevante estudar o conforto, principalmente nas fases iniciais do desenho de um novo modelo de automóvel^[10].

Num ambiente quente, a falta de conforto é perceptível ao condutor através da sensação das costas molhadas. Esta sensação resulta da acumulação do suor na interface costas-acabamento, desencadeada por uma diminuição na taxa de suor evaporado. Outro problema inerente a esse acréscimo de humidade é o aumento do coeficiente de atrito que causa desconforto quando existem pequenos ajustes da distribuição de peso, inerentes à condução^[11]. *El-Homossani et al*^[7] referem três comportamentos:

- A quantidade de calor, elevada, que é trocada logo no contacto;
- A quantidade de calor, constante, que é trocada em viagens mais longas;
- A capacidade de retirar qualquer perspiração do corpo (por sorção) e, em casos extremos, transpiração sem a sensação de costas molhadas.

As análises dos estados de conforto são muito subjectivas. Com os estudos aqui apresentados, embora não seja possível concluir se o utilizador está confortável ou não, é possível identificar qual o acabamento que facilitará as trocas de calor e massa com o interior do

assento e com isso assegurar a remoção contínua do suor libertado pelo corpo e evitar uma situação de desconforto.

A transferência de calor e massa é apenas uma das alternativas que existem para obter resultados que podem levar a conclusões sobre o desempenho dos acabamentos. Continuam a existir outras abordagens que começam a ser incorporadas. Entre elas, os modelos matemáticos, como o de *Birch et al.*^[6] que resume a interação entre um condutor e o ambiente no habitáculo^[6]. Este modelo foi expandido por *Karimi et al.*^[6] com vista a prever a resposta de um condutor num ambiente térmico estratificado e foi validado com resultados experimentais^[6].

Ao longo dos anos, diversos modelos têm sido desenvolvidos para simular/prever a resposta do corpo e para avaliar o desempenho de diversos tipos de produtos/materiais. Estes dividem-se em 4 grupos: modelos fisiológicos, modelos psicológicos, modelos zonais e modelos de manequins humanos^[12]. Os primeiros medem e preveem, por meio de equações, a resposta física do corpo às condições ambiente. Os segundos, também se baseiam na informação anterior e com base nas condições ambiente tentam prever as respostas às variações destas condições. Os penúltimos, simulam diferentes condições para o compartimento em que o corpo irá ficar exposto e estudam a resposta a variações de uma ou mais características. Os últimos são baseados em manequins de teste e, recentemente, têm tido avanços significativos, como por exemplo o modelo de manequim humano *STAN*, composto por 8 regiões térmicas com sensores independentes, sistema de arrefecimento e aquecimento para simular a circulação sanguínea e um sistema *DHS* para analisar as trocas de calor em estado transiente^[12]. Existe também o manequim de *FIALA-FE*, que simula os mecanismos de regulação da temperatura e produz simulações satisfatórias da resposta corporal a diferentes condições^[13]. Mais recentemente, por ocasião da primeira conferência internacional do conforto, que decorreu em Salerno em Junho de 2017, a *ESI Group*, especializada em prototipagem virtual, apresentou um modelo para a análise do conforto térmico para várias fisionomias que permite obter resultados para assentos com sistemas de arrefecimento e aquecimento^[14]. Importa salientar que os modelos mais importantes e universalmente aceites para avaliar o conforto térmico do corpo são os de *Zhang et al.*^[15], *Fanger et al.*^[16] e *Fiala et al.*^[17].

Mais recentemente, a NISSAN introduziu a tecnologia SOAK no modelo NISSAN Juke^[18]. Este modelo, um *concept car* para o qual não existem planos de produção em massa, tem um acabamento sensível aos sais que são transportados no vapor de água que o utilizador liberta e muda de cor mediante a concentração dos mesmos na perspiração. Assim, dá a indicação ao condutor de quando está desidratado através da mudança de cor para amarelo.

Uma abordagem mais antiga, mas ainda utilizada, é o modelo de *Fanger*. Através de uma grandeza definida como *PMV*, consegue prever a satisfação de um grande grupo de pessoas, submetidos às mesmas condições ambiente, sob a forma de uma escala de sensação térmica que vai de -3, com frio, a +3, com calor, sendo 0 a sensação de neutralidade térmica^[19].

Outras tecnologias têm vindo a ser desenvolvidas como forma de contrariar o excesso de temperatura à superfície do assento, como são exemplo os materiais têxteis com impregnação de microcápsulas com *PCMs*^[30]. Inicialmente projectados para proteger os astronautas do calor excessivo ou do frio glacial, estão a ser testados para aplicação em assentos de automóveis. Embora esta via seja promissora, estes materiais têm como principal desvantagem o curto ciclo de vida^[7].

Existe uma dificuldade evidente na adaptação dos modelos acima apresentados ao caso em estudo. Todos eles têm como base as condições ambientais com ocupação do habitáculo. Para além disso, alguns precisam de testes com um grande número de seres humanos. A prototipagem do *ESI Group* ou os modelos de manequim humano podem ser os únicos a ser considerados para testes que validem o conceito do modelo a desenvolver. No entanto não se encontram disponíveis para este estudo.

2.2 Outras estratégias de avaliação do acabamento

Entre muitos outros modelos para simulação numérica, são de referir os de *B.Farnwoth et al.*^[21], *Fan et al.*^[22] e o desenvolvido por *Barker et al.*^[23], que avalia a *performance* dos fatos dos bombeiros na protecção de lesões resultantes da exposição a fluxos de calor radiativos durante longos períodos de tempo^[24]. A formulação de um modelo e a sua simulação numérica é dificultada quando há humidade nos têxteis, influenciando a temperatura à superfície da pele. Tratando o têxtil protector como um meio poroso com quatro fases (sólida, com e sem água retida, água livre e gasosa) este modelo que avalia a *performance* dos fatos dos bombeiros baseia-se em equações que definem os fenómenos de transporte que ocorrem entre a pele e o fato em estado transiente. O sistema de equações é resolvido para cada ponto no tempo através de um método de discretização por diferenças finitas^[24]. Os resultados obtidos ajudam posteriormente no *design* de novos fatos. *Gibson e Charmchi*^[25] também desenvolveram um modelo de simulação numérica onde resolvem a interacção entre transferência de calor e massa através de técnicas de volume-médio, caracterizando desta forma as temperaturas e concentrações registadas em materiais higroscópicos^[26].

A medição dos parâmetros e propriedades físicas que fazem parte dos modelos não é simples e, geralmente, é realizada com recurso a instalações complexas e caras. Para além disso, os valores na literatura não vêm acompanhados de uma clara explicação de como foram obtidos.

Estas dificuldades criam resistência a uma maior aceitação deste tipo de métodos na área dos têxteis^[27]. No entanto já existem equipamentos que, mesmo não tendo surgido por esta necessidade, permitem a obtenção experimental de alguns valores destes parâmetros/propriedades. Um exemplo é o processo associado à ISO 11092, onde é apresentado um equipamento com o nome *sweating guarded hot plate*^[28]. Este equipamento foi desenhado para simular a transferência de calor e vapor de água desde a superfície do corpo até ao ambiente, através da peça que é posicionada no equipamento. Este equipamento permite medir a resistência térmica e a permeabilidade ao vapor de água do têxtil e permite obter resultados reprodutíveis. Contudo, apenas permite estudos para estado estacionário, pelo que tem de ser redesenhado para estudos no estado transiente^[29].

Neste estudo implementou-se um modelo que permite prever o fluxo de calor e a taxa de evaporação de água na pele do condutor tendo em consideração diferentes propriedades e características do acabamento. A abordagem unidimensional considerou: i) fronteira interna, interface pele-acabamento, com temperatura e concentração de vapor de água constantes (saturada) e ii) fronteira externa, interface acabamento-ambiente do habitáculo, em que ocorre transferência de calor e massa por convecção. A ferramenta criada permite avaliar de uma forma sistemática diferentes propriedades que permitem a comparação entre acabamentos e saber as características críticas para a optimização dos mesmos.

3 Apresentação do modelo e método de resolução

Neste capítulo, é apresentado o modelo que traduz a transferência de calor e massa através do acabamento. Neste modelo é definido um domínio composto pelo acabamento que reveste esse assento, única parte que interessa à *TMG Automotive* para este projecto, que se encontrará exposto a um ambiente quente e em contacto com a pele que se encontra saturada. O transporte de calor e massa, que ocorre através do domínio, é definido por duas equações de balanço, que serão apresentadas nesta secção. As grandezas nestas equações são, em alguns casos, interdependentes (p.e. a condutividade térmica é função da fracção de água retida no acabamento), o que impossibilita a resolução dos balanços por via analítica. Para resolver este problema, foi adaptado um método iterativo para resolver as equações diferenciais discretizadas baseado nos estudos de *Patankar*^[30]. O processo iterativo é apresentado no fim do capítulo.

3.1 Apresentação do modelo

3.1.1 O domínio considerado

Para avaliar as diversas propriedades que influenciam o transporte de calor e massa de um acabamento optou-se por seguir uma abordagem frequentemente utilizada em ensaios experimentais com equipamentos como o *sweating guarded hot plate*: considerou-se que o material em análise (neste caso o acabamento) está em contacto com uma superfície saturada de vapor de água (mimetiza pele) e exposto a um ambiente com velocidade, temperatura e humidade relativa constantes (Figura 3). Com esta abordagem é possível avaliar o que uma alteração numa das propriedades do acabamento implica em termos de fluxo de calor e taxa de vapor de água na fronteira que mimetiza a pele.

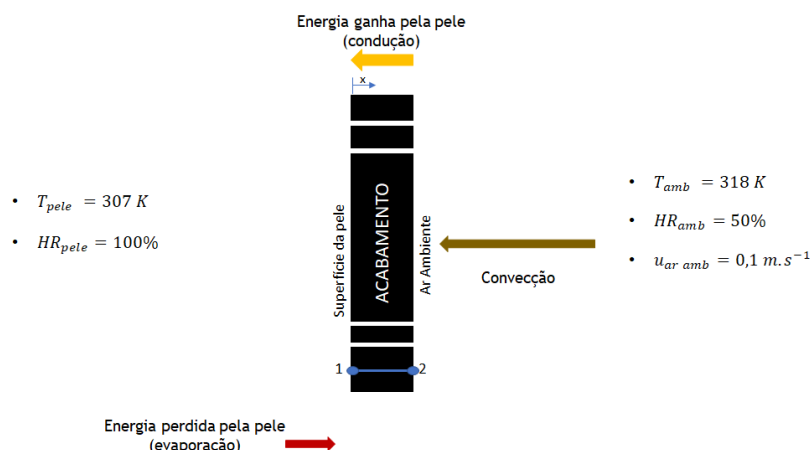


Figura 3. Esquema do domínio e dos fenômenos de transferência principais considerados no modelo

Em estudos realizados pela *TMG Automotive*, foi identificado um tipo de acabamento mais eficaz no transporte de calor e massa: um acabamento perfurado ao qual se deu o nome de *respirável*. As características físicas do acabamento, considerado neste estudo, são apresentadas no Anexo 1. O acabamento possui duas fases, uma fase sólida (“sólidos”), que corresponde à malha e à camada de polímero, que podem ou não possuir água retida (água essa que é sorvida homogeneamente), e uma gasosa, constituída pelo ar e vapor de água que atravessam o acabamento por difusão que ocorre de forma homogênea, instantânea e proporciona um equilíbrio imediato entre fases^[32].

No acabamento, a transferência de vapor de água ocorre através dos poros da seguinte forma: após a libertação de suor à superfície da pele e da sua evaporação, o vapor de água difunde-se pelos poros do acabamento. Durante o trajecto no interior dos poros parte deste vapor de água é sorvido na superfície exposta dos poros. O vapor de água que não é sorvido continua a difundir-se desde que não ocorra a saturação dos poros do acabamento (formação de água líquida), a qual impede a continuação da difusão. Quanto ao calor, ocorre a condução desde a interface pele-acabamento até à interface acabamento-ambiente, onde ocorre convecção de calor no ar ambiente.

3.1.2 Considerações sobre as condições ambiente

Importa agora conhecer as condições do ambiente que envolve o domínio. A temperatura ambiente, T_{amb} , com base na literatura, será de 318 K ^[33]. O habitáculo tem um circuito de ar a baixa velocidade, $u_{ar\ ambiente}$, $0,10\text{ m.s}^{-1}$ ^[34], que causa pouca turbulência e uma maior homogeneização da temperatura ambiente. Por isso, a temperatura é considerada igual em todos os pontos do ambiente. O ar ambiente estará a uma humidade relativa de 50%. A concentração de vapor no ar ambiente tem um valor de $3,29 \times 10^{-2}\text{ kg.m}^{-3}$.

O ar do habitáculo retira, no caso em estudo, o calor e a massa por convecção forçada da superfície do acabamento. Este fenómeno é quantificado pelos coeficientes convectivos de transferência de calor, h_c , e de massa, h_m . O primeiro, sem a possibilidade de ser um valor obtido experimentalmente, foi retirado da literatura. É considerado um valor típico para uma placa plana com circulação de ar a baixa velocidade: $10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ^[35]. O valor para h_m foi obtido pela equação de Lewis para mistura de vapor de água e ar^[27]:

$$\frac{h_c}{h_m} = \rho_{ar} \times C_{p_{ar}} \times Le^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

onde a massa volúmica do ar, ρ_{ar} , e o calor específico do ar, $C_{p_{ar}}$, são também retirados da literatura, respectivamente $1,17 \text{ kg.m}^{-3}$ ^[36] e $1005,00 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ^[37]. O valor para h_m , obtido pela equação, é $0,01 \text{ m.s}^{-1}$.

3.1.3 Considerações sobre condições fronteira

Definidas as condições do ambiente são agora apresentadas as condições fronteira. As condições fronteira pele-acabamento e acabamento-ambiente, 1 e 2 na Figura 3 são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1. Condições fronteira para a transferência de calor e de massa no domínio considerado

	Massa	Calor
Condição Fronteira 1		
Tipo de C.F.	Neumann	
Variável considerada	$T_{pele} [K]$	$C_{v_{pele}} [kg.m^{-3}]$
Valor	307	$3,78 \times 10^{-2}$
Condição Fronteira 2		
Tipo de C.F.	Dirichlet	
Valor	$-k_{ef} \times \frac{\partial T}{\partial x} = h_c \times (T_2 - T_{amb})$ (2)	$-D_{ef} \frac{\partial C_v}{\partial x} = h_m \times (C_{v_2} - C_{v_{amb}})$ (3)
Tipo de C.F.	Neumann	
Variável considerada	$h_c [W.m^{-1}.\text{K}^{-1}]$ e $T_{amb} [K]$	$h_m [m.s^{-1}]$ e $C_{v_{amb}} [kg.m^{-3}]$
Valor	$h_c = 10;$ $T_{amb} = 318$	$h_m = 0,01;$ $C_{v_{amb}} = 3,29 \times 10^{-2}$

De salientar que a concentração de vapor, C_v , na fronteira 1 (tal como no ambiente) é calculada através da equação dos gases ideais:

$$C_v = \frac{P_v}{R \times T} \quad (4)$$

onde R representa a constante dos gases ideais e tem um valor de $8,31 \text{ J. (K.mol)}^{-1}$ [27].

A outra condição na pele, temperatura na sua superfície, é um parâmetro difícil de prever, pois depende de factores como a temperatura e velocidade do ar, o grau de exposição a radiação solar e a roupa^[3]. Na literatura, os seus valores variam entre os 306 e os 307,4 K^[38]. Tendo isto em conta, será considerada uma temperatura média à superfície da pele de 307 K. Estudos indicam que a temperatura regista variações tão pequenas na superfície do assento que é possível ser considerada como homogénea^[6].

É assumido também que a pele do utilizador tem uma humidade relativa de 100%. Assim é possível analisar o acabamento numa situação limite. A humidade relativa, HR , é calculada pela seguinte equação:

$$HR = \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (5)$$

onde a pressão de vapor, P_v , é calculado por:

$$P_v = \frac{C_v \times R \times T}{M_{H_2O}} \quad (6)$$

onde T representa a temperatura em K e M_{H_2O} a massa molar da água em $kg.mol^{-1}$.

Por sua vez, a pressão de saturação, P_{sat} , é calculada através da seguinte equação:

$$P_{sat} = 614,3 \times e^{(17,06 \times \frac{T-273,15}{T-40,25})} \quad (7)$$

Desta forma estão definidas as condições fronteira necessárias para a resolução dos balanços.

3.1.4 Balanços ao domínio

As equações de balanço são apresentadas nesta secção. Estas definem os fenómenos que ocorrem dentro do domínio. Em primeiro lugar o balanço de energia para o domínio, em estado estacionário:

$$\frac{\partial}{\partial x} \times \left(-k_{ef} \times \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (8)$$

De seguida, o balanço de massa, também para estado estacionário:

$$\frac{\partial}{\partial x} \times \left(-D_{ef} \times \frac{\partial C_v}{\partial x} \right) = 0 \quad (9)$$

Tal como já foi referido, considera-se que a transferência de calor ocorre através do acabamento por condução, quantificada pela condutividade térmica efectiva, k_{ef} . A transferência de massa, por sua vez, é quantificada pela difusividade efectiva do vapor de água no ar, D_{ef} , presente na equação (9).

Quanto à transferência de massa, importa ressaltar que o domínio tem características hidrofílicas pelo que tem a capacidade de sorver o vapor de água. A quantidade de água retida no têxtil, $Regain_{eq}$, pode ser prevista pela isotérmica de sorção nas fibras^[27]:

$$Regain_{eq} = 0,587 \times Regain_{HR=65\%} \times HR \times [(0,321 + HR)^{-1} + (1,262 - HR)^{-1}] \quad (10)$$

Na equação (10), $Regain_{HR=65\%}$ é característica de cada têxtil e, por falta de informação, em vez do valor para o acabamento, foi utilizado o valor para o poliéster, 4×10^{-3} ^[39].

A fracção de água retida no acabamento, $\varepsilon_{\text{água retida}}$, é calculada pela seguinte equação^[27]:

$$\varepsilon_{\text{água retida}} = \frac{\varepsilon_{\text{sólidos}} \times \rho_{\text{sólidos}} \times Regain_{eq}}{\rho_{\text{água}}} \quad (11)$$

onde $\rho_{\text{sólidos}}$ representa a massa volúmica da fase sólida em $kg.m^{-3}$ e $\rho_{\text{água}}$ a massa volúmica da água, $9,94 \times 10^2 kg.m^{-3}$ ^[40]. Quando a $\varepsilon_{\text{água retida}}$ aumenta, a fase gasosa circulará, obrigatoriamente, numa área mais pequena dentro dos poros. A fracção de gás, $\varepsilon_{\text{gás}}$, pode ser calculada através de $\varepsilon_{\text{água retida}}$ e $\varepsilon_{\text{sólidos}}$ por:

$$\varepsilon_{\text{gás}} + \varepsilon_{\text{água retida}} + \varepsilon_{\text{sólidos}} = 1 \quad (12)$$

Todas as fracções estão, por isso, relacionadas. Por sua vez, a variação em $\varepsilon_{\text{gás}}$, $\varepsilon_{\text{água retida}}$ e $\varepsilon_{\text{sólidos}}$ influenciam a massa volúmica efectiva do acabamento, ρ_{ef} , da seguinte forma:

$$\rho_{ef} = \varepsilon_{\text{água retida}} \times \rho_{\text{água}} + \varepsilon_{\text{gás}} \times \rho_{ar} + \varepsilon_{\text{sólidos}} \times \rho_{\text{sólidos}} \quad (13)$$

onde $\rho_{\text{gás}}$ representa a massa volúmica do gás, $1,17 kg.m^{-3}$ ^[36] e $\rho_{\text{sólidos}}$ é calculado por:

$$\rho_{\text{sólidos}} = \varepsilon_{\text{malha}} \times \rho_{\text{malha}} + \varepsilon_{\text{polímero}} \times \rho_{\text{polímero}} \quad (14)$$

representando $\varepsilon_{\text{malha}}$ a fracção de malha, $\varepsilon_{\text{polímero}}$ a fracção de polímero e $\rho_{\text{polímero}}$ a massa volúmica do polímero. A massa volúmica da malha, ρ_{malha} , é calculada por:

$$\rho_{\text{malha}} = \varepsilon_A \times \rho_A + \varepsilon_B \times \rho_B + \varepsilon_C \times \rho_C \quad (15)$$

onde ε_A , ε_B e ε_C representam as fracções de cada um dos componentes da malha e ρ_A , ρ_B e ρ_C a massa volúmica de cada um dos componentes da malha.

A fração de água retida, $\varepsilon_{\text{água retida}}$ não só influencia ρ_{ef} como também k_{ef} , ou seja, influencia a transferência de massa e a transferência de calor. Tendo em consideração que a transferência de calor ocorre tanto dentro como fora dos poros, k_{ef} é calculado por:

$$k_{ef} = k_{gás} \times \varepsilon_{gás} + k_{sólidos} \times \varepsilon_{sólidos} + k_{\text{água retida}} \times \varepsilon_{\text{água retida}} \quad (16)$$

onde $k_{gás}$ representa a condutividade térmica do gás, $2,70 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ^[41], $k_{sólidos}$ a condutividade térmica da fase sólida e $k_{\text{água retida}}$ a condutividade térmica da água retida, $5,80 \times 10^{-1} \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ^[41]. O valor de $k_{sólidos}$ é calculado por:

$$k_{sólidos} = k_{malha} \times \varepsilon_{malha} + k_{polímero} \times \varepsilon_{polímero} \quad (17)$$

onde $k_{polímero}$ representa a condutividade térmica do polímero e k_{malha} a condutividade térmica da malha, calculado por:

$$k_{malha} = k_A \times \varepsilon_A + k_B \times \varepsilon_B + k_C \times \varepsilon_C \quad (18)$$

onde k_A , k_B e k_C representam os valores de condutividade térmica dos componentes da malha. Todos os valores necessários para as equações (11), (12), (13), (14), (15), (16), (17) e (18) estão disponíveis no Anexo 2.

O valor de k_{ef} , calculado pela equação (16), irá fazer variar o perfil de temperaturas no domínio, o que, por sua vez, influencia a difusividade de vapor de água no ar, D :

$$D = \frac{920 \times 10^{-6}}{P} \times \frac{T^{2,5}}{T + 245} \quad (19)$$

A difusividade efectiva de vapor de água no ar, D_{ef} , presente na equação (9), é calculada por:

$$D_{ef} = \frac{D \times \varepsilon_{gás}}{\tau} \quad (20)$$

Com D_{ef} é possível obter o valor para a taxa de evaporação de água, $\dot{m}$:

$$\dot{m} = D_{ef} \times \frac{dC_v}{dx} \quad (21)$$

Por sua vez, o fluxo de calor, $\dot{q}$, é calculado através do valor de k_{ef} :

$$\dot{q} = k_{ef} \times \frac{dT}{dx} \quad (22)$$

O calor utilizado para a evaporação do suor é dado por:

$$\dot{q}_{\text{evaporado}} = \lambda \times \dot{m} \quad (23)$$

onde λ representa o valor do calor latente de vaporização da água a 33°C , $2422,901 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[42].

A resolução por via analítica destas equações, devido à sua complexidade, não é possível. É necessária a utilização de um método de cálculo que permita a resolução sistemática deste conjunto de equações. Este método é apresentado a seguir.

3.2 Apresentação do método de discretização

O método de discretização de equações diferenciais aplicado foi baseado nos estudos de S. Patankar^[30], que consiste na partição do domínio em pequenas partes, à qual se dá o nome de grelha. Essa grelha divide o domínio, desde a fronteira 1 até à fronteira 2 (Figura 3), em pontos. A grelha é homogênea e possui 50 pontos. Considerando P o ponto a resolver, a grelha está representada na Figura 4.

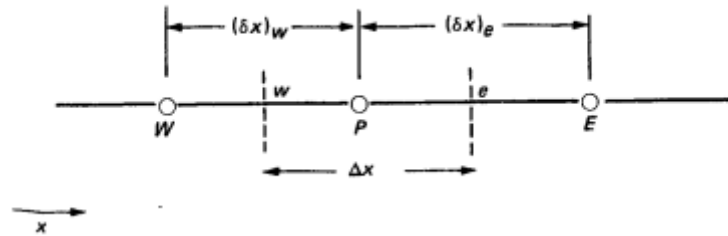


Figura 4. Representação esquemática de três pontos de grelha do domínio

Os valores de T e C_v são obtidos através da definição das variáveis a_W , a_E e a_P , referentes aos pontos W , E e P da Figura 4. O cálculo de T_P é realizado a partir das seguintes equações:

$$1. \quad a_W = \frac{k_{efW}}{\delta x_W} \quad (24)$$

$$2. \quad a_E = \frac{k_{efE}}{\delta x_E} \quad (25)$$

$$3. \quad a_P = a_E + a_W \quad (26)$$

$$4. \quad T_P = \frac{a_E \times T_E + a_W \times T_W}{a_P} \quad (27)$$

Para o ponto da grelha situado na fronteira com o ambiente (transferência de calor por convecção; fronteira 2 na Figura 3) a resolução sofre uma pequena alteração, sendo as equações para o cálculo as seguintes:

$$1. \quad a_I = \frac{k_{efI}}{\delta x_W} \quad (28)$$

$$2. \quad b = h_c \times T_{amb} \quad (29)$$

$$3. \quad a_B = a_I + h_c \quad (30)$$

$$4. \quad T_P = \frac{a_I \times T_I + b}{a_B} \quad (31)$$

Este método também permite a obtenção de valores de C_v . A resolução é análoga, apenas substituindo k_{ef} por D_{ef} , T por C_v e h_c por h_m .

Para além dos valores de T e C_v foram obtidos os fluxos de calor e de vapor de água que passam por cada um dos pontos de grelha:

$$\dot{q} = k_{ef} \times \frac{T_w - T_p}{\delta x_w} \quad (32)$$

O fluxo de vapor de água, por sua vez, é calculada por:

$$\dot{m} = D_{ef} \times \frac{C_{vw} - C_{vp}}{\delta x_w} \quad (33)$$

Construído o modelo, é necessário definir um critério de convergência. Esse critério foi escolhido com base no facto deste modelo se encontrar em estado estacionário e como tal a energia/massa que entra no domínio ter de ser igual àquela que sai. Por essa razão, o critério de convergência baseia-se num balanço energético/mássico ao domínio (entre as fronteiras 1 e 2; Figura 3). Ou seja, a diferença entre a energia/massa que entra e sai do acabamento tem que ser menor que 0,01 (1%) de modo a garantir convergência. Esta diferença é calculada por:

$$\text{Critério de convergência} = \frac{X_1 - X_2}{X_1} \quad (34)$$

onde X representa $\dot{q}$ ou $\dot{m}$, para o balanço de energia ou de massa respectivamente, obtidos na fronteira 1 e 2 do domínio.

Antes deste método de cálculo ser implementado, é necessário saber os valores da massa volúmica efectiva do acabamento obtidos no laboratório da empresa, $\rho_{ef\ experimental}$, e compará-los com valores teóricos. Deve-se ter em atenção que estes valores podem não coincidir devido à sua dependência na água retida nos poros, função da humidade relativa no ar. O Anexo 2 apresenta os valores de grandezas relevantes do acabamento para a resolução do método iterativo.

3.2.1 Processo iterativo de cálculo

Por último, é apresentado o esquema de cálculo da primeira iteração, posto em prática numa folha de cálculo do *Microsoft Excel* e posteriormente sistematizado para futura utilização da empresa:

0. Inicialização do domínio com perfis de T e C_v obtidos por (32) e (33), considerando k_{ef} e D_{ef} constantes (fornecidos pela empresa);

1. Utilizar as condições de T e C_v para a fronteira 1: $T_{pele} = 307\text{ K}$ e $C_{v_{pele}} = 3,78 \times 10^{-2}\text{ kg.m}^{-3}$;
2. Calcular P_{sat} , P_v e HR por (7), (6) e (5);
3. Calcular $Regain_{eq}$ por (10);
4. Calcular $\varepsilon_{\text{água retida}}$ por (11);
5. Utilizar o valor de $\varepsilon_{\text{sólidos}}$ e obter $\varepsilon_{\text{gás}}$ por (12);
6. Calcular ρ_{ef} e k_{ef} por (13) e (16);
7. Calcular a_w , a_E e a_P e T para cada um dos pontos de grelha através de (24), (25), (26) e (27);
8. Com o valor de T obtido, obter D por (19);
9. Com D obter D_{ef} por (20);
10. Calcular a_w , a_E e a_P e C_v para cada um dos pontos de grelha através de (24), (25), (26) e (27), aplicando as alterações já mencionadas;

Para as restantes iterações, o esquema será igual, retirando apenas o ponto inicial e acrescentando:

11. Com os valores de T e C_v , calcular $\dot{q}$ e $\dot{m}$ por (32) e (33);
12. Para o ponto situado na fronteira 2 calcular a_I , a_B , b e T por (28), (29), (30) e (31);
13. Para esse ponto calcular a_I , a_B , b e C_v por (28), (29), (30) e (31), aplicando as alterações já mencionadas;
14. Após todos os valores de $\dot{q}$ e $\dot{m}$ estarem calculados, verificar a existência de convergência através da realização do cálculo da equação (34).

3.3 Processo de verificação do modelo

3.3.1 Testes de grelha

Foram realizados testes de grelha para 22, 50 e 100 pontos. Os resultados obtidos são apresentados no Anexo 3.

3.3.2 Verificação da validade do modelo

A verificação da validade do modelo foi realizada para dois cenários: k_{ef} constante e D_{ef} constante. Nestes cenários todas as interdependências citadas foram ignoradas. Para o primeiro, estudo *V1*, comparou-se o valor de fluxo de calor que atravessa todo o domínio e o perfil de concentrações obtidos pelo método apresentado na secção 3.2, com o valor de fluxo e perfil obtidos pela resolução analítica da equação (35), derivada a partir da equação (8):

$$\dot{q} = k_{ef} \times \frac{T_1 - T_{amb}}{L_{acabamento}} \quad (35)$$

onde T_1 e T_{amb} são as temperaturas consideradas, respectivamente, como condição fronteira 1 e condição do ar ambiente.

Para o segundo estudo, estudo V2, foi comparado o valor de taxa de evaporação de água na pele e o perfil de concentrações obtido pela resolução do método apresentado na secção 3.2 com o valor de fluxo e perfil obtidos pela resolução analítica da equação (36), derivada a partir da equação (9):

$$\dot{q} = D_{ef} \times \frac{C_{v1} - C_{vamb}}{L_{acabamento}} \quad (36)$$

onde C_{v1} e C_{vamb} representam as concentrações consideradas, respectivamente, como condição fronteira 1 e condição do ar ambiente.

3.4 Hipóteses nos estudos paramétricos

Nos estudos paramétricos foram analisadas a variação de certas grandezas e a sua influência no resultado final. De salientar que os valores para estes ensaios não são revelados devido ao acordo de confidencialidade assinado com a *TMG Automotive*.

Os estudos são apresentados, de uma forma condensada, na tabela em baixo:

Tabela 2. Características e valores considerados para os estudos paramétricos

Estudo	Parâmetro	Valor
1	Características <i>default</i> (Anexo 1 e 2)	-
2	$\varepsilon_{sólidos}$ [-]	$\varepsilon_{sólidos}^1$
3		$\varepsilon_{sólidos}^2$
4	$L_{acabamento}$ [m]	$L_{acabamento}^1$
5		$L_{acabamento}^2$

Tabela 2 (cont). Características e valores considerados para os estudos paramétricos

Estudo	Parâmetro	Valor
6	$\varepsilon_{polímero} [-]$	$\varepsilon_{polímero} 1$
7		$\varepsilon_{polímero} 2$
8	$k_{sólidos} [W. (m. K)^{-1}]$	$k_{sólidos} 1$
9		$k_{sólidos} 2$
10		$k_{sólidos} 3$
11		$k_{sólidos} 4$
12	$\tau [-]$	$\tau 1$
13		$\tau 2$
14	$\varepsilon_A, \varepsilon_B \text{ e } \varepsilon_C$	Malha A
15		Malha B
16		Malha C
17		Malha A/B

Os estudos da tabela foram realizados de forma a variar o maior número possível de parâmetros do acabamento, determinando assim as críticas. É de salientar que os estudos 12 e 13 foram realizados para testar a influência de um método alternativo de perfuração, sem recurso a máquinas perfuradoras que a *TMG Automotive* procura implementar. Os estudos 14, 15, 16 e 17 foram realizados de forma a analisar a influência de um dos componentes da malha, tido como o melhor.

3.5 Hipóteses para o estudo do efeito das condições ambiente

Nestes estudos, as variáveis foram escolhidas de forma a analisar o comportamento do acabamento quando exposto a ambientes diferentes do *default* (estudo 1, tabela 2).

Tabela 3. Grandezas e variação de valores para o estudo da influência das condições ambiente

Estudo	Variável	Valor
18	$T_{amb} [K]$	327
19	$HR_{amb} [\%]$	30
20		70
21	$u_{ar\ amb} [m.s^{-1}]$	0,10
22		1,50
23		20,00

O estudo 18 (Tabela 3) foi concebido de forma a ter um cenário no qual a superfície da pele fornece calor, ao contrário do cenário *default* onde recebe calor por estar a uma temperatura inferior à da temperatura ambiente. Este estudo interessa à *TMG Automotive* pois os acabamentos são usados em modelos de marcas automóveis que circulam em todas as partes do planeta, que por isso encontram temperaturas diferentes. O tipo de cenário considerado neste estudo encontra paralelo num cenário de Inverno, no qual o corpo está a uma maior temperatura que a ambiente, enquanto o de *default* encontra paralelo num cenário de Verão.

Os estudos 19 e 20 tentam identificar a influência da humidade do ar ambiente. Os ensaios 21, 22 e 23 foram idealizados para analisar o calor e o vapor de água libertados na fronteira acabamentoo-ambiente. Nestes, a velocidade do ar $1,50\ m.s^{-1}$ é o valor máximo para o qual o ocupante sente conforto ^[43,44]. O valor de $20,00\ m.s^{-1}$ é apenas considerado para testar os limites do modelo (condições *outdoor*).

A variação de velocidade do ar ambiente tem implicações, pois afecta a quantidade de calor e massa que é retirada da fronteira acabamentoo-ambiente. Essa quantidade é, tal como foi dito, transferida por convecção forçada para o ar ambiente. Este fenómeno é definido pelo coeficiente convectivo de transferência de calor, h_c , que pode ser calculado pelo número de *Nusselt*, Nu ^[45]. No caso, como o considerado, em que o acabamentoo se pode aproximar a uma placa plana com o escoamento do ar a ocorrer ao longo dessa placa (fronteira 2; Figura 3), este número, para regime laminar, é definido por^[45]:

$$Nu = \frac{h_c \times z_{acabamento}}{k_{ar}} = 0,0664 \times Re^{\frac{1}{2}} \times Pr^{\frac{1}{3}} \quad (37)$$

Para regime turbulento ($Re > 5 \times 10^5$) Nu é definido por^[45]:

$$Nu = 0,037 \times Re^{0,8} \times Pr^{\frac{1}{3}} \quad (38)$$

onde Pr representa o número de *Prandtl* do ar com um valor de 0,71^[46], $z_{acabamento}$ a espessura do acabamento, que foi assumida como sendo 0,66 m^[47] e Re representa o número de *Reynolds*, definido por:

$$Re = \frac{\rho_{ar} \times u_{ar\ amb} \times z_{acabamento}}{\mu_{ar\ amb}} \quad (39)$$

onde $\mu_{ar\ amb}$ representa a viscosidade cinemática do ar, com um valor de $1,93 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ^[48]. Com estas duas equações é possível calcular aos valores de h_c .

Depois de obtido o valor de h_c , a partir da equação (1), é determinado h_m . Os valores de μ , Re , Nu , h_c e h_m para as diferentes velocidades são apresentados na tabela 4:

Tabela 4. Valores para μ , Re , Nu , h_c e h_m tendo em conta as diferentes $u_{ar\ amb}$

Estudo	Re [–]	Nu [–]	h_c [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]	h_m [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
21	400,10	3,15	1,29	$1,10 \times 10^{-3}$
22	$6,00 \times 10^4$	472,23	19,30	0,02
23	$8,00 \times 10^5$	1742,18	71,27	0,06

4 Resultados e discussão

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos na resolução do método de discretização e que representam as previsões numéricas para o comportamento do modelo apresentado na secção 3.2 quando uma característica é alterada.

4.1 Verificação do modelo

São agora apresentados os resultados obtidos no processo de verificação do modelo. Para o estudo V1, os perfis de temperatura obtidos são apresentados na Figura 5.

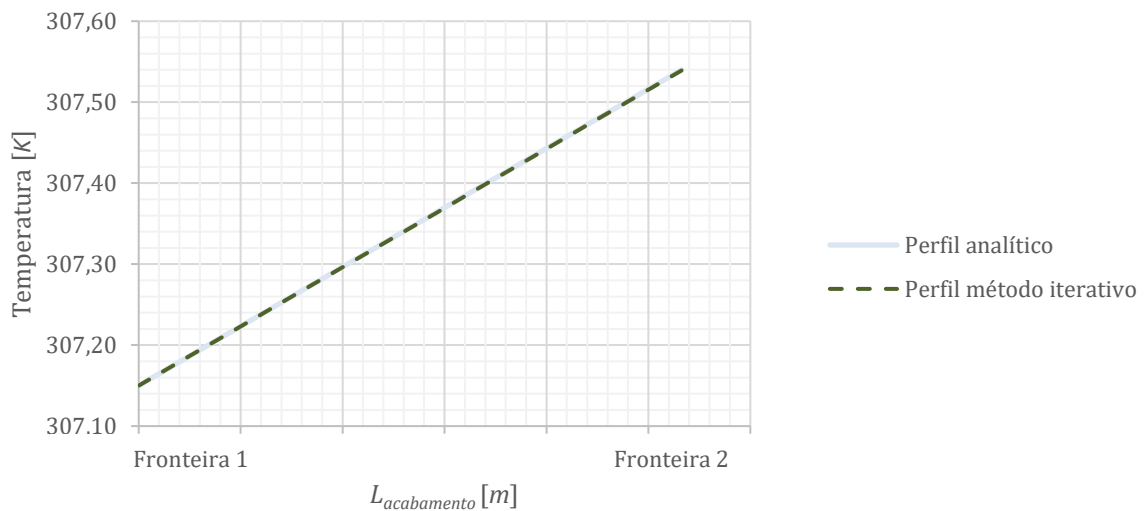


Figura 5. Representação gráfica do perfil de temperatura, T , resultantes da resolução analítica e da resolução do método iterativo (estudo V1)

Comparando os perfis apresentados na Figura 5 é possível observar que estes são praticamente coincidentes. Comparando também os valores de fluxo de calor obtidos, é possível observar que estes apresentam o mesmo valor para ambos os métodos de resolução: $54,80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

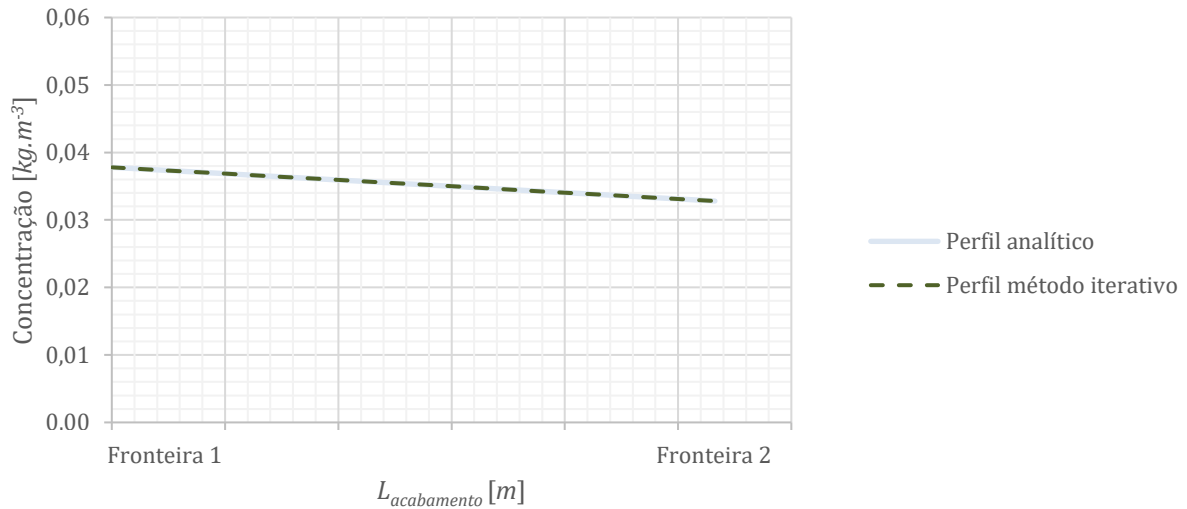


Figura 6. Representação gráfica dos perfis de concentração, C_v , resultantes da resolução analítica e da resolução do método iterativo (estudo V2)

Por consulta da Figura 6, é possível observar que os perfis de concentração são concordantes. Não só isso, como também a taxa de evaporação de água possui o mesmo valor: $8,90 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Tendo em conta os valores obtidos para os estudos apresentados, considera-se adequada a forma de implementação do método iterativo ao modelo considerado.

4.2 Estudo dos parâmetros críticos

Após o estudo 1 na Tabela 2 (características *default*) foi estudada a influência da variação das características do acabamento. Os resultados, que são apresentados a seguir, apresentam todos os valores, incluindo os *default*.

4.2.1 Efeito da variação da fracção de sólidos

Para os estudos 2 e 3 foi realizada uma variação da fracção de sólidos i.e., variou-se a quantidade de sólidos (polímero e malha) no volume total do acabamento. A taxa de água evaporada na pele para diferentes fracções de sólidos é apresentada na Figura 7.

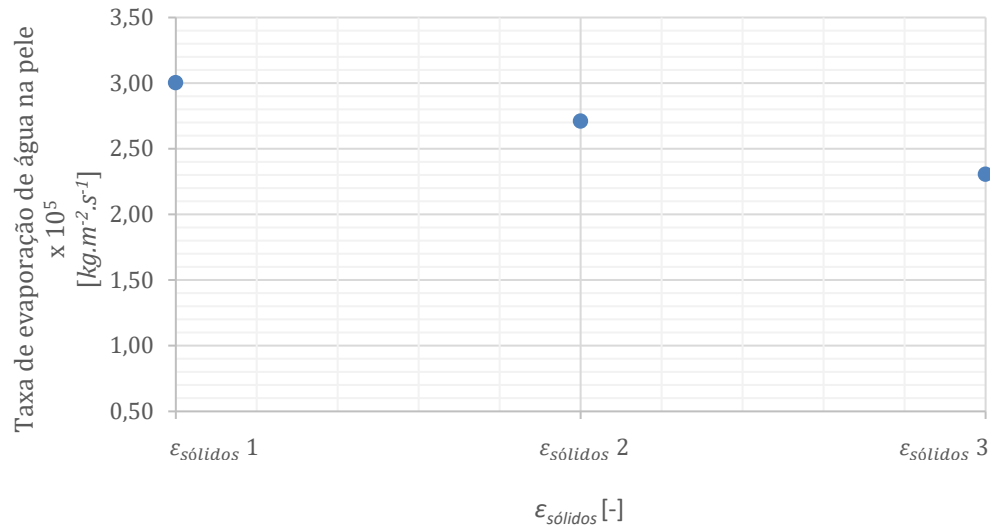


Figura 7. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^5$, em kg.m⁻².s⁻¹, em função dos valores assumidos para a fracção de sólidos, $\epsilon_{\text{sólidos}}$ (estudos 2 e 3 da Tabela 2)

Analisando a Figura 7 é possível observar que um aumento de $\epsilon_{\text{sólidos}} 1$ para $\epsilon_{\text{sólidos}} 3$ implica uma diminuição de cerca de 30% na taxa de evaporação de água na pele. Esta tendência é justificada pelo facto de o aumento de $\epsilon_{\text{sólidos}}$ implicar uma diminuição do volume de poros por unidade de volume do acabamento, o que por sua vez faz com que a difusividade efectiva do vapor de água diminua (equação (20); Figura 8):

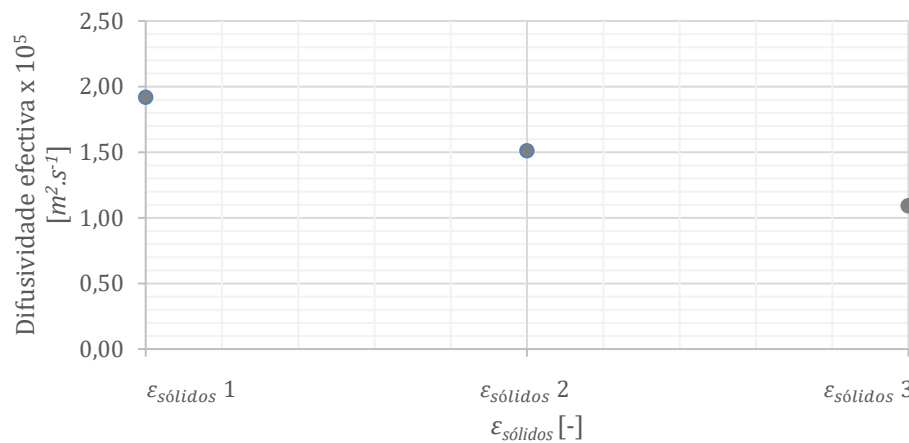


Figura 8. Representação gráfica da difusividade efectiva, $D_{ef} \times 10^5$, em m².s⁻¹, em função dos valores assumidos para a fracção de sólidos, $\epsilon_{\text{sólidos}}$ (estudos 2 e 3 da Tabela 2)

Com base na informação apresentada é possível concluir que um aumento de $\epsilon_{\text{sólidos}}$ é prejudicial para a transferência de vapor de água ao longo do acabamento.

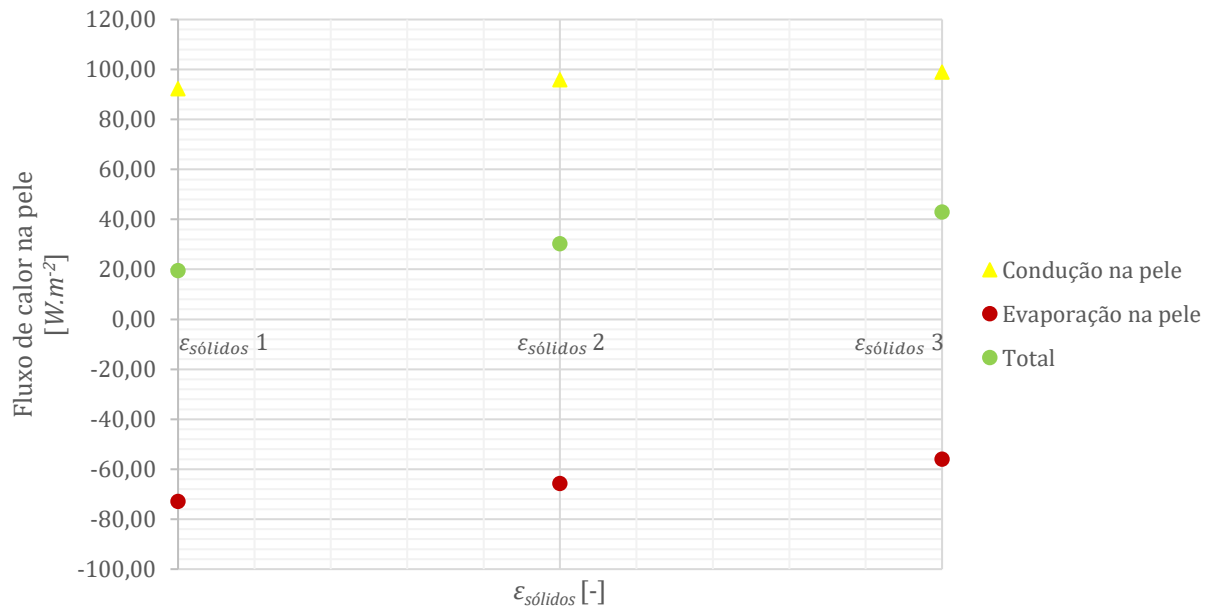


Figura 9. Representação gráfica da variação do fluxo de calor ganho pela pele, $\dot{q}$, em W.m^{-2} , em função dos valores assumidos para a fracção de sólidos, $\epsilon_{\text{sólidos}}$ (estudos 2 e 3 da Tabela 2)

O fluxo de calor, por sua vez, aumenta 7% para uma variação de $\epsilon_{\text{sólidos}}$ 1 para $\epsilon_{\text{sólidos}}$ 3. Este aumento era esperado, já que a condutividade da fase sólida é muito superior à do ar. Um aumento em $\epsilon_{\text{sólidos}}$ aumenta a proporção de sólidos e, por consequência, aumenta a condução de calor. Este aumento significa que a superfície da pele está a receber cada vez mais calor por condução (pontos a verde na Figura 9). Por outro lado, a quantidade de calor gasta na evaporação diminui com o aumento de $\epsilon_{\text{sólidos}}$ (pontos a vermelho na Figura 9). Conjugando estes dois comportamentos, vai haver mais calor que passa para o condutor (pontos a verde na Figura 9).

Concluindo, um aumento de $\epsilon_{\text{sólidos}}$ 1 para $\epsilon_{\text{sólidos}}$ 3 faz diminuir em cerca de 30% a taxa de evaporação de água na pele. Por outro lado, leva a um aumento de 7% no fluxo de calor que chega à pele, factores que se conjugam e levam a um aumento do fluxo de calor que passa para o condutor.

4.2.2 Efeito da variação da espessura do acabamento

Nos estudos 4 e 5 (Tabela 2) foi analisada o efeito da espessura do acabamento.

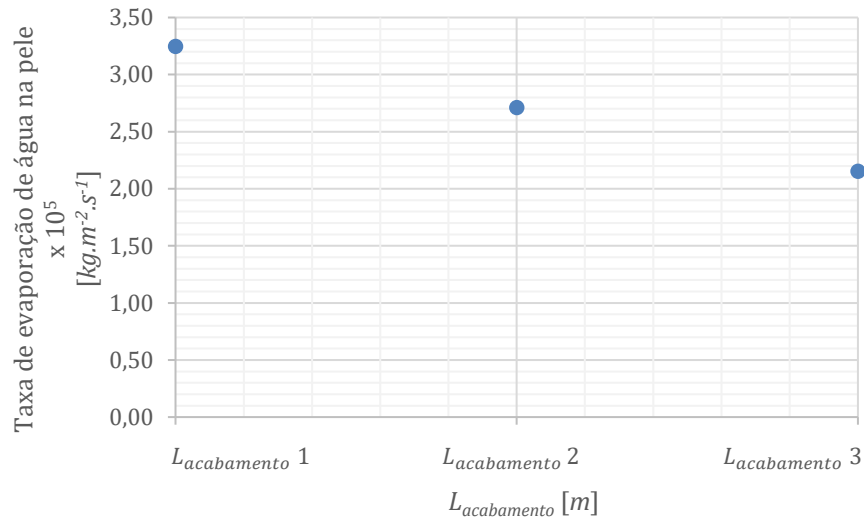


Figura 10. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^5$, em $kg.m^{-2}.s^{-1}$, em função dos valores assumidos para a espessura do acabamento, $L_{\text{acabamento}}$, em m (estudos 4 e 5 da Tabela 2)

Um aumento de $L_{\text{acabamento 1}}$ para $L_{\text{acabamento 2}}$ leva a uma diminuição na taxa de evaporação de água na pele de 26% (Figura 10).

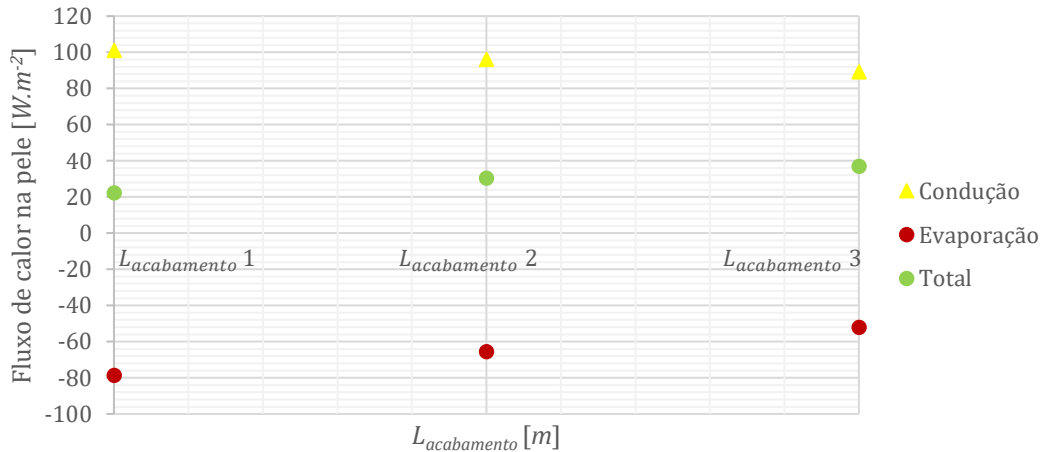


Figura 11. Representação gráfica do fluxo de calor na pele, $\dot{q}$, em $W.m^{-2}$, em função dos valores assumidos para a espessura do acabamento, $L_{\text{acabamento}}$, em m (estudos 4 e 5 da Tabela 2)

É possível observar na Figura 11 que, aumentando a espessura do acabamento de $L_{\text{acabamento 1}}$ para $L_{\text{acabamento 2}}$, há uma diminuição de 8% no fluxo de calor que chega à pele e de 26% na taxa de calor gasta na evaporação da água. Globalmente, como se pode ver na figura, o fluxo de calor que passa para o condutor (pontos a verde) aumenta. Assim, é possível concluir que o conforto do condutor é negativamente influenciado pelo aumento de $L_{\text{acabamento}}$.

4.2.3 Efeito da quantidade de polímero

As camadas de polímero e de malha perfazem a fase sólida do acabamento. Através dos estudos 6 e 7 na Tabela 2, é possível analisar o efeito da quantidade de polímero nos fenómenos de transferência considerados. O valor para a quantidade de polímero foi calculado internamente pela *TMG Automotive*, da seguinte forma:

$$\varepsilon_{polímero} = \frac{V_{polímero}}{V_{total\ sólidos}} \quad (40)$$

onde $V_{polímero}$ representa o volume do polímero, em m^3 e $V_{total\ sólidos}$ o volume total da fase sólida em m^3 .

Neste estudo a fracção total da fase sólida é mantida constante. Assim, como os fenómenos de transporte de massa apenas ocorrem no meio gasoso, qualquer que seja a variação em $\varepsilon_{polímero}$, estes fenómenos não vão ser alterados. Da mesma forma se pode concluir que uma alteração do tipo de polímero não influencia a transferência de massa.

Na transferência de calor vão ocorrer alterações. Na equação (17) é possível observar que uma alteração em $\varepsilon_{polímero}$ vai influenciar a condutividade da fase sólida, $k_{sólidos}$. Tal variação é verificada na Figura 12.

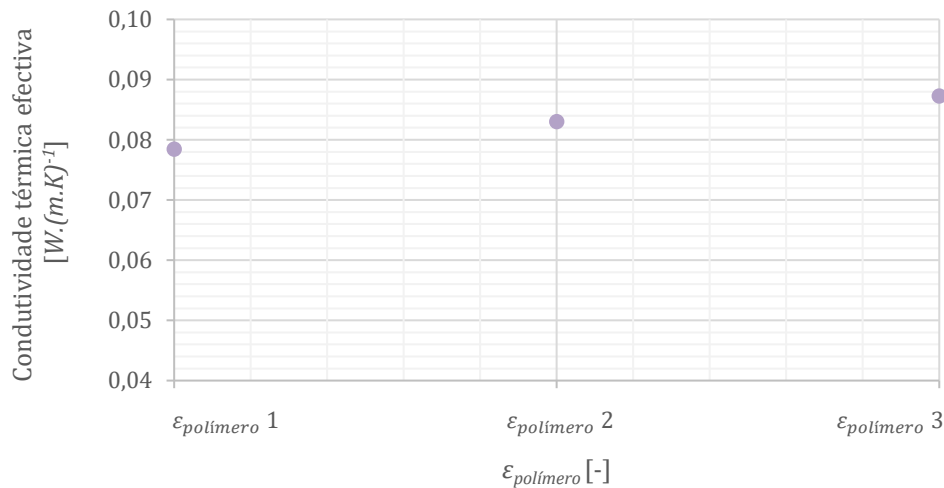


Figura 12. Representação gráfica da condutividade térmica efectiva, k_{ef} , em $W.(m.K)^{-1}$, em função dos valores assumidos para a fracção de polímero, $\varepsilon_{polímero}$ (estudos 6 e 7 da Tabela 2)

Esta variação influencia de uma forma pouco significativa o fluxo de calor ganho pela pele, como é visível na figura 13:

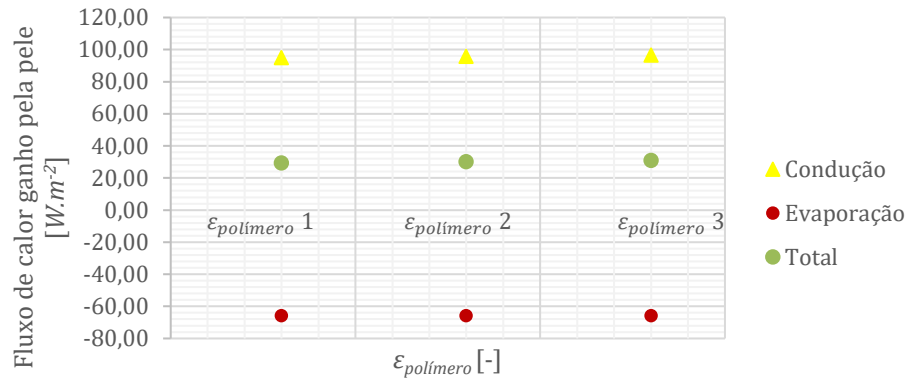


Figura 13. Representação gráfica do fluxo de calor na pele, $\dot{q}$, em $W.m^{-2}$, em função dos valores assumidos para fracção de polímero, $\epsilon_{polímero}$ (estudos 6 e 7 da Tabela 2)

Para uma variação de $\epsilon_{polímero 2}$ para $\epsilon_{polímero 3}$, o fluxo de calor apenas varia 1,60% e o fluxo de água evaporada 0,03%. Por isso é possível dizer que $\epsilon_{polímero}$ tem pouca influência na *performance* do acabamento.

Ora, como a ordem de grandeza da condutividade de outros polímeros que a empresa inclui na fase sólida dos seus acabamentos é semelhante, é possível concluir que alterações do tipo de polímero não vão produzir nenhuma alteração na *performance* do acabamento.

4.2.4 Efeito da variação do coeficiente de condutividade térmica da fase de sólidos

Para a análise do efeito de $k_{sólidos}$ foram realizados os ensaios 8,9, 10 e 11 (Tabela 2).

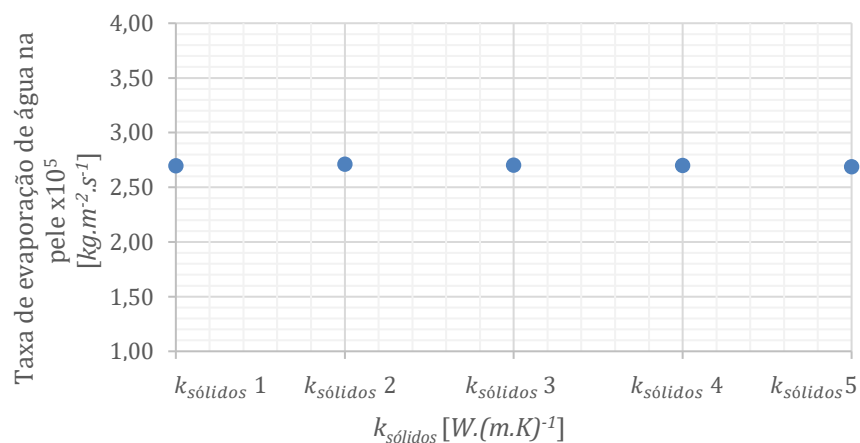


Figura 14. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^5$, em $kg.m^{-2}.s^{-1}$, em função dos valores assumidos para a condutividade térmica dos sólidos, $k_{sólidos}$ em $W.(m.K)^{-1}$ (estudos 8,9, 10, 11 da Tabela 2)

Analisando a Figura 14 é possível observar que a variação de $k_{sólidos}$ não altera significativamente a taxa de evaporação de água na pele.

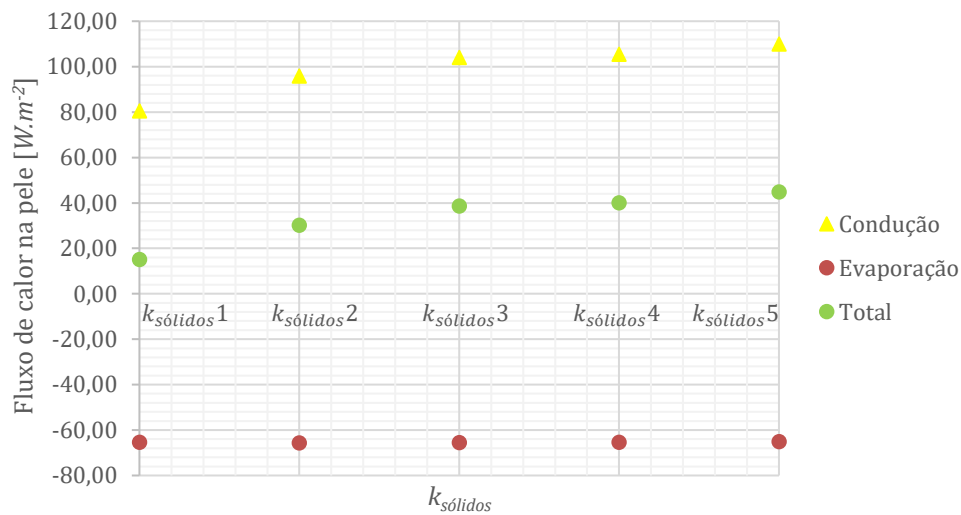


Figura 15. Representação gráfica do fluxo de calor na pele, $\dot{q}$, em $W.m^{-2}$, em função dos valores assumidos para a condutividade térmica dos sólidos, $k_{sólidos}$, em $W.(m.K)^{-1}$ (estudos 8, 9, 10 e 11 da Tabela 2)

Na Figura 15, observa-se que o fluxo de calor aumenta com o aumento da condutividade térmica dos sólidos (pontos a amarelo). Este aumento é menos acentuado para valores elevados de $k_{sólidos}$. Por sua vez, a quantidade de calor gasta na evaporação mantém-se constante (pontos a vermelho), o que era expectável a partir da equação (8). A combinação destes dois comportamentos faz com que o fluxo de calor que entra no condutor (pontos a verde) aumente ao mesmo ritmo que o fluxo de calor por condução.

4.2.5 Efeito da variação da tortuosidade dos poros

Este estudo foi realizado como teste de uma forma alternativa à perfuração actualmente realizada na *TMG Automotive*.

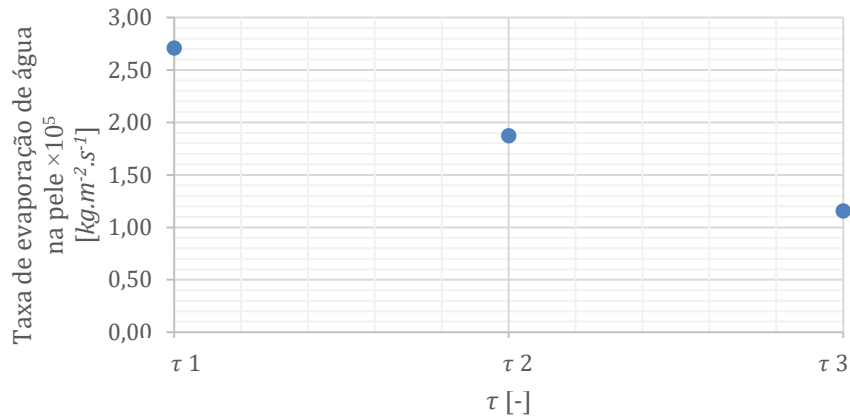


Figura 16. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^5$, em $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, em função dos valores assumidos para a tortuosidade, τ (estudos 12 e 13 da Tabela 2)

Entre $\tau 1$ e $\tau 2$ a taxa de evaporação de água na pele diminui em 45%. Esta tendência é justificada pela equação (20) e pode ser observada na figura 17:

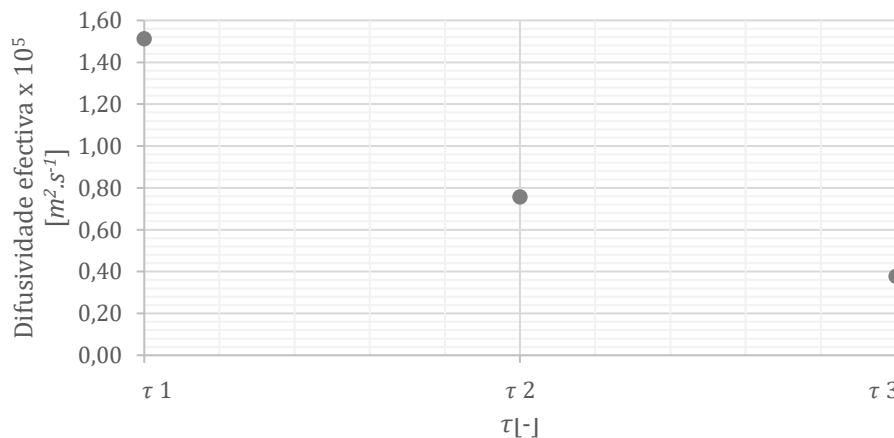


Figura 17. Representação gráfica da difusividade efectiva, $D_{ef} \times 10^5$, em $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$, em função dos valores assumidos para a tortuosidade, τ (estudos 12 e 13 da Tabela 2)

Como é possível observar na figura 17, um aumento da tortuosidade implica uma diminuição de D_{ef} , o que justifica a tendência da taxa de água.

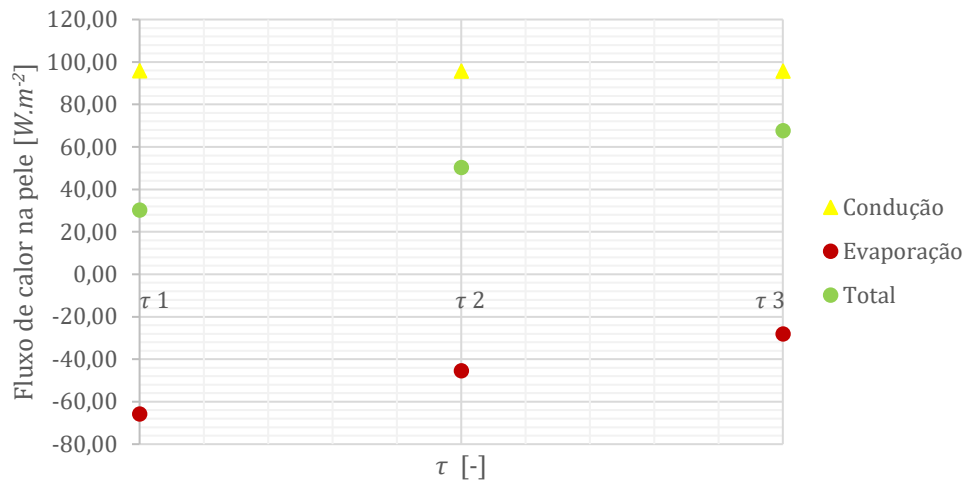


Figura 18. Representação gráfica do fluxo de calor na pele, $\dot{q}$, em $W.m^{-2}$, em função dos valores assumidos para a tortuosidade, τ (estudos 12 e 13 da Tabela 2)

Por sua vez, o fluxo de calor por condução no acabamento mantém-se praticamente constante. A quantidade de calor gasta na evaporação é proporcional à taxa de água evaporada, como é possível analisar na equação (23) e por conseguinte aumenta. Assim, quanto maior a tortuosidade maior o fluxo de calor que entra no condutor (pontos a verde na figura). Para uma variação de $\tau 1$ para $\tau 2$, este fluxo aumenta em cerca de 40%.

4.2.6 Efeito da variação da composição da malha

Na malha consideraram-se diferentes composições, ensaios 14, 15, 16 e 17.

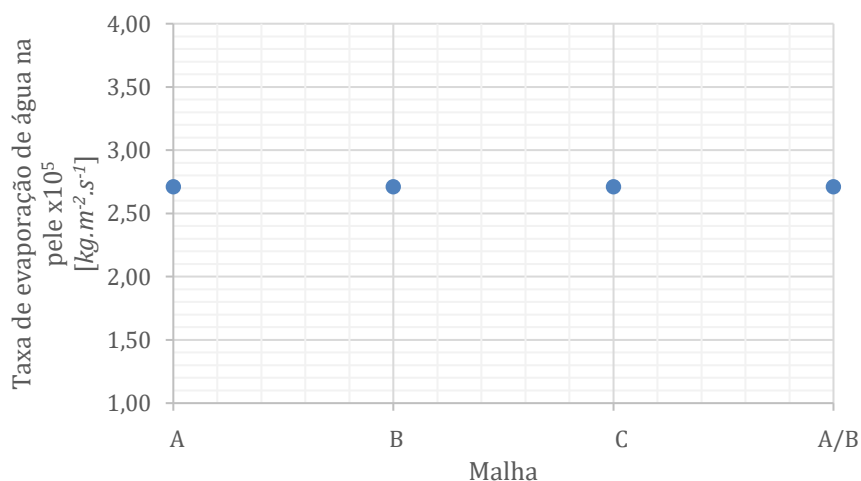


Figura 19. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^5$, em $kg.m^{-2}.s^{-1}$ em função dos tipos de malha considerados (estudos 14, 15, 16 e 17 da Tabela 2)

Pela análise da figura é possível concluir que as alterações na malha não afectam a taxa de evaporação da água. O que seria de esperar, porque este fenómeno apenas ocorre nos poros.



Figura 20. Representação gráfica do fluxo de calor na pele, $\dot{q}$, em $W.m^{-2}$, em função dos tipos de malha considerados (estudos 14, 15, 16 e 17 da Tabela 2)

Os fluxos de calor por condução e o gasto na evaporação não registam igualmente variações significativas. Assim é possível concluir que, para o cenário considerado, uma alteração na malha não influencia significativamente o transporte de calor e de vapor de água no acabamento, não influenciando assim o conforto do condutor.

Concluído o estudo de todos os parâmetros, é possível definir quais os que são críticos e que devem ser consideradas no *design* de futuros acabamentos. A espessura é o parâmetro que mais influencia e deve ser a mínima possível para potenciar os fenómenos de transferência. O parâmetro que mais influencia a transferência de massa é a fracção de sólidos, $\varepsilon_{sólidos}$, com a tortuosidade a ter também um papel importante. Já a perfuração alternativa não traz qualquer vantagem. A condutividade térmica dos sólidos é a característica crítica no que toca à transferência de calor.

4.3 Estudo da influência das condições ambiente do habitáculo

Terminada a análise do efeito dos parâmetros é agora objecto de estudo o efeito das condições ambiente no habitáculo.

4.3.1 Variação da temperatura ambiente

Os resultados dos ensaios para o efeito da temperatura ambiente na transferência de massa, estão representados na Figura 21.

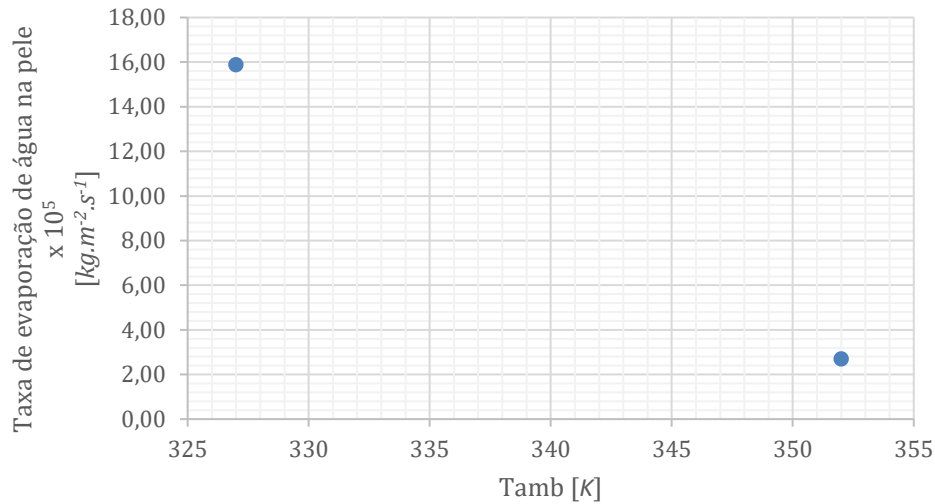


Figura 21. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^5$, em $kg.m^{-2}.s^{-1}$, em função da temperatura ambiente, T_{amb} , em K

Pela figura é possível observar que diminuindo a temperatura ambiente de 352 K para 293 K há um aumento de 485% na taxa de água evaporada. As forças directrizes da transferência de calor e de massa passam a ser agora no sentido da pele para o ambiente. Neste cenário, o facto de o corpo libertar calor implica um aumento da taxa de evaporação de água na pele.

Para a transferência de calor, os resultados são apresentados na Figura 22.

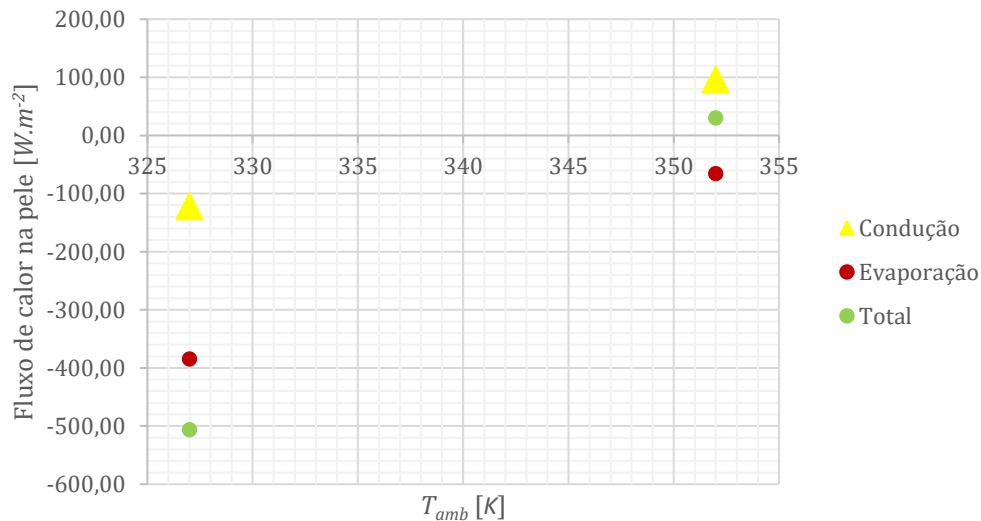


Figura 22. Representação gráfica da variação do fluxo de calor na pele, $\dot{q}$, em $W.m^{-2}$, em função da temperatura ambiente, T_{amb} , em K

Na análise à figura é possível observar que o fluxo de calor inverte o seu sentido, i.e. passa a ser no sentido do ambiente (ponto a amarelo com um valor negativo). Uma quantidade de calor na ordem dos 507,00 $W.m^{-2}$ irá ser retirada do corpo do condutor (ponto a verde na

figura) sendo a maior parte gasta na evaporação (ponto a vermelho) e uma pequena parte (ponto amarelo) sai após condução no acabamento para o ambiente.

Concluindo, um valor de temperatura abaixo da temperatura da pele vai inverter o sentido do fluxo de calor, passando o corpo a libertar energia. No caso da temperatura ambiente a 293 K, quando comparado às condições ambiente *standard* ($T_{amb} = 313 K$), a taxa de vapor de água e a quantidade de calor gasta na evaporação aumentam 485%. O calor conduzido, embora em sentido diferente, regista um aumento de 27%.

4.3.2 Variação da humidade relativa ambiente

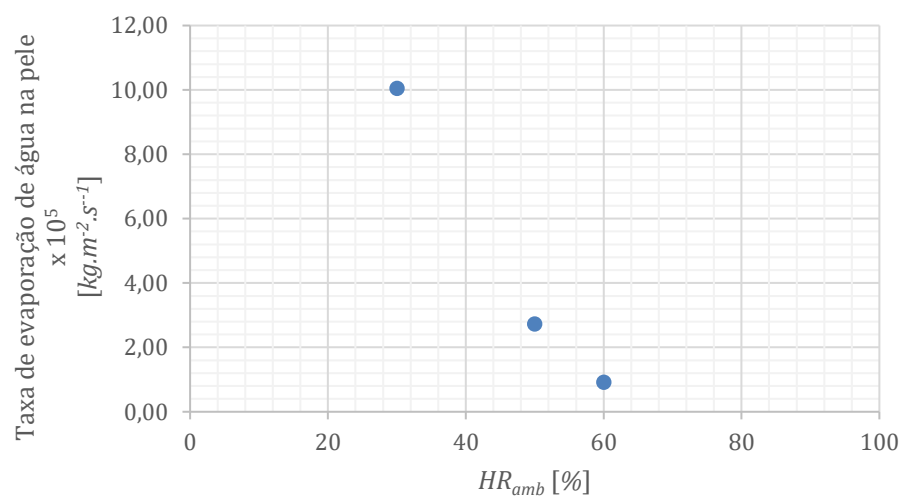


Figura 23. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^5$, em $kg.m^{-2}.s^{-1}$, em função da humidade relativa ambiente, HR_{amb} , em %

A humidade relativa ambiente tem uma influência negativa na transferência de massa: para uma diminuição de 30% em HR_{amb} , a taxa de evaporação de água diminui aproximadamente 988%. Com ar mais saturado, a força directriz para a transferência de massa (diferença entre a concentração de vapor no ambiente e na superfície da pele) diminui. Com menor força directriz, $\dot{m}$ é menor.

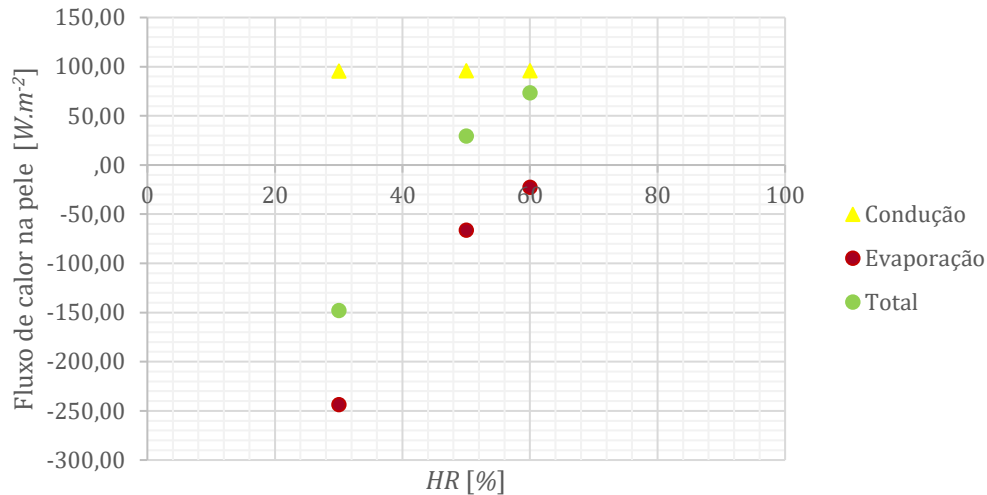


Figura 24. Representação gráfica do fluxo de calor na pele, $\dot{q}$, em $W.m^{-2}$, em função da umidade relativa ambiente, HR_{amb} , em %

Quanto à transferência de calor, observa-se na Figura 24 que HR_{amb} não influencia a condução de calor. Tem, no entanto, influência no calor gasto na evaporação da água, diminuindo à medida que HR_{amb} aumenta; para um aumento de 30% em HR_{amb} , a evaporação diminui em, aproximadamente, 988%.

Para o caso de $HR_{amb} = 30\%$ tanto o fluxo de calor que chega à pele por condução (ponto a amarelo) como o fluxo de calor libertado pelo corpo (ponto a verde) são integralmente gastos na evaporação de água (ponto a vermelho).

A umidade relativa ambiente tem, então, uma influência muito significativa na taxa de vapor de água na superfície da pele e no fluxo de calor que é libertado pelo corpo (termorregulação), não tendo significativa influência na condução de calor para a pele.

4.3.3 Variação da velocidade do ar ambiente

A variação de velocidade do ar ambiente (estudos 21, 22 e 23; Tabela 3) altera a convecção de calor e de massa na superfície do acabamento exposta ao ar ambiente.

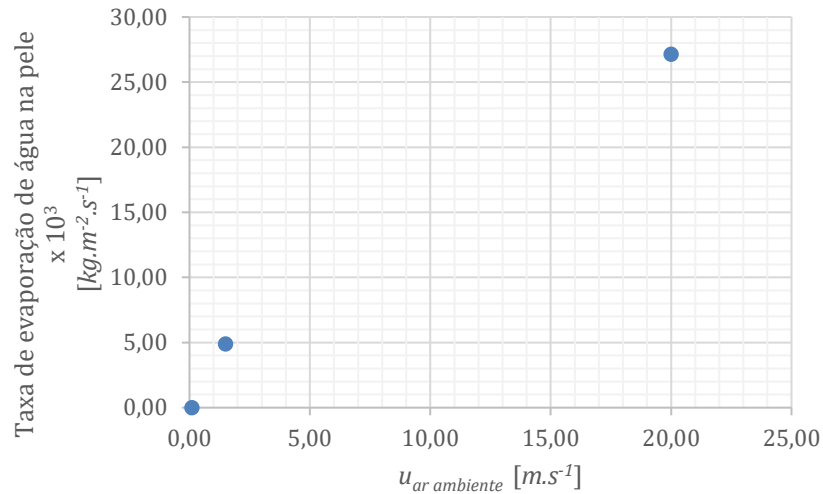


Figura 25. Representação gráfica da taxa de evaporação de água na pele, $\dot{m} \times 10^3$, em $kg.m^{-2}.s^{-1}$, em função da velocidade do ar ambiente, $u_{ar\ amb}$, em $m.s^{-1}$

Pela análise da Figura 25 é possível concluir que um aumento de $u_{ar\ amb}$ faz com que $\dot{m}$ também aumente. No entanto, esta variação é muito mais significativa para valores reduzidos da velocidade. Esta tendência é semelhante à encontrada para o parâmetro $k_{sólidos}$. À superfície do acabamento, existem limites máximos para os fluxos de calor e de vapor de água. Estes limites são atingidos quando a temperatura da superfície se aproxima assintoticamente da temperatura do ar ambiente e o teor em vapor de água se aproxima da humidade relativa do ar ambiente.

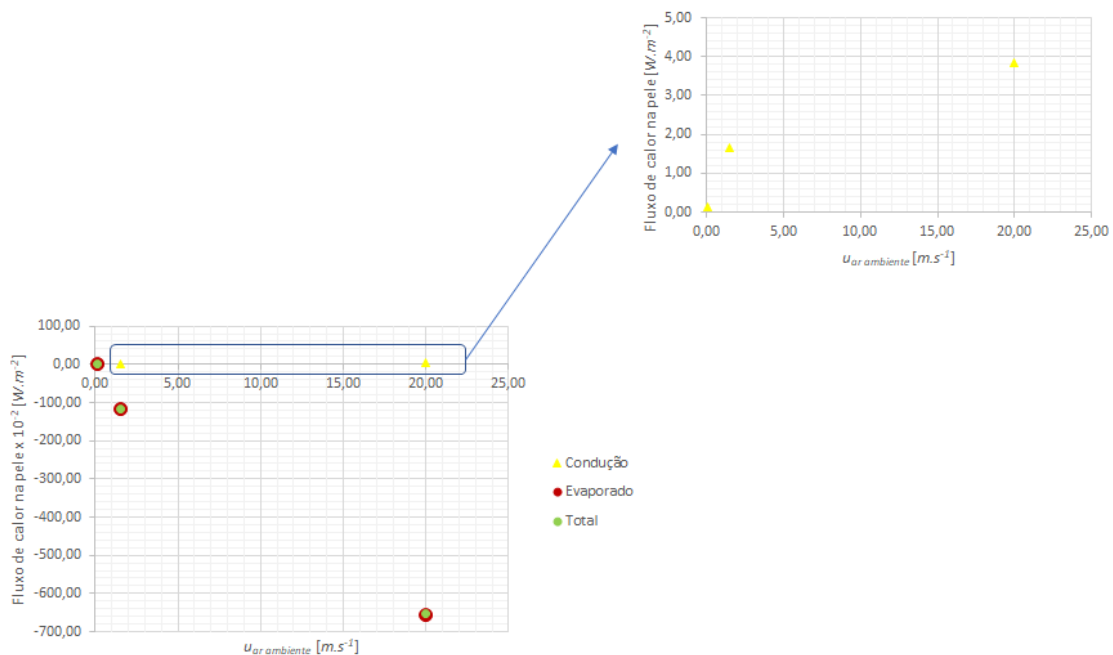


Figura 26. Representação gráfica do fluxo de calor na pele, $\dot{q} \times 10^{-2}$, em $W.m^{-2}$, em função da velocidade do ar ambiente, $u_{ar\ amb}$, em $m.s^{-1}$

Tal como para a taxa de água evaporada, verifica-se no fluxo de calor uma variação cada vez menor à medida que a velocidade aumenta. Sendo que para todos estes casos o fluxo de calor é quase totalmente gasto na evaporação. Em conclusão, o aumento de $u_{ar\ amb}$ é benéfico para a transferência de calor e de massa. Estas informações permitem inferir que a ventilação no interior dos assentos é muitíssimo vantajosa para a melhoria das condições de conforto.

Resumindo, o acabamento está sob maior *stress* quando exposto a temperaturas e humidades relativas altas e quando o ar do habitáculo se encontra praticamente estagnado.

5 Conclusões

A ferramenta que permite a determinação das características críticas do acabamento *respirável* e a análise simples e sistemática de diferentes acabamentos deste tipo foi construída numa folha de cálculo de *Microsoft Office Excel*. Para a obtenção dos valores do fluxo de calor na pele (condução e evaporação) e da taxa de evaporação de água na pele foi considerado um modelo em que o acabamento se encontra exposto a um ambiente quente. Os balanços de energia e calor são resolvidos através de um método iterativo de diferenças finitas. No fim dos estudos realizados é possível concluir que:

- A fracção de sólidos influencia significativamente a transferência de calor e massa. Para um aumento entre $\varepsilon_{\text{sólidos}} 1$ e $\varepsilon_{\text{sólidos}} 3$ o fluxo de calor diminui em 7%, enquanto que, para o mesmo aumento, a taxa de evaporação de água na pele diminui 30%;
- A espessura do acabamento também influencia negativamente os fluxos de calor e de massa. Um aumento de $L_{\text{acabamento}} 1$ para $L_{\text{acabamento}} 2$ faz diminuir a taxa de evaporação de água em 26% e o fluxo de calor na pele em 8%;
- A condução de calor pelos sólidos, embora não apresente uma influência significativa sobre a taxa de água evaporada, faz aumentar o fluxo de calor.
- Quanto maior a tortuosidade, menor a taxa de água evaporada. Um aumento de $\tau 1$ para $\tau 2$ resulta numa diminuição da taxa de evaporação de água na pele na ordem dos 45%;
- A composição da malha não possui um efeito significativo sobre as taxas de transferência de massa e calor;
- A alteração do tipo de polímero do acabamento e a variação de $\varepsilon_{\text{polímero}}$ não trazem vantagens a nível de conforto térmico;
- A espessura do acabamento é a característica mais crítica e que afecta ambos os fluxos de transferência;
- A fracção de sólidos é a característica crítica para a transferência de massa;
- A condutividade dos sólidos é a característica crítica para a transferência de calor;
- Uma temperatura ambiente abaixo da temperatura da pele, faz com que o fluxo de calor passe a ser da pele para o ambiente;
- O aumento da humidade relativa ambiente diminui a taxa de água evaporada na pele e, consequentemente, o fluxo de calor gasto na evaporação;
- Um aumento na velocidade do ar ambiente aumenta a taxa de água evaporada na fronteira entre o acabamento e o ar ambiente;
- A mesma tendência é observada para o fluxo de calor entre o acabamento e o ar ambiente;
- O acabamento é sujeito a um maior *stress* em condições de alta humidade relativa ambiente, alta temperatura e baixa velocidade de ar no habitáculo.

6 Avaliação do trabalho realizado

6.1 Objetivos Realizados

No final deste trabalho, é possível afirmar que todos os objectivos foram cumpridos. Foi criada uma ferramenta para utilização futura por parte da *TMG Automotive* para avaliação de diferentes acabamentos. Esta ferramenta resolve de forma sistemática os balanços globais de calor e massa. Foi também possível determinar as características críticas e perceber a influência de condições ambiente nos resultados do modelo.

6.2 Limitações e Trabalho Futuro

Este trabalho sofreu limitações pois não foi possível, no período de tempo do trabalho, obter valores experimentais para várias grandezas necessárias para os cálculos. Embora os valores assumidos não estejam longe da realidade, a precisão do estudo podia ter sido reforçada com valores experimentais.

Outra limitação prende-se no facto do modelo ser em estado estacionário, pelo que não permite analisar possíveis alterações de comportamento que possam ocorrer ao longo do tempo (p.e. efeito da inércia térmica do acabamento). A simulação em estado transiente implicaria um grau de dificuldade muito mais elevado. Para além disso seria necessária uma ferramenta numérica mais eficaz na resolução dos sistemas de equações. Como trabalho futuro sugere-se que o modelo matemático seja melhorado e considere duas hipóteses com bastante relevância para esta área de estudo: condensação de água no interior do assento do automóvel e a resposta térmica do corpo (p.e. considere o calor metabólico).

Um trabalho futuro pode incidir sobre as gamas óptimas de cada uma das grandezas em estudo (fracções das diferentes fases, espessura, condutividade térmica, etc.) através de um estudo em estado transiente. Será também possível através de estudos experimentais (manequim térmico seria um exemplo) realizar testes que confirmem as conclusões deste estudo.

6.3 Apreciação Final

Concluído este trabalho, é possível afirmar que o resultado final é positivo. Os estudos aqui realizados são extensos e permitem um maior conhecimento sobre os fenómenos de transferência que ocorrem no acabamento. Com estas informações, a *TMG Automotive* pode

progredir no desenvolvimento do acabamento *respirável*. Embora com diversas dificuldades, foi possível atingir os objectivos pretendidos e deixar a *TMG Automotive* com uma ferramenta que poderá ser utilizada doravante.

Referências

- [1] A. Fujita, J. Kanemaru, H. Nakagawa, and Y. Ozeki, "Numerical simulation method to predict the thermal environment inside a car cabin," *JSAE Rev.*, vol. 22, pp. 39-47, 2001.
- [2] A. C. Guyton and J. E. Hall, *Tratado de fisiologia médica*, 11^a. Rio de Janeiro, 2006.
- [3] S. Paulke and E. Kreppold, "The Application of Thermal Simulation Techniques for Seat Comfort Optimizations," *Simvec*, pp. 1-27, 2008.
- [4] G. Pamuk and F. Çeken, "Comparative study of the abrasion resistance of automobile seat covers," *Fibres Text. East. Eur.*, vol. 16, no. 4, pp. 57-61, 2008.
- [5] S. K. Kim, S. W. White, A. K. Bajaj, and P. Davies, "Simplified models of the vibration of mannequins in car seats," *J. Sound Vib.*, vol. 264, no. 1, pp. 49-90, 2003.
- [6] G. Karimi, E. C. Chan, and J. R. Culham, "Thermal Modeling of Driver / Seat Interfaces in Automotive Applications," pp. 1-7, 2004.
- [7] M. El-homossani, M. Abdel Gawad, T. F. Khalifa, and H. Said Hafez, "Achieving Optimum Thermal Comfort Properties for Automotive Seat Fabrics," *Int. J. Adv. Res. Sci. Eng.*, vol. 4, no. 11, pp. 424-435.
- [8] <https://www.clublexus.com/forums/ls-3rd-gen-2001-2006/529435-seat-comfort.html>, acedido a 02/10/2017;
- [9] T. Orzechowski and Z. Skrobacki, "Evaluation of thermal conditions inside a vehicle cabin," *EPJ Web Conf.*, vol. 114, pp. 1-5, 2016.
- [10] A. Alahmer, A. Mayyas, A. A. Mayyas, M. A. Omar, and D. Shan, "Vehicular thermal comfort models; A comprehensive review," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 6-7, pp. 995-1002, 2011.
- [11] M. P. Reed, L. W. Schneider, and L. L. Ricci, "Survey of Auto Seat Design Recommendations for Improved Comfort," no. April, pp. 1-96, 1994.
- [12] C. Croitoru, I. Nastase, F. Bode, A. Meslem, and A. Dogeanu, "Thermal comfort models for indoor spaces and vehicles - Current capabilities and future perspectives," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 304-318, 2015.
- [13] <http://www.theseus-fe.com/simulation-software/human-thermal-model>, acedido a 10/10/2017;
- [14] Z. Adel, C. Marca, and C. Borot, "Development of a human thermal model To predict seat occupant thermal comfort," *First Int. Conf. Congr.*, pp. 1-8.

- [15] H. Zhang, "Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments," 2003.
- [16] P. O. Fanger, "Analysis and Applications in Environmental Engineering.," *Danish Tech. Press*, p. 244, 1970.
- [17] D. Fiala, "Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort," 1998.
- [18] <http://paulienrouts.com/un-portfolio/nissan-juke-soak/>, acedido a 29/10/2017;
- [19] Michael J. Brandemuehl, *Predicting Thermal Comfort*, vol. 42, no. 1971. 2005, pp. 3-6.
- [20] S. F. Neves, S. Couto, J. B. L. M. Campos, and T. S. Mayor, "Advances in the optimisation of apparel heating products: A numerical approach to study heat transport through a blanket with an embedded smart heating system," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 87, pp. 491-498, 2015.
- [21] B. Farnworth, "A Numerical Model of the Combined Diffusion of Heat and Water Vapor Through Clothing," *Text. Res. J.*, vol. 56, no. 11, pp. 653-665, 1986.
- [22] J. Fan, Z. Luo, and Y. Li, "Heat and moisture transfer with sorption and condensation in porous clothing assemblies and numerical simulation," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 43, no. 16, pp. 2989-3000, 2000.
- [23] G. Song and D. R. L. B. and D. H. Hamouda, "Modeling Thermal Protection Outfits for Fire Exposures," *Fiber Polym. Sci.*, vol. PhD, p. 209, 2002.
- [24] R. L. Barker *et al.*, "Modeling of Thermal Protection Outfits for Fire Exposures F01-NS50," North Caroline State, 2004.
- [25] P. Gibson and M. Charmchi, "The use of volume-averaging techniques to predict temperature transients due to water vapor sorption in hygroscopic porous polymer materials," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 64, no. 3, pp. 493-505, 1997.
- [26] P. Gibson and M. Charmchi, "The Use of Volume-Averaging Techniques to Predict Temperature Transients Due to Water Vapor Sorption in Hygroscopic Porous Polymer Materials," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 64, no. 3, pp. 493-505, 1997.
- [27] S. F. Neves, J. B. L. M. Campos, and T. S. Mayor, "On the determination of parameters required for numerical studies of heat and mass transfer through textiles - Methodologies and experimental procedures," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 81, pp. 272-282, 2015.
- [28] P. Gibson, M. Auerbach, J. Giblo, W. Teal, and T. Endrusick, "Interlaboratory Evaluation of a New Sweating Guarded Hot Plate Test Method (ISO 11092)," *J. Therm. Envel. Build. Sci.*, vol. 18, no. 2, pp. 182-200, 1994.

- [29] J. Huang, "Sweating guarded hot plate test method," *Polym. Test.*, vol. 25, no. 5, pp. 709-716, 2006.
- [30] S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Taylor & Francis, 1980.
- [31] T. G. Cengiz and F. C. Babalik, "An on-the-road experiment into the thermal comfort of car seats," *Appl. Ergon.*, vol. 38, no. 3, pp. 337-347, 2007.
- [32] S. F. Neves, J. B. L. M. Campos, and T. S. Mayor, "Effects of clothing and fibres properties on the heat and mass transport, for different body heat/sweat releases," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 117, pp. 109-121, 2017.
- [33] J. Null, "Study of Excessive Temperatures in Enclosed Vehicles," 2003.
- [34] International Standard Organization, "ISO 15831(2004) Clothing - Physiological effects - Measurement of a thermal manikin," *Int. Organ. Stand.*, 2004.
- [35] <http://thermopedia.com/content/660/>, acedido a 25/11/2017;
- [36] https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html, acedido a 25/11/2017;
- [37] https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html, acedido a 25/11/2017;
- [38] <http://www.3m.com/market/consumer/thinsulate/warmtips4.html>, acedido a 26/09/2017;
- [39] <http://textilecalculation.blogspot.com/2015/08/standard-moisture-regain-and-moisture.html>, acedido a 30/09/2017;
- [40] https://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d_595.html, acedido a 25/11/2017;
- [41] https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html, acedido a 25/11/2017;
- [42] K. Raznjevic, *Tables et Diagrammes Thermodynamiques*. 1970.
- [43] Ansi/Ashrae, "ANSI/ASHRAE 55:2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy," *Ashrae*, vol. 2004, p. 30, 2004.
- [44] M. Fountain and E. A. Arens, "Air movement and thermal comfort," *ASHRAE J.*, vol. 35, no. 8, pp. 26-30, 1993.
- [45] L. Lopes De Oliveira, "Transmissão De Calor: Convecção forçada e natural." pp. 1-13, 2014.

- [46] https://www.engineeringtoolbox.com/dry-air-properties-d_973.html, acedido a 25/11/2017;
- [47] <http://shop4seats.com/truck-seats/40-20-40-truck-seats/american-classic-high-back-bench-seat.html>, acedido a 29/09/2017;
- [48] https://www.engineeringtoolbox.com/dry-air-properties-d_973.html, acedido a 25/11/2017;

Anexo 1. Características físicas do acabamento em estudo

Devido a um contrato de confidencialidade assinado com a *TMG Automotive* este anexo não pode ser apresentado

Anexo 2. Características físicas dos diferentes componentes e fases do acabamento considerado

Devido a um contrato de confidencialidade assinado com a *TMG Automotive* este anexo não pode ser apresentado

Anexo 3. Resultados dos testes de grelha realizados

Tabela 5. Resultados obtidos para os diferentes testes de grelha realizados

Número de pontos de grelha	Fluxo de calor ganho pela pele [$W.m^{-2}$]	Critério de convergência - fluxo de calor [%]	Taxa de vapor de água na pele [$kg.m^{-2}.s^{-1}$]	Critério de convergência - taxa de vapor de água [%]
22	96,00	0,009	$2,71 \times 10^{-5}$	0,04
50	96,10	0,001	$2,73 \times 10^{-5}$	0,02
100	96,00	0,003	$2,70 \times 10^{-5}$	0,07

É possível observar que os valores para o fluxo de calor e o fluxo de massa não variam com o aumento de número de pontos da grelha, o que significa que o cálculo destes valores não é afectado por variações na partição do domínio. O erro, no entanto, aumenta, nunca ultrapassando o erro máximo considerado para a ocorrência de convergência. Esta tendência pode ser explicada pelo aumento do número de vezes que o processo iterativo é repetido. Processo que ao ser repetido um maior número de vezes induz maior erro.