



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Caracterização da Interação Térmica entre uma Matriz Porosa Metálica e um Escoamento – Aplicação a um Colector Solar

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

Autora

Joana Rita Matos Pecêgo

Júri

Presidente Professor Doutor José Joaquim da Costa
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo
Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra

Vogal Professor Doutor José Carlos Miranda Góis
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho de 2012

Aos meus pais.

Agradecimentos

Embora a dissertação de mestrado seja, pela sua finalidade académica, um trabalho individual, a sua realização não seria possível sem o contributo de várias pessoas. É com satisfação que expresso o meu agradecimento:

Ao Professor Doutor Rui Figueiredo, orientador da minha dissertação, por me ter proposto este tema que superou as minhas expectativas, pela sua competência científica, pela disponibilidade, pela partilha de conhecimento e pelas sugestões e correcções relevantes no decorrer deste trabalho.

Ao Engenheiro Vítor Silva, pelo conhecimento científico que comigo partilhou, pela disponibilidade e generosidade que demonstrou ao longo da realização deste trabalho assim como pelas sugestões e correcções indispensáveis para o enriquecimento da minha dissertação.

Aos meus familiares que sempre me apoiaram, especialmente aos meus pais, por todo o amor, incentivo e confiança incondicionais.

Aos meus amigos de sempre e aos que conheci nestes 5 anos e que nunca esquecerei, pelo apoio e pelos momentos de alegria e diversão ao longo da vida académica, em especial à Patrícia Tenreiro que apesar da distância física está sempre “cá”, assim como à Célia e à Luísa, companheiras de casa e departamento, pelas palavras de conforto e apelo à calma nas tão temidas épocas de exame.

A todos o meu sincero e eterno agradecimento.

Resumo

As energias renováveis são cada vez mais utilizadas como forma de obter energia útil, em detrimento do recurso aos combustíveis fósseis, por estarem disponíveis a longo prazo e por não acarretarem efeitos negativos significativos associados à sua utilização ao invés das fontes não renováveis.

São necessários equipamentos que transformem a energia disponível, como por exemplo, o Sol, o vento, as marés, o calor interno da Terra, em energia útil.

Esta dissertação teve como objectivo a caracterização de uma matriz porosa metálica, a palha-de-aço, mais precisamente a determinação do seu coeficiente de transferência de calor por convecção. Esta matriz funciona como placa absorvedora num colector solar para aquecer ar que teve como função inicial a sua integração num sistema de secagem de produtos alimentares. A partir de estudos realizados anteriormente é possível afirmar que este equipamento apresenta uma boa eficiência térmica.

Foi construída uma instalação experimental e desenvolvido um modelo teórico que em conjunto permitem a determinação do valor pretendido.

Depois de realizados os vários ensaios experimentais e a respectiva comparação com os dados fornecidos pelo modelo teórico, chegou-se a um valor do coeficiente de transferência de calor da matriz aproximadamente igual a $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Foram também realizados ensaios que permitiram determinar o valor da pressão do fluido em escoamento, em vários pontos de medição colocados ao longo da conduta da instalação experimental. Foi possível, a partir desses valores, o cálculo de outro parâmetro que permite a caracterização da mesma matriz porosa, o coeficiente de permeabilidade, que neste caso é aproximadamente igual a $2,48 \times 10^{-8} \text{ m}^2$.

Palavras-chave: Energia Solar, Colector Solar, Secador Solar, Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção, Palha-de-Aço, Matriz Porosa Metálica, Coeficiente de Permeabilidade.

Abstract

Renewable energy is increasingly used as a way to get useful energy, rather than the use of fossil fuels, because they are available in the long term and would entail no significant negative effects associated with their use instead of non-renewable sources.

Equipment is required to transform the available energy, such as the sun, wind, tides, the earth's internal heat, into useful energy.

This work aimed at the characterization of a porous metallic matrix, steel wool, more precisely determine the coefficient of heat transfer by convection. This matrix works as an absorber plate in a solar collector to heat air that had the initial function integrate a system of drying food. From previous studies we can say that this equipment has a good thermal efficiency.

An experimental installation was constructed and developed a theoretical model which together allow the determination of the desired value.

After the various experimental tests performed and their comparison with data supplied by the theoretical model, there was obtained a value for the coefficient of heat transfer array is approximately $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ \text{C}$.

Have also been made tests used to determine the value of the pressure fluid in flow at various measuring points placed along the duct of the experimental installation. It was possible from these values, the calculation of another parameter that allows the characterization of the same porous matrix, the permeability coefficient, which in this case is approximately equal to $2.48 \times 10^{-8} \text{ m}^2$.

Keywords Solar Energy, Solar Collector, Solar Dryer, Convection Heat Transfer Coefficient, Steel Wool, Metal Porous Medium, Permeability Coefficient.

Índice

Índice de Figuras.....	v
Índice de Tabelas	vii
Simbologia.....	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objectivo	1
1.2. Enquadramento	1
1.3. Estrutura da Dissertação.....	3
2. ENERGIA SOLAR: FONTE RENOVÁVEL	4
2.1. Utilização da Energia Solar.....	6
2.1.1. Vantagens e Desvantagens	7
2.2. Aproveitamento da Energia Solar em Portugal	8
2.3. Caso de Estudo	8
3. COLECTORES SOLARES.....	10
3.1. Aplicações dos Colectores Solares	11
3.1.1. Secadores Solares	12
3.2. Protótipo do Colector Solar em Estudo.....	15
4. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	18
4.1. Caso de estudo: transferência de calor por convecção num meio poroso.....	22
4.1.1. Meios porosos.....	22
5. CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ POROSA METÁLICA	24
5.1. Metodologia e Equipamentos	25
5.1.1. Metodologia.....	25
5.1.2. Equipamentos	25
5.2. Programa de Simulação de Comportamento	26
5.3. Parâmetros Físicos	28
5.4. Ensaio Experimentais	29
5.4.1. Caracterização da Matriz: Determinação do Valor do Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção	29
5.4.2. Teste de Pressão na Instalação	44
6. CONCLUSÕES	53
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
8. APÊNDICE A.....	56
9. APÊNDICE B	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Variação da inclinação do eixo da Terra ao longo do ano (National Weather Service JetStream - Online School for Weather, 2012).....	6
Figura 2-2 Representação da órbita da Terra em torno do Sol (Quintela, 2009).	6
Figura 2-3 Variação da posição do eixo da Terra relativamente ao Sol (posição do observador “à frente” da Terra) (Quintela, 2009).....	6
Figura 3-1 Tipos de colectores solares (baseado em: Kalogirou, 2004; Panwar <i>et al.</i> , 2011).	10
Figura 3-2 Secador solar activo do tipo indirecto (Kalogirou, 2009).....	13
Figura 3-3 Secador solar activo do tipo directo (Kalogirou, 2009).....	13
Figura 3-4 Secador solar activo do tipo misto (Kalogirou, 2009).....	14
Figura 3-5 Protótipo do colector solar – vista geral (Silva <i>et al.</i> , 2010).....	16
Figura 3-6 Representação esquemática de um corte do protótipo do colector solar (Calçada, 2011).....	16
Figura 3-7 Representação do escoamento no interior do protótipo do colector solar (Pessêgo, 2010).....	17
Figura 5-1 Instalação experimental.....	26
Figura 5-2 Variação da temperatura adimensional em função da distância para o instante de 40 segundos.	31
Figura 5-3 Variação da temperatura adimensional em função da distância para o instante de 60 segundos.	32
Figura 5-4 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 10 cm de distância.	32
Figura 5-5 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 30 cm de distância.	33
Figura 5-6 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 60 cm de distância.	33
Figura 5-7 Variação da temperatura adimensional em função da distância quando H_p é 1/2 do valor de H, no fim de 60 segundos.	34
Figura 5-8 Variação da temperatura adimensional em função da distância quando H_p é 1/3 do valor de H, no fim de 60 segundos.	34
Figura 5-9 Variação da temperatura adimensional em função da distância quando H_p é 1/5 do valor de H, no fim de 60 segundos.	35
Figura 5-10 Variação da temperatura adimensional em função da distância para o instante de 40 segundos.	36
Figura 5-11 Variação da temperatura adimensional em função da distância para o instante de 60 segundos.	36
Figura 5-12 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 10 cm de distância.	37
Figura 5-13 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 30 cm de distância.	37
Figura 5-14 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 60 cm de distância.	38

Figura 5-15 Variação da temperatura adimensional em função da distância para o instante de 40 segundos.	39
Figura 5-16 Variação da temperatura adimensional em função da distância para o instante de 60 segundos.	39
Figura 5-17 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 10 cm de distância.	40
Figura 5-18 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 30 cm de distância.	40
Figura 5-19 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 60 cm de distância.	41
Figura 5-20 Valores de pressão ao longo da conduta e respectiva linha de tendência.	45
Figura 5-21 Valores de pressão ao longo da conduta e respectiva linha de tendência.	46
Figura 5-22 Valores de pressão ao longo da conduta e respectiva linha de tendência.	48
Figura 5-23 Relação entre a razão dos declives e a razão do quadrado das velocidades e comparação com a recta expectável ($y=x$). w e z correspondem a dois ensaios diferentes.	49
Figura 5-24 Variação do valor do coeficiente de permeabilidade em função da velocidade de ensaio e do troço da conduta.	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3-1 Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de secadores solares. Baseado em Fudholi, 2010.	15
Tabela 5-1 Parâmetros físicos e termofísicos a 25 °C (Çengel, 2007; Calçada, 2011)....	29
Tabela 5-2 Valores das variáveis dos 3 ensaios realizados.	31
Tabela 5-3 Resumo dos ensaios para a determinação de h	42
Tabela 5-4 Valores de pressão e da velocidade de escoamento ao longo da conduta.	45
Tabela 5-5 Valores de pressão e da velocidade de escoamento ao longo da conduta.	45
Tabela 5-6 Relação da razão dos declives com a razão do quadrado das velocidades.	46
Tabela 5-7 Valores de pressão e da velocidade de escoamento ao longo da conduta.	47
Tabela 5-8 Valores dos declives e das velocidades para cada ensaio.	48
Tabela 5-9 Relação da razão dos declives com a razão do quadrado das velocidades e sua variação.	49
Tabela 5-10 Gradientes de pressão.	50
Tabela 5-11 Valores do coeficiente de permeabilidade.	51
Tabela 8-1 Valores de temperatura do ar em função da distância obtidos experimentalmente para $t = 40$ s.	56
Tabela 8-2 Valores de temperatura do ar em função da distância obtidos experimentalmente para $t = 60$ s.	56
Tabela 8-3 Valores de temperatura do ar em função da distância obtidos experimentalmente para $t = 40$ s.	56
Tabela 8-4 Valores de temperatura do ar em função da distância obtidos experimentalmente para $t = 60$ s.	56
Tabela 8-5 Valores de temperatura do ar em função da distância obtidos experimentalmente para $t = 40$ s.	57
Tabela 8-6 Valores de temperatura do ar em função da distância obtidos experimentalmente para $t = 60$ s.	57

SIMBOLOGIA

- a - Área efectiva volúmica, m^2/m^3
 A - Área de transferência de calor, m^2
 A_p - Área da parede, m^2
 $A_{transf.}$ - Área de transferência de calor da matriz porosa, m^2
 c_p - Calor específico a pressão constante, $J/kg \cdot ^\circ C$
 c_{p_a} - Calor específico do ar, $J/kg \cdot ^\circ C$
 c_{p_m} - Calor específico da matriz, $J/kg \cdot ^\circ C$
 c_{p_p} - Calor específico da parede, $J/kg \cdot ^\circ C$
 D_x - Distância, m
 $D_{médio}$ - Diâmetro médio do elemento da matriz, m
 h - Coeficiente de transferência de calor por convecção, $W/m^2 \cdot ^\circ C$
 K – Coeficiente de permeabilidade, m^2 ou cm^2
 k - Condutividade térmica, $W/m \cdot ^\circ C$
 L - Comprimento, m
 \dot{m}_a - Caudal mássico de ar, kg/s
 m_m - Massa da matriz, kg
 m_p - Massa da parede, kg
 Nu – Número de Nusselt
 Pr – Número de Prandtl
 \dot{Q}_{cond} – Potência térmica por condução, W
 \dot{Q}_{conv} - Potência térmica por convecção, W
 \dot{Q}_{emiss} - Potência térmica por radiação, W
 \dot{Q}_p - Potência térmica transferida pela parede, W
 \dot{q}_{cond} - Fluxo de calor por condução, W/m^2
 \dot{q}_{conv} - Fluxo de calor por convecção, W/m^2
 Re – Número de Reynolds

T_a - Temperatura do ar, °C

T_m - Temperatura da matriz, °C

T_p - Temperatura da parede, °C

T_s - Temperatura da superfície, K ou °C

T_∞ - Temperatura do fluido suficientemente longe da superfície, K ou °C

V - Velocidade, m/s

V_{matriz} - Volume da matriz porosa metálica, m³

Δp - Variação de pressão, N/m²

Δt - Intervalo de tempo, s

ΔT - Diferença de temperatura através da parede, K ou °C

ΔT_a - Variação de temperatura do ar, K ou °C

Δx - Espessura da parede, m

Símbolos Gregos

σ - Constante de Stefan-Boltzmann, W/m². K⁴

α - Difusividade térmica, m²/s

ρ – Massa específica do fluido, kg/m³

ε – Porosidade

ν - Viscosidade cinemática do fluido, m²/s

μ - Viscosidade dinâmica do fluido, kg/m.s ou N.s/m² ou Pa.s

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objectivo

Esta dissertação tem como objectivo a caracterização de uma matriz porosa metálica que funciona como placa absorvedora num colector solar.

Pretende-se com este estudo caracterizar a interacção térmica entre a matriz porosa metálica e um escoamento forçado de ar.

Este colector solar foi inicialmente desenvolvido para integrar um sistema de secagem de produtos alimentares, mas a sua utilização pode ser estendida a outras aplicações. O colector em estudo é inovador pois apresenta uma construção de baixo custo e simultaneamente uma boa eficiência térmica.

1.2. Enquadramento

A energia é um bem vital para o desenvolvimento social e económico. Devido ao rápido desenvolvimento da economia global, as necessidades de energia aumentaram significativamente, especialmente nos países desenvolvidos (Baños *et al.*, 2010). Os recursos energéticos foram divididos em três categorias: os combustíveis fósseis, os recursos renováveis e os recursos nucleares (Panwar *et al.*, 2010). A procura de energia é satisfeita recorrendo principalmente à utilização de combustíveis fósseis que satisfazem 80% das necessidades totais de energia (MRE, 2012).

Os combustíveis fósseis são recursos não renováveis, uma vez que a taxa de consumo é superior à taxa de reposição. Exemplos deste tipo de combustível são o petróleo, o carvão e o gás natural. O petróleo é uma das principais fontes de energia utilizadas, oferecendo vantagens como o fácil transporte e processamento. No entanto, a utilização deste tipo de energia acarreta efeitos colaterais indesejáveis que a sociedade tolera cada vez menos. São referidas principalmente as consequências ambientais, nomeadamente as alterações climáticas e a escassez dos combustíveis fósseis; esta última tem levado ao aumento dos preços nos mercados mundiais (Kaltschmitt *et al.*, 2007).

As alterações climáticas – aquecimento global – devem-se principalmente ao agravamento do efeito de estufa, resultante da utilização de combustíveis fósseis, pois durante a sua queima, para se produzir energia, são emitidos gases que se acumulam na atmosfera e absorvem a radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra. O gás com efeito de estufa que mais se produz é o dióxido de carbono (CO_2). Como exemplo de outros gases com este efeito temos o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e os compostos halogenados (HFC, por exemplo).

De forma a reduzir os efeitos negativos causados pela utilização dos recursos não renováveis e a promover um desenvolvimento sustentável são procuradas alternativas que satisfaçam a procura de energia. O conceito de desenvolvimento sustentável surge assim como um ponto de equilíbrio entre a conservação do meio ambiente e o crescimento económico, definido como “desenvolvimento que satisfaz as exigências do presente sem comprometer a capacidade de futuras gerações satisfazerem as suas próprias necessidades” (AMRPB, 2011).

As fontes de energia renováveis surgem-nos como uma das soluções mais eficazes e eficientes no que toca a alternativas para obtenção de energia (Panwar *et al.*, 2010).

Como principais fontes de energia renováveis temos:

- Energia solar
- Energia eólica
- Energia hídrica e marmotriz
- Energia geotérmica
- Biomassa

(Panwar *et al.*, 2010)

As tecnologias renováveis são sustentáveis e são consideradas fontes limpas de energia, promovendo uma melhor utilização dos recursos e permitindo minimizar a produção de resíduos e dos impactes ambientais, reduzindo a emissão de gases com efeito de estufa e outros poluentes do ar, satisfazendo 14% da procura total de energia em termos mundiais (Panwar *et al.*, 2010). Apesar destas vantagens, apresentam inconvenientes significativos, tais como a descontinuidade da sua produção, uma vez que dependem do clima, razão pela qual a sua utilização requer métodos de optimização de *design*, projecto e controlo (Baños *et al.*, 2010).

A energia solar como fonte renovável vai ser abordada com mais pormenor no Capítulo 2, visto ser a energia utilizada pelo colector em estudo.

1.3. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação divide-se em seis capítulos. Os primeiros quatro capítulos e o início do Capítulo 5 destinam-se a descrever o estado da arte relativo aos temas abordados.

O presente capítulo explicita qual o é objectivo da dissertação e faz uma sucinta introdução ao tema da energia.

No Capítulo 2 – Energia Solar: Fonte Renovável – fala-se na radiação solar e na sua importância para vida no planeta Terra, enumeram-se algumas das utilizações da energia solar, nomeadamente o seu aproveitamento para a climatização de edifícios e as vantagens e desvantagens a elas associadas, avalia-se o potencial desta fonte no território português e por fim associa-se esta temática ao caso em estudo.

No Capítulo 3 – Collectores Solares - são descritos os vários tipos de colectores solares existentes e quais as suas aplicações, referindo em qual deles se enquadra o colector em estudo. São também abordados os secadores solares uma vez que o objectivo inicial do desenvolvimento do colector era a sua integração nestes sistemas de secagem. No final do capítulo é apresentado o protótipo do colector solar em estudo.

O Capítulo 4 é dedicado aos mecanismos de transferência de calor, fenómenos de elevada importância no estudo de colectores solares. São também referidos os meios porosos, visto estarmos a estudar uma matriz absorvedora porosa.

No Capítulo 5 é caracterizada a matriz porosa que é o material absorvedor no colector solar, referindo-se quais as metodologias e materiais necessários para a sua realização. São apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais realizados para a determinação do valor do coeficiente de transferência de calor por convecção e os resultados dos testes de pressão realizados na instalação experimental que permitem a determinação do valor do coeficiente de permeabilidade da matriz porosa.

As conclusões finais desta dissertação são apresentadas no Capítulo 6.

2. ENERGIA SOLAR: FONTE RENOVÁVEL

A energia solar é a energia radiante que é produzida pelo Sol. Em muitas partes do mundo, a radiação solar directa é considerada uma das melhores fontes potenciais de energia (Baños *et al.*, 2010).

A origem e a continuidade da vida dependem da energia solar. Processos básicos que são suporte para a vida na Terra, como a fotossíntese e o ciclo hidrológico, são accionados por esta fonte (Kalogirou, 2009).

Desde cedo a humanidade percebeu que um bom aproveitamento da energia solar é um benefício. No entanto, apenas durante os últimos 40 anos, se tem aproveitado a energia solar como alternativa, com recurso a equipamento especializado, uma vez que é gratuita e não prejudica o meio ambiente (Kalogirou, 2009).

O Sol é a fonte de todas as energias. As formas primárias de energia solar são o calor e a luz. Estes são captados e transformados pelo ambiente numa infinidade de maneiras. Algumas dessas transformações resultam em fluxos de energia renováveis (Panwar *et al.*, 2010). A energia solar na forma de radiação impulsiona os fenómenos climáticos que ocorrem na Terra. A luz solar demora aproximadamente 8 minutos e 18 segundos a chegar à Terra (Wikipédia_a, 2012).

O Sol emite energia a uma taxa de $3,8 \times 10^{23}$ kW, dos quais, aproximadamente $1,8 \times 10^{14}$ kW são interceptados pela Terra (Panwar *et al.*, 2010).

A radiação solar consiste em protões e electrões libertados pelo Sol a uma velocidade de aproximadamente 500 km / s. No entanto, apenas algumas destas partículas electricamente carregadas atingem a superfície da Terra, porque a maioria delas são desviadas pelo campo magnético terrestre. Isto é de particular importância na Terra, pois esta radiação intensa não permitiria a existência de vida na sua forma actual (Kaltschmitt *et al.*, 2007).

A radiação electromagnética engloba todas as frequências, desde ondas com longos até aos curtos comprimentos de onda. A radiação solar é semelhante à emitida por um corpo negro (Kaltschmitt *et al.*, 2007). O corpo negro é a referência ideal de todos os estudos radiativos a uma determinada temperatura, uma vez que emite e absorve a máxima

quantidade de energia para cada comprimento de onda e em todas as direcções, sendo um emissor e absorvente perfeito (Quintela, 2009).

Admitindo a radiação do Sol como sendo igual à radiação de um corpo negro, esta obedece à Lei de Stefan-Boltzmann, permitindo calcular o valor da constante solar que se define como a taxa de toda a energia incidente numa superfície unitária normal aos raios solares colocada à distância de 1 UA (unidade astronómica que é a distância média Sol-Terra, equivalente a $1,5 \times 10^8$ Km). A constante solar média ao longo do ano tem o valor de 1367 W/m^2 (Quintela, 2009), atingindo o seu máximo em Janeiro, aproximadamente 1420 W/m^2 , devido à menor distância entre o Sol e a Terra (periélio), o oposto ocorre em Junho, quando atinge seu mínimo, cerca de 1330 W/m^2 (afélio) (Kaltschmitt *et al.*, 2007).

Apesar de haver uma maior intensidade de radiação em Janeiro, em média, existem temperaturas significativamente mais baixas no hemisfério norte durante o Inverno do que durante o Verão. A razão para isto é que o eixo de rotação da Terra forma um ângulo de $66,5^\circ$ com o plano orbital. Assim, durante o Inverno, o hemisfério sul está voltado para o Sol, isto leva a uma altura solar mais elevada e períodos de luz solar mais longos. Simultaneamente, no hemisfério norte, durante este período de tempo, os dias são mais curtos. As áreas próximas do Pólo Norte por vezes não estão expostas ao sol durante todo o dia. Durante o solstício de Inverno, todos os lugares entre $66,5^\circ \text{ N}$ e o pólo têm a "noite polar eterna". Do mesmo modo, no hemisfério sul, o Sol nunca desaparece abaixo do horizonte – "Sol da meia-noite". Esta situação ocorre até ao equinócio de Março, altura em que a situação se começa a inverter, começando o hemisfério norte a ficar voltado para o Sol (Kaltschmitt *et al.*, 2007).

Para uma melhor percepção destes fenómenos, são apresentadas a Figura 2-1, a Figura 2-2 e a Figura 2-3 que representam de forma simplificada, as variações que ocorrem durante o ano.

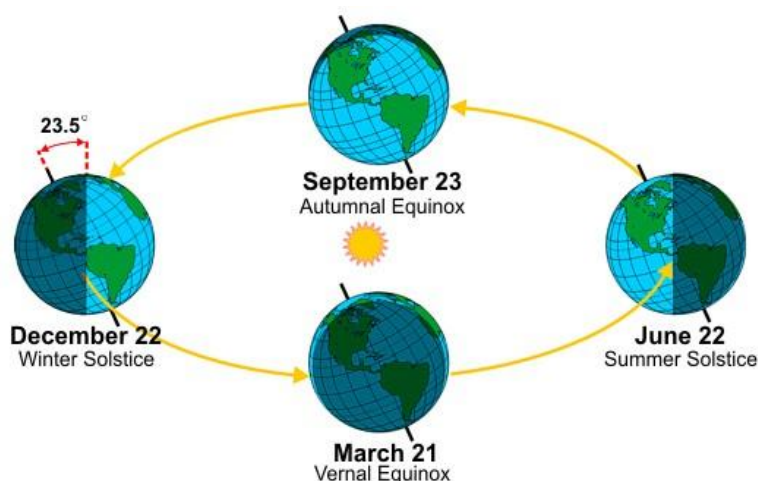


Figura 2-1 Variação da inclinação do eixo da Terra ao longo do ano (National Weather Service JetStream - Online School for Weather, 2012).

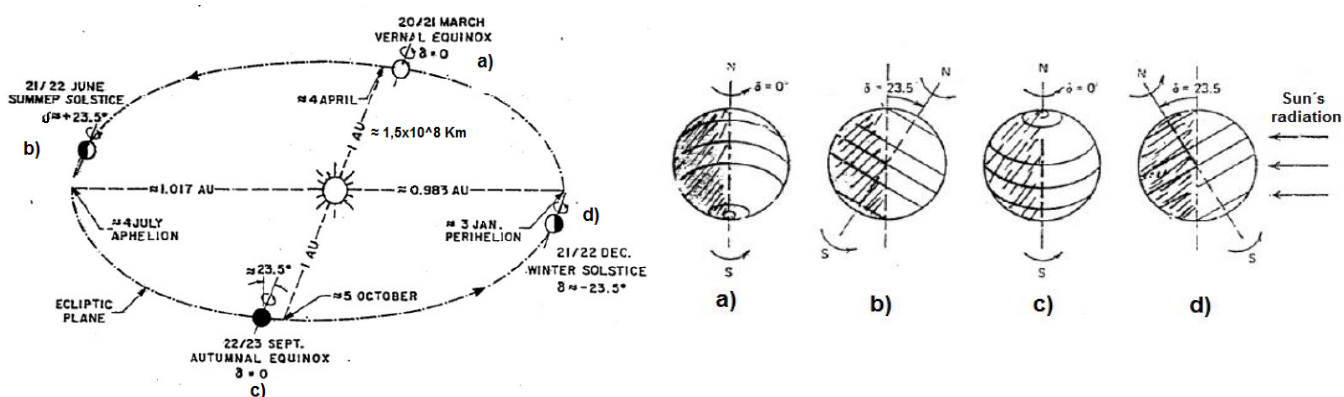


Figura 2-2 Representação da órbita da Terra em torno do Sol (Quintela, 2009).

Figura 2-3 Variação da posição do eixo da Terra relativamente ao Sol (posição do observador "à frente" da Terra) (Quintela, 2009).

2.1. Utilização da Energia Solar

As formas de converter a radiação solar em energia podem ser passivas ou activas.

A forma de conversão passiva é muitas vezes baseada no projecto ideal de edifícios que captam a energia do Sol, permitindo assim reduzir a necessidade de luz artificial e de aquecimento. A melhoria da eficiência energética nos edifícios é a maior prioridade em todo o mundo. As medidas utilizadas para economizar energia, obtendo uma solução ideal, têm em conta o consumo de energia, os custos financeiros, o desempenho ambiental, etc. (Baños *et al.*, 2010).

A forma de conversão activa baseia-se na utilização de equipamentos que transformam a radiação solar em energia útil (Baños *et al.*, 2010). É possível, através da energia solar, o aquecimento de água para utilização doméstica e industrial, aquecer ou arrefecer espaços em edifícios, cozinhar alimentos recorrendo a fogões solares, a produção de elevadas temperaturas para geração de vapor, operar motores e bombas, aquecer água de piscinas, a dessalinização de água para consumo, aplicações químicas ou a produção de electricidade, através de tecnologias de concentração da radiação. Através do efeito fotovoltaico converte-se a radiação solar em energia eléctrica (Kalogirou, 2004; Casper, 2007; DGEG, 2012).

2.1.1. Vantagens e Desvantagens

As grandes vantagens da energia solar residem sobretudo em:

- Utilizações finais directas;
- Aplicações distribuídas;
- Disponibilidades geográficas, sobretudo em locais onde outras fontes de energia são escassas ou não estão presentes.

(DGEG, 2012)

Em muitos locais no mundo, a electricidade não está disponível mas a radiação solar é abundante, assim, a utilização de energia solar para produzir electricidade nestas áreas é possível (Panwar *et al.*, 2010).

Os impactes ambientais da energia solar são mínimos. Na produção de electricidade a partir de tecnologias de energia solar, as emissões atmosféricas são insignificantes porque não são queimados combustíveis e a quantidade de resíduos sólidos produzida é substancial. A água pode ser usada em tecnologias para criar vapor e ser reutilizada após ter sido condensada (Casper, 2007).

As desvantagens da utilização deste tipo de recurso devem-se à natureza intermitente da energia solar que durante o período da noite é inexistente, sendo necessário um sistema de armazenamento de energia para garantir um fluxo contínuo. A utilização em larga escala desta fonte de energia só é possível se for desenvolvida uma tecnologia eficaz que permita o seu armazenamento com custos de capital aceitáveis e competitivos (Baños *et al.*, 2010). Outra desvantagem é a necessidade de uma grande área para instalar os

equipamentos, apesar destes não danificarem o solo, impedem que este seja utilizado para outros fins (Casper, 2007).

2.2. Aproveitamento da Energia Solar em Portugal

Portugal tem um potencial considerável para aproveitamento da energia solar, sendo um dos países da Europa com melhores condições para aproveitamento deste recurso, dispondo de um número médio anual de horas de Sol variável entre 2200 e 3000 horas no continente e entre 1700 e 2200 horas, respectivamente, nos arquipélagos dos Açores e da Madeira. A título de exemplo, na Alemanha, este indicador varia entre 1200 e 1700 horas (DGEG, 2012).

Em Portugal, a utilização de sistemas solares térmicos ou fotovoltaicos ainda está longe de corresponder ao potencial deste recurso. Estima-se que em 2003, a capacidade instalada de sistemas solares fotovoltaicos era cerca de 2 MW, dos quais apenas 20% se referem a instalações ligadas à rede pública. Foram aprovados pedidos de informação prévia que totalizam cerca de 128 MW, o que deixava uma capacidade não comprometida de 22 MW face à meta de 150 MW, para o horizonte temporal até 2010 (DGEG, 2012).

2.3. Caso de Estudo

Neste estudo, a energia solar é utilizada para aquecer ar, recorrendo a um colector solar. O Capítulo 3 vai ser dedicado a uma análise mais detalhada sobre este equipamento.

O colector foi inicialmente desenvolvido para secar alimentos, mas pode ter outras aplicações (aplicações industriais, climatização, etc.).

Em relação à secagem dos alimentos, os agricultores, tradicionalmente, utilizam a técnica de exposição ao Sol que utiliza apenas a radiação solar, a temperatura ambiente, a humidade relativa do ar ambiente e o vento. Neste método, a cultura é colocada sobre o solo ou pisos de betão para secar durante um certo número de dias, atingindo temperaturas elevadas devido à exposição directa ao Sol. Apesar da natureza rudimentar do processo, este continua a ser um método comum de secagem. Isto verifica-se porque os requisitos de energia que provêm da radiação solar, estão facilmente

disponíveis no ambiente sem ser necessário investimento de capital em equipamentos. Este processo, no entanto, tem algumas limitações tais como os efeitos indesejáveis a que as culturas estão expostas: poeira, sujidade, poluição atmosférica e ataques de insectos, aves e roedores. Devido a essas limitações, a qualidade do produto resultante pode ser degradada. Todas estas desvantagens podem ser eliminadas usando um secador solar (Fohr e Figueiredo, 1987; Kalogirou, 2009).

Os secadores solares têm sido utilizados principalmente pela indústria agrícola. A tecnologia de secagem solar oferece uma alternativa para processar os legumes e as frutas em condições sanitárias, de higiene e de limpeza de acordo com os padrões nacionais e internacionais poupando energia e tempo, permitindo ocupar menos espaço e melhorando a qualidade do produto. O processo é mais eficiente e “amigo” do ambiente (Panwar *et al.*, 2010).

O objectivo da secagem de um produto agrícola é o de reduzir a sua humidade até um nível que evite a deterioração dentro de um período de tempo considerado como o período de armazenamento seguro, pois existem seres vivos como os insectos e os fungos que se desenvolvem em condições húmidas e que podem deteriorar os alimentos, tornando-os inutilizáveis. Baixando a quantidade de água disponível nos alimentos, as taxas de desenvolvimento dos organismos baixam significativamente. A secagem é um processo duplo de transferência de calor da fonte de aquecimento para o produto e de transferência de massa de água a partir do interior do produto para a sua superfície e da superfície para o ar circundante (Kalogirou, 2004).

Na secagem solar, a energia do Sol é utilizada para aquecer o ar; o fluxo de ar pode ser forçado ou por convecção natural (Kalogirou, 2004).

3. COLECTORES SOLARES

Sendo o objectivo deste estudo a caracterização de uma matriz porosa metálica para aplicação num colector solar, neste capítulo pretende fazer-se uma breve referência aos colectores solares existentes e às suas aplicações.

O componente mais importante de qualquer sistema solar é o colector. Este dispositivo absorve a radiação solar, converte-a em calor e transfere-a para um fluido, normalmente ar, água ou óleo (Kalogirou, 2004).

Os vários tipos de colectores solares existentes estão descritos na Figura 3-1. Estes colectores podem ser estacionários ou concentradores; os estacionários têm áreas iguais de intercepção e de absorção de energia solar; os colectores concentradores têm geralmente superfícies reflectoras côncavas que interceptam e concentram a radiação solar num feixe com área de recepção menor, aumentando o fluxo de radiação (Kalogirou, 2004).

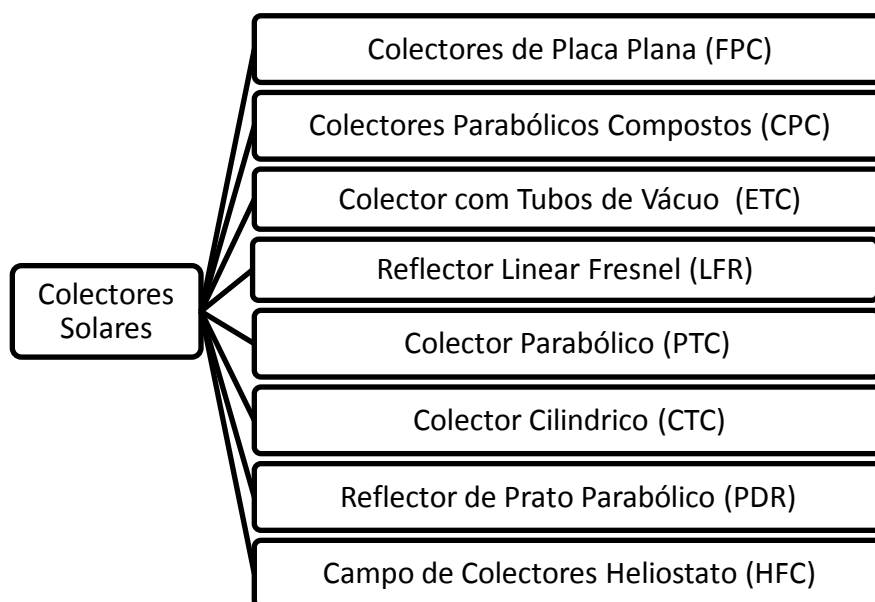


Figura 3-1 Tipos de colectores solares (baseado em: Kalogirou, 2004; Panwar *et al.*, 2011).

O colector solar em estudo é um colector estacionário de placa plana (FPC) (Calçada, 2011).

Os colectores FPC são o tipo de colector mais utilizado. Definindo de forma generalizada o seu mecanismo de funcionamento, este consiste na passagem da radiação solar através de uma superfície de vidro chegando ao absorvedor que tem uma superfície escura, com absorvidade elevada; grande parte da energia é absorvida pela placa e em seguida é transferida para os tubos que transportam o fluido que vai ser armazenado ou utilizado. A parte inferior da placa absorvente e as partes laterais da estrutura do colector são bem isoladas para reduzir as perdas térmicas por condução. Os colectores planos são geralmente fixos numa posição e não acompanham o movimento Sol-Terra. Estes devem estar em direcção do sul no hemisfério norte e em direcção ao norte no hemisfério sul; o ângulo de inclinação mais favorável do colector é igual à latitude do local, com variações angulares de 10 a 15° (Kalogirou, 2003).

3.1. Aplicações dos Colectores Solares

As principais aplicações dos colectores solares são:

- i. Sistemas solares de aquecimento de água
- ii. Aquecimento e arrefecimento solar de espaços
- iii. Refrigeração solar
- iv. Produção de calor no processo industrial
- v. Sistemas solares de dessalinização
- vi. Sistemas solares de energia térmica
- vii. Fornos solares
- viii. Aplicações solares na química.

(Kalogirou, 2004)

O colector solar em estudo é utilizado como gerador de ar quente e enquadra-se genericamente na aplicação do ponto ii.: aquecimento e arrefecimento solar de espaços. Esta categoria subdivide-se ainda em quatro sistemas diferentes:

- Aquecimento de espaços e de água quente de serviço
- Sistemas de ar
- Sistemas de água
- Sistemas com bomba de calor.

(Kalogirou, 2004)

Vão ser descritos sucintamente os dois primeiros pontos por serem os que têm mais relevância no presente estudo.

Relativamente ao primeiro ponto – aquecimento de espaços e de água quente de serviço – a energia solar inteceptada pelo colector pode ser logo utilizada no caso de ser necessário fornecer calor ao edifício ou pode ser armazenada se na altura este não for preciso. A energia armazenada, se existente, pode ser utilizada numa altura em que o edifício tenha carência de calor, altura esta que pode ocorrer no período da noite, por exemplo. Também podem ser empregues modos operacionais adicionais tais como o fornecimento de água quente. É possível combinar modos, isto é, operar mais do que um modo de cada vez. Na Europa, os sistemas solares para aquecimento simultâneo de espaços e de água são conhecidos por sistemas combinados (Kalogirou, 2004).

Estes sistemas, para além da utilização em habitações, podem também ser utilizados em edifícios industriais.

Em relação ao segundo ponto – sistemas de ar - pode combinar-se uma fonte de energia auxiliar com a energia fornecida pelo colector ou pela unidade de armazenamento, para satisfazer a necessidade de ar quente dos edifícios. Uma das vantagens deste sistema é que o ar não precisa ser protegido de um possível congelamento ou ebulição, não é corrosivo e é gratuito. Outra vantagem é a utilização de uma unidade de armazenamento formada por um leito de seixos que possibilita a entrada de ar no colector a temperaturas mais baixas. As desvantagens são devidas a uma grande necessidade de espaço para instalar os equipamentos do sistema de ar, como as condutas e os ventiladores, à difícil detecção das fugas de ar e devidas ao facto de o consumo de energia parasita ser geralmente mais elevado do que nos sistemas líquidos (Kalogirou, 2004).

Como o colector solar em estudo foi inicialmente desenvolvido com o objectivo de secar produtos alimentares, integrando um sistema designado de secador solar, em seguida vão ser caracterizados os diferentes tipos deste equipamento.

3.1.1. Secadores Solares

Os secadores solares utilizam colectores para captar a energia solar e aquecer o ar, podendo ser classificados em activos ou passivos. Nos sistemas activos utiliza-se um ventilador para promover a circulação de ar desde o colector solar até ao produto. Nos sistemas passivos a circulação ocorre naturalmente, o ar aquecido no colector circula

através dos produtos por mecanismos de convecção natural. Sendo assim, os sistemas activos para além da energia solar, necessitam de outra fonte de energia para alimentar os ventiladores que originam a circulação forçada de ar ou para obter um aquecimento auxiliar, normalmente é utilizada uma fonte não renovável, como a electricidade (Kalogirou, 2009; Murthy, 2009; Sharma *et al.*, 2009).

Cada um destes sistemas, activo ou passivo, subdivide-se em três classes: indirecto, directo ou misto.

Num secador solar do tipo indirecto, o colector solar e a câmara de secagem são unidades separadas. A Figura 3-2 representa um colector deste tipo.

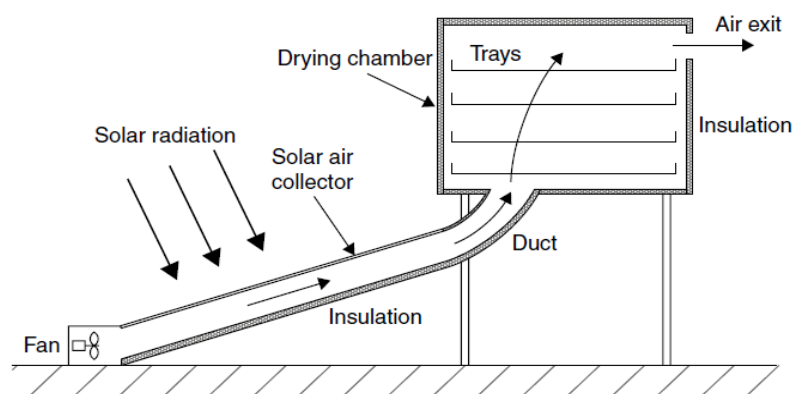


Figura 3-2 Secador solar activo do tipo indirecto (Kalogirou, 2009).

Num secador do tipo directo é utilizado o mesmo equipamento para captar a energia solar e para secar os produtos, não são necessários colectores solares uma vez que o secador é o próprio colector. A Figura 3-3 representa um colector do tipo directo.

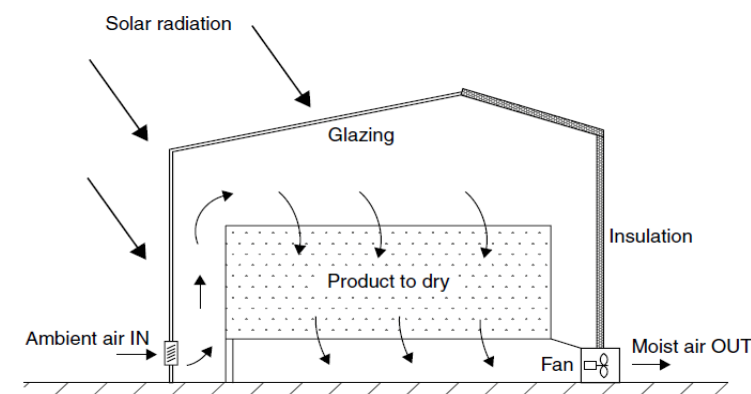


Figura 3-3 Secador solar activo do tipo directo (Kalogirou, 2009).

Num secador do tipo misto são combinados os dois sistemas, isto é, o secador é capaz de absorver directamente a radiação solar mas o processo é melhorado se for utilizado um colector solar. Este sistema, representado na Figura 3-4, é então constituído

por um colector solar e por uma câmara de secagem separada com paredes de vidro para que a radiação solar chegue directamente aos produtos que estão a secar.

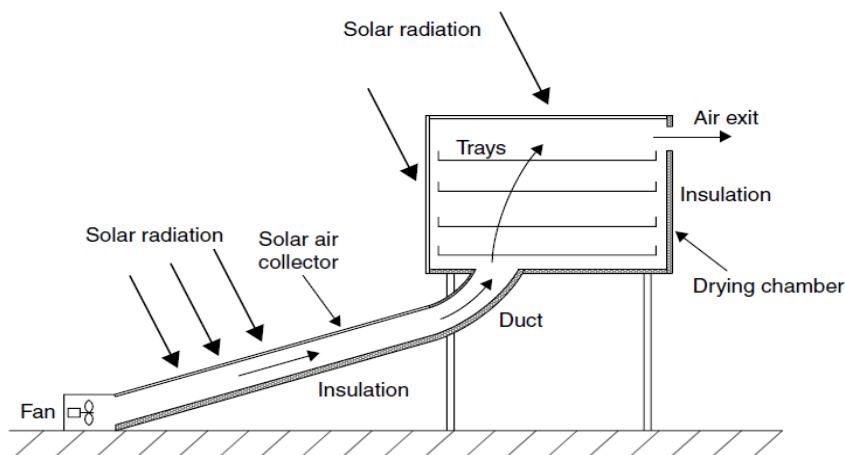


Figura 3-4 Secador solar activo do tipo misto (Kalogirou, 2009).

As figuras apresentadas são todas referentes a secadores do tipo activo, sendo que os do tipo passivo apenas diferem pela ausência de um ventilador, uma vez que se caracterizam pela ausência de ventilação forçada (Kalogirou, 2009; Murthy, 2009; Sharma *et al.*, 2009).

A descontinuidade na produção de energia pela maior parte das fontes renováveis envolve frequentemente problemas de confiança associados à sua operação. Para suprimir este inconveniente podem ser utilizados secadores designados por híbridos (Baños *et al.*, 2010). Estes sistemas não dependem apenas de uma fonte de energia térmica, sendo que estes podem funcionar com uma combinação de fontes renováveis e não renováveis. No caso dos secadores solares, a energia solar está sempre presente (Kalogirou, 2009). Se estes sistemas forem bem projectados, eles podem ser mais rentáveis e fiáveis do que os sistemas que utilizam apenas uma fonte de energia renovável (Baños *et al.*, 2010).

Os secadores solares híbridos podem ser:

- Sistemas de secagem solar com armazenamento térmico
- Sistemas de secagem solar com unidade auxiliar
- Híbridos com águas geotérmicas ou residuais
- Sistemas de secagem solar com energia fotovoltaica
- Sistemas de secagem solar com bomba de calor
- Sistemas de secagem solar com bomba de calor química

- Sistemas solares com desumidificação assistida

(Fudholi *et al.*, 2010)

Na Tabela 3-1 são descritas, de forma resumida, as vantagens e as desvantagens de cada um dos tipos de secadores solares enunciados anteriormente.

Tabela 3-1 Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de secadores solares. Baseado em Fudholi *et al.*, 2010.

Classificação	Vantagens	Desvantagens
Secadores Passivos	Simple	Capacidade de carga baixa
	Baixo custo de capital e funcionamento	
Secadores Activos	Independentes das condições meteorológicas	Mais caros e complexos em relação aos secadores passivos
	Períodos de secagem mais curtos em relação aos secadores passivos	
Secadores Híbridos	Permitem um maior controlo da secagem	Dispendiosos e podem ser dependentes de combustíveis fósseis
	Possibilidade de funcionar mesmo sem Sol	
	Mais rápidos em relação aos secadores passivos e activos	

3.2. Protótipo do Colector Solar em Estudo

No âmbito do projecto de desenvolvimento de um colector solar para a operação de secagem de alimentos, foi construído um protótipo experimental de um equipamento para aquecimento de ar, com uma matriz porosa metálica (palha-de-aço) como elemento absorvedor, com o propósito de ser acoplado a uma câmara de secagem.

Foi também desenvolvido um programa de simulação de comportamento.

O protótipo foi construído em polietileno extrudido, com as dimensões de 1,98 metros por 1,13 metros e profundidade de 7 centímetros, tem uma cobertura de vidro e um sistema interno de deflectores para canalização de ar através de ventiladores.

O polietileno extrudido é um bom isolante térmico, diminuindo as perdas de calor pelas paredes do colector.

A integração dos deflectores tem como objectivo aumentar o percurso do ar dentro do colector, por forma a incrementar a transferência de calor entre a matriz absorvedora e o escoamento de ar.

A matriz porosa metálica foi pintada de preto para aumentar o coeficiente de absorção. Pessêgo, em 2010, refere que o interior do colector deve ser totalmente preenchido com palha-de-aço, com uma espessura de 7 centímetros.

A tampa de vidro pretende criar efeito de estufa, impedindo perdas exageradas de calor para o exterior.

Os resultados de um ensaio preliminar demonstram que o protótipo permite aquecer o ar a temperaturas superiores a 70 °C, sendo uma boa solução para implementação em sistemas de secagem indirectos ou no desenvolvimento de secadores híbridos, referidos no subcapítulo 3.1. (Silva *et al.*, 2010; Calçada, 2011).

O protótipo referido encontra-se representado nas Figura 3-5, Figura 3-6 e Figura 3-7.



Figura 3-5 Protótipo do colector solar – vista geral (Silva *et al.*, 2010).

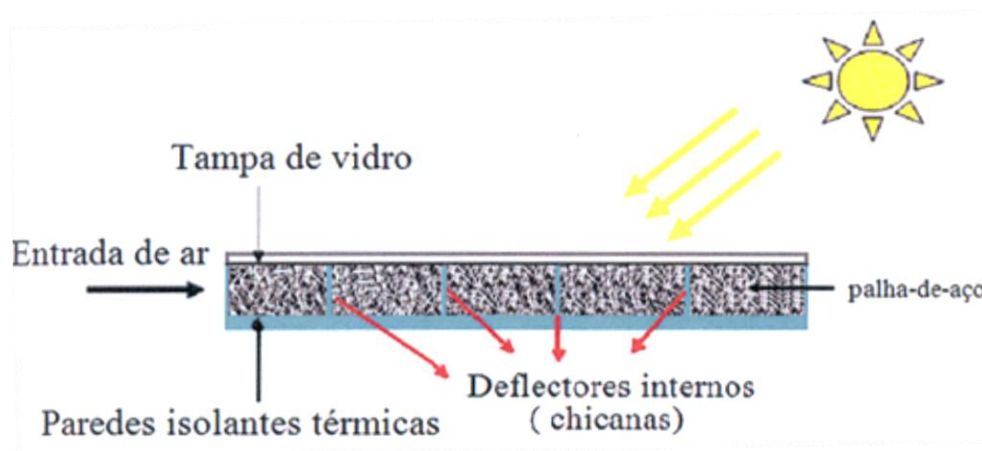


Figura 3-6 Representação esquemática de um corte do protótipo do colector solar (Calçada, 2011).

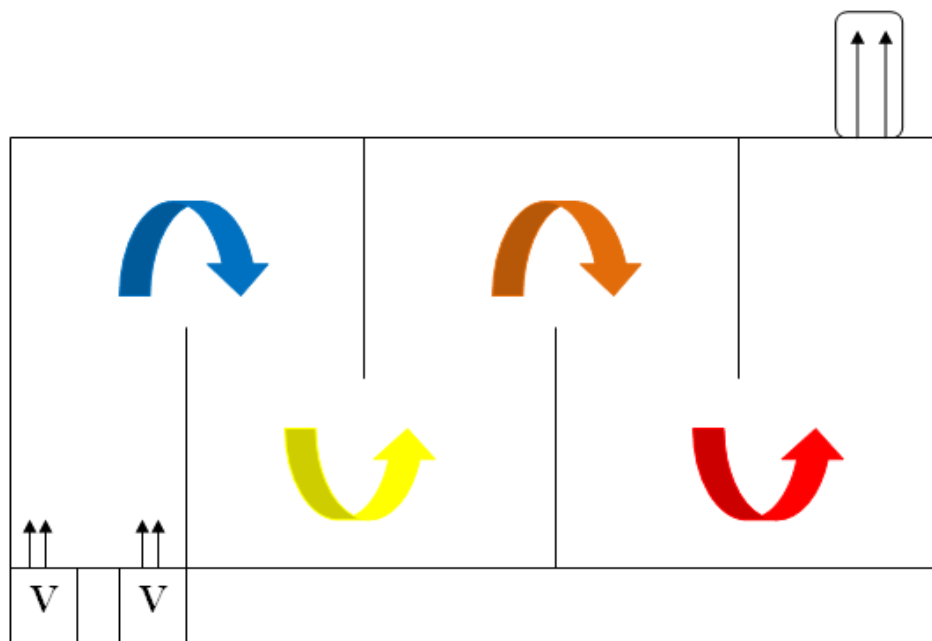


Figura 3-7 Representação do escoamento no interior do protótipo do colector solar (Pessêgo, 2010).

4. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Ao longo deste capítulo vão ser descritos os diferentes mecanismos de transferência de calor, uma vez que os colectores de energia solar são projectados, principalmente, com base no seu comportamento térmico.

A presença de uma diferença de temperatura é a exigência básica para que a transferência de calor ocorra, uma vez que não ocorre transferência de calor entre dois corpos que estão à mesma temperatura. A taxa de calor transferida depende da magnitude do gradiente de temperatura, quanto maior o gradiente, maior a taxa de transferência de calor (Çengel, 2007).

Existem três mecanismos diferentes de transferência de calor:

- Condução,
- Convecção e
- Radiação.

Condução

A condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as vizinhas menos energéticas como resultado da interacção entre elas. A condução pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases.

Em líquidos e gases, a condução deve-se às colisões e à difusão das moléculas nos seus movimentos aleatórios. Nos sólidos é devida à combinação das vibrações das moléculas numa rede e a energia é transportada por electrões livres.

A taxa de condução de calor através de um meio depende da geometria deste, da sua espessura, do tipo de material e da diferença de temperatura a que o meio está submetido.

A potência térmica através de uma camada plana é proporcional e de sinal contrário ao gradiente local de temperatura e à área de passagem, sendo a proporcionalidade dada por um parâmetro designado de condutibilidade térmica, k .

No caso limite de a espessura da parede se aproximar do valor nulo, temos a forma diferencial, denominada por Lei de Fourier da condução térmica:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Onde:

$\frac{dT}{dx}$ - Gradiente de temperatura, °C/m ou K/m

No caso em que se existem duas placas em regime permanente, tem-se:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

(Çengel, 2007)

Convecção

A convecção é a transferência de calor entre uma superfície sólida e o líquido ou gás adjacente que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e movimento do fluido.

Quanto mais rápido for o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção. Na ausência de qualquer movimento de uma massa de fluido, a transferência de calor entre uma superfície sólida e o fluido adjacente é por pura condução. A presença de movimento de uma massa de fluido aumenta a transferência de calor.

A convecção pode ser forçada ou natural. Na convecção forçada, o fluido é forçado a fluir sobre a superfície por meios externos, tais como um ventilador, uma bomba ou o vento. Na convecção natural, o movimento do fluido é causado por forças de flutuação que são induzidas por diferenças de densidade, devidas à variação da temperatura no mesmo.

A taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura e é convenientemente expressa pela Lei de Newton do arrefecimento:

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_\infty). \quad (4)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção, h , pode ser definido como a taxa de transferência de calor entre uma superfície sólida e um fluido por unidade

de área e por unidade de diferença de temperatura. É um parâmetro que depende em simultâneo da natureza do fluido (viscosidade dinâmica μ , condutividade térmica k , massa específica ρ , calor específico c_p , velocidade do fluido V), da geometria e do tipo de escoamento do fluido (laminar ou turbulento). É determinado experimentalmente.

Um fluido quando contacta com um sólido adere à sua superfície devido à viscosidade, isto é conhecido como efeito de não deslizamento (condição de Prandtl).

Uma implicação da condição de não deslizamento é que a transferência de calor da superfície sólida para a camada de fluido adjacente à superfície é por condução pura e expressa-se por:

$$\dot{q}_{conv} = \dot{q}_{cond} = -k_{fluido} \frac{\partial T}{\partial y}, \text{ para } y = 0. \quad (5)$$

Onde:

T = Distribuição de temperatura do fluido, °C

$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}$ = Gradiente de temperatura na superfície, °C/m

Igualando as equações (4) e (5) obtém-se:

$$h = \frac{-k_{fluido} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)}{T_s - T_\infty}, \text{ para } y = 0 \quad (6)$$

para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção quando a distribuição de temperatura no interior do fluido é conhecida.

Em estudos de convecção é comum adimensionalizar as equações e combinar variáveis que se agrupam em números adimensionais, com o objectivo de reduzir o número total de variáveis.

Associados ao mecanismo de transferência de calor por convecção são referidos, principalmente, três números adimensionais:

- Nusselt,
- Prandtl e
- Reynolds.

O número de **Nusselt** representa a relação entre a transferência de calor através de uma camada de fluido como resultado da convecção e da condução do mesmo fluido em toda a camada.

$$Nu = \frac{\dot{q}_{conv}}{\dot{q}_{cond}} = \frac{h\Delta T}{k\Delta T/L} = \frac{hL}{k} \quad (7)$$

Onde:

L - Espessura da camada de fluido, m

Quanto maior o número de Nusselt, mais eficaz será a convecção.

O número de **Prandtl** descreve a espessura das camadas limite hidrodinâmica e térmica.

$$Pr = \frac{\text{Difusividade molecular de quantidade de movimento}}{\text{Difusividade molecular do calor}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (8)$$

O número de **Reynolds** é a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas e que nos permite determinar se o regime de escoamento é laminar ou turbulento.

$$Re = \frac{\text{Forças de inércia}}{\text{Forças viscosas}} = \frac{VL_c}{\nu} = \frac{\rho VL_c}{\mu} \quad (9)$$

Onde:

L_c - Comprimento característico da geometria, m

(Çengel, 2007)

Radiação

A radiação é a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas electromagnéticas como resultado das mudanças nas configurações electrónicas dos átomos ou moléculas. Ao contrário da condução e da convecção, a transferência de calor por radiação não exige a presença de um meio material. A transferência de calor por radiação não sofre atenuação no vácuo. Esta é a forma em que a energia do Sol atinge a Terra. Todos os corpos a uma temperatura superior ao zero absoluto emitem radiação térmica. Todos os sólidos, líquidos ou gases emitem, absorvem ou transmitem radiação. A superfície ideal que emite radiação numa taxa máxima é o corpo negro, temos então a

radiação do corpo negro. Todas as superfícies reais têm uma radiação menor que a emitida pelo corpo negro.

A radiação é expressa por:

$$\dot{Q}_{emiss} = \varepsilon \sigma A T_s^4 \quad (10)$$

Onde:

ε - Emissividade da superfície

Os gases são frequentemente transparentes à radiação, excepto alguns que são conhecidos por absorverem a radiação em determinados comprimentos de onda (o ozono absorve em grande quantidade a radiação ultravioleta).

(Çengel, 2007)

4.1. Caso de estudo: transferência de calor por convecção num meio poroso

No caso de estudo estamos, essencialmente, perante um mecanismo de convecção forçada. O escoamento de gás através de tubos ou condutas é frequentemente usado em aplicações de aquecimento e arrefecimento. Nestas condições, o fluido é forçado a movimentar-se devido a uma bomba ou um ventilador através de uma secção com comprimento suficiente para ocorrer a transferência de calor desejada. O factor de atrito e o coeficiente de transferência de calor por convecção são importantes para determinar a potência requerida no bombeamento e o comprimento de tubo necessário (Çengel, 2007).

Neste caso, vamos ter um ventilador que vai obrigar o ar, previamente aquecido com recurso a uma resistência, a percorrer um tubo que contém a matriz porosa metálica, medindo a temperatura em vários pontos ao longo do escoamento e a velocidade do ar. No final dos ensaios comparam-se os resultados do ensaio experimental com os valores do coeficiente de convecção, h , dados por um modelo teórico.

4.1.1. Meios porosos

Segundo Dullien (1992), considera-se que um material é poroso se obedecer a pelo menos uma das duas seguintes condições:

- Conter espaços vazios relativamente pequenos, designados por poros, no interior de uma matriz sólida ou semi-sólida. Os poros são

normalmente preenchidos por ar, água, petróleo ou uma mistura de vários fluidos.

- Deve ser permeável a alguns fluidos; estes devem poder penetrar no meio poroso através de uma face e emergir noutra face. Quando os meios porosos têm esta propriedade designam-se de meios porosos permeáveis. Neste caso, as dimensões dos espaços vazios são maiores do que as dimensões das moléculas de fluido (Martins, 2006).

4.1.1.1. Lei de Darcy

O fluxo de um fluido que atravessa um meio poroso é descrito pela Lei de Darcy.

Henry Darcy foi pioneiro no estudo de escoamento de fluidos através de meios porosos, publicando, em 1856, o resultado das experiências relativas a escoamentos de água através de leitos de areia (Wikipédia_b, 2012). Do seu estudo concluiu que a velocidade média do fluido ao longo do escoamento é directamente proporcional à pressão e inversamente proporcional à espessura do leito (Calçada, 2011). A expressão que relaciona a velocidade do escoamento com a pressão e a espessura do leito é a seguinte:

$$V = \frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (11)$$

Onde:

$\frac{\partial P}{\partial x}$ - Gradiente de pressão na direcção do escoamento, N / m³

Intimamente ligado à Lei de Darcy está o conceito de permeabilidade que é definido como a propriedade de os corpos permitirem, com maior ou menor facilidade, o escoamento através dos seus poros. O coeficiente de permeabilidade, parâmetro presente na equação (11), é o índice utilizado para caracterizar a permeabilidade e representa a velocidade com que o fluido atravessa uma amostra (Wikipédia_b, 2012).

5. CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ POROSA METÁLICA

Neste capítulo é caracterizada a matriz porosa metálica, neste caso, a palha-de-aço que é um material abundante e relativamente acessível em termos de custos de aquisição.

Uma das grandes vantagens da utilização de matrizes porosas em colectores solares é a grande área de transferência de calor relativamente a materiais não porosos, sem que o fluido tenha grandes quedas de pressão ao longo do escoamento. Como este tipo de matrizes aumenta o desempenho térmico, estas permitem a construção de colectores solares mais compactos sem comprometer o seu bom funcionamento, levando a custos de construção mais baixos (Tadrist *et al.*, 2004).

Muitas experiências têm sido realizadas para comprovar a eficácia da utilização de matrizes porosas em sistemas de transferência de calor. Lauriat e Ghafir, em 2000, por exemplo, concluíram na sua investigação que a utilização de um meio poroso aumenta a taxa de transferência de calor e de massa, sendo os valores do número de Nusselt (referido no Capítulo 4) aproximadamente 50% maiores do que os valores previstos num sistema sem materiais porosos, demonstrando que o coeficiente de transferência de calor por convecção é mais elevado em sistemas com material poroso, devido à maior condutividade térmica da matriz porosa em comparação com a baixa condutividade térmica do fluido, especialmente nos fluxos gasosos (Yang e Hwang, 2009). Sopian *et al.*, em 1999, concluíram que a utilização de uma matriz porosa aumenta a eficiência em 20 a 70% em relação a colectores que não a utilizam.

É assim de todo o interesse a caracterização da matriz de modo a estudar o seu comportamento e a testar as suas aplicações.

Pretende determinar-se o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção, h , de um escoamento gasoso (ar quente) numa matriz porosa metálica (palha-de-aço n.º 3). Em seguida são definidas as metodologias e os materiais necessários para esse estudo.

5.1. Metodologia e Equipamentos

5.1.1. Metodologia

Foi construída uma instalação experimental, constituída por uma conduta circular com palha-de-aço no seu interior, um equipamento de injeção de ar quente, um sistema de medida de temperaturas colocado ao longo da conduta de 10 em 10 centímetros e um dispositivo de medição da velocidade do ar. É assim possível controlar a velocidade do escoamento e a temperatura do ar.

Foi desenvolvido, em Visual Basic, um modelo teórico que simula o comportamento da matriz. Este tem por base balanços energéticos que contabilizam as perdas térmicas do ar para a parede da conduta e para a matriz porosa. O modelo consegue simular valores de temperatura do ar, da matriz e da parede da conduta, por unidade de comprimento.

Os dados obtidos através do modelo teórico e das medições experimentais são comparados recorrendo ao *software* Excel. Procede-se então ao ajustamento dos dados fornecidos pelo modelo teórico aos dados obtidos experimentalmente. O que se pretende é a obtenção de dados reprodutíveis ao longo do espaço e do tempo para cada ensaio que permitam a validação do modelo teórico.

Os valores obtidos através da metodologia descrita vão ser ainda comparados com o valor teoricamente expectável do coeficiente de transferência de calor por convecção da matriz porosa.

5.1.2. Equipamentos

A instalação experimental construída é constituída por:

- Uma conduta em *perspex*, com 4,17 centímetros de diâmetro e 0,45 centímetros de espessura, com 6 secções de 10 centímetros cada, separadas entre si por peças de madeira com 3 centímetros de comprimento cada uma, tendo uma estrutura que mantém o espaço de 1 centímetro entre as secções; a conduta é preenchida com discos de palha-de-aço n.º 3;

- Uma secção de entrada constituída por 2 tubos em cartão, cada um com 10 centímetros de comprimento que é preenchida com 2 centímetros de palha-de-aço, com o objectivo de homogeneizar o escoamento;
- Onze deflectores internos ao longo da conduta, colocados à distância de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 e 55 centímetros do início desta;
- Uma secção de saída em perspex com 80 centímetros de comprimento, com o mesmo diâmetro e espessura da conduta;
- Interface PICO TC-08 com 7 canais em utilização, com um conjunto de 3 termopares por canal; cada conjunto está colocado de 10 em 10 centímetros ao longo da conduta;
- Uma fonte de aquecimento e ventilação, com 2 posições de ventilação;
- Uma fonte de alimentação (dos 0 aos 220 Volt, com divisão em 5 Volt), que serve para fornecer a energia necessária para o aquecimento do ar;
- Um medidor multifunções OMEGA X-ATP que neste estudo é utilizado como anemómetro.

A instalação experimental está representada na Figura 5-1.

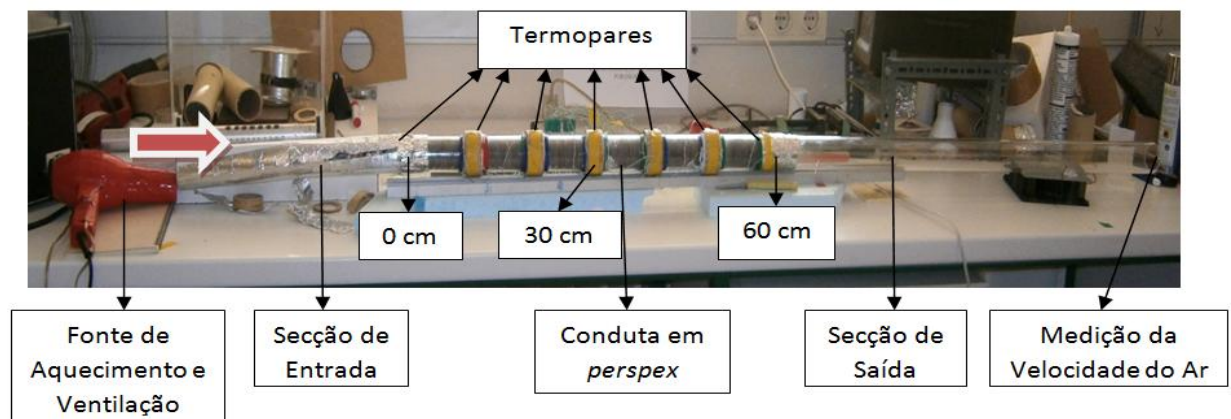


Figura 5-1 Instalação experimental.

5.2. Programa de Simulação de Comportamento

O modelo teórico, referido no ponto 5.1.1., foi desenvolvido obedecendo às leis do escoamento de fluidos em condutas circulares preenchidas com uma matriz porosa. O modelo baseia-se nas seguintes condições:

- A temperatura do fluido de entrada é o valor medido experimentalmente à distância de 0 centímetros;

- O sistema é analisado de forma unidimensional e transiente;
- O fluido é incompressível;
- Os poros interconectam-se;
- A transferência de calor por condução entre as partículas metálicas é desprezada, considerando-se apenas a troca de calor por convecção;
- O diâmetro médio de cada elemento de matriz é igual 0,1 mm;
- Consideram-se temperaturas diferentes da matriz e do fluido, não se aplicando a teoria do equilíbrio térmico local;
- A análise das características da interligação entre os poros e a condutividade da parte sólida ao longo da matriz não é considerada.

O modelo calcula a distribuição de temperatura do escoamento de ar ao longo da conduta em cada instante e também avalia as perdas térmicas através da parede. Pode, em particular, calcular a energia absorvida pela matriz fazendo o balanço entálpico entre a entrada e a saída.

As equações gerais que regem o escoamento nas condições acima referidas são as seguintes:

$$-\dot{m}_a c_{p_a} dT_a = hA_L(T_a - T_m) + \dot{Q}_p \quad (12)$$

$$m_m c_{p_m} \frac{dT_m}{dt} = hA_L(T_a - T_m) \quad (13)$$

Onde:

A_L - Área de transferência de calor num determinado troço da conduta, m²

dT_a - Variação da temperatura do ar num determinado troço da conduta, °C

$\frac{dT_m}{dt}$ - Variação da temperatura da matriz num determinado troço da conduta e num certo intervalo de tempo, °C/s

As equações que representam os balanços energéticos e que contabilizam as perdas térmicas do ar para a parede da conduta e para a matriz porosa, são as seguintes:

Temperatura do ar

$$T_a(I+1, J) = \frac{1}{\dot{m}_a c_{p_a} + \frac{hA_p}{2} + \frac{hAD_x}{2}} \times \left[\left(\dot{m}_a c_{p_a} - \frac{hA_p}{2} - \frac{hAD_x}{2} \right) \times T_a(I, J) + hA_p T_p(I, J) + hAD_x \times T_m(I, J) \right] \quad (14)$$

Temperatura da matriz sólida

$$T_m(I, J+1) = \frac{1}{\frac{hAD_x}{2} + \frac{m_m c_{p_m}}{\Delta t}} \left[\frac{m_m c_{p_m}}{\Delta t} T_s(I, J) - \frac{hAD_x}{2} \times T_m(I, J) + \frac{hAD_x}{2} \times T_a(I+1, J) + \frac{hAD_x}{2} \times T_a(I, J) \right] \quad (15)$$

Temperatura da parede

$$T_p(I, J+1) = \frac{1}{\frac{hA_p}{2} + \frac{m_p c_{p_p}}{\Delta t}} \left[\frac{m_p c_{p_p}}{\Delta t} \times T_p(I, J) - \frac{hA_p}{2} \times T_p(I, J) + \frac{hA_p}{2} \times T_a(I, J) + \frac{hA_p}{2} \times T_a(I, J) \right] \quad (16)$$

Onde

I – Distância, m

J – Tempo, s

5.3. Parâmetros Físicos

Na Tabela 5-1 apresentam-se os valores de alguns dos parâmetros físicos que permitem caracterizar a matriz.

Tabela 5-1 Parâmetros físicos e termofísicos a 25 °C (Çengel, 2007; Calçada, 2011).

$D_{\text{médio}}$ (m)	a (m ² /m ³)	$\rho_{\text{palha-de-aço}}$ (kg/m ³)	$\varepsilon_{\text{palha-de-aço}}$	$c_{p_{\text{palha-de-aço}}}$ (J/kg.K)	$c_{p_{\text{ar}}}$ (J/kg.K)	$k_{\text{palha-de-aço}}$ (W/m.K)
1×10^{-4}	50293	7800	0,99	430	1005	52,9

Porosidade

A nível macroscópico, a porosidade, ε , é um parâmetro importante na caracterização da matriz, sendo esta a razão entre o volume de vazios, V_V , e o volume total da amostra, V_T :

$$\varepsilon = \frac{V_V}{V_T} \quad (17)$$

(Martins, 2006)

Área efectiva volúmica

Este parâmetro, a , traduz qual a área de transferência de calor que corresponde a cada unidade de volume da palha-de-aço (m³).

$$a = \frac{A_{\text{transf.}}}{V_{\text{matriz}}} \quad (18)$$

(Calçada, 2011)

5.4. Ensaios Experimentais

5.4.1. Caracterização da Matriz: Determinação do Valor do Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção

Os ensaios de caracterização da matriz são realizados na instalação experimental descrita no ponto 5.1.2. e representada na Figura 5-1.

Os ensaios realizados são descritos nas subsecções seguintes, onde se encontram os gráficos que permitem uma melhor visualização dos dados obtidos.

O modelo teórico fornece dados relativos a qualquer valor do coeficiente de transferência de calor por convecção, h , que se pretenda. Os quatro diferentes valores de h escolhidos e representados nos gráficos são: 5, 10, 20 e 30 W/m².°C.

As temperaturas do ensaio experimental são obtidas através dos termopares colocados à distância de 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60 centímetros ao longo da conduta.

É feita uma comparação gráfica entre valores teóricos e experimentais observando de que forma estes coincidem ao longo do tempo e do espaço percorrido pelo escoamento.

Para cada um dos ensaios vão ser apresentadas duas análises diferentes. Em primeiro lugar vão ser apresentados os gráficos que descrevem a variação da temperatura ao longo da distância percorrida em diferentes instantes de tempo; em segundo lugar são apresentados gráficos que mostram a evolução da temperatura em cada localização ao longo do tempo. São utilizados valores adimensionais de temperatura para que os diferentes ensaios possam ser comparados entre si; estes valores obtêm-se a partir da equação (19).

$$T_{adim} = \frac{T_{ar} - T_{max}}{T_i - T_{max}} \quad (19)$$

Onde:

T_{adim} - Temperatura do ar adimensional

T_{ar} - Temperatura do ar num dado instante, °C

T_{max} - Temperatura máxima do ar atingida durante o ensaio, °C

T_i - Temperatura do ar e da matriz no início do ensaio, °C

A temperatura máxima utilizada na adimensionalização é a referente à temperatura máxima atingida a 0 cm durante o ensaio. A temperatura da matriz no início do ensaio considera-se igual à temperatura do ar ambiente.

No caso do ensaio n.º 1 surge ainda uma terceira análise onde se pretende determinar se a transferência de calor se processa a velocidades diferentes em zonas distintas da conduta, neste caso considera-se a possibilidade de o h junto à parede ser inferior ao h das zonas mais próximas do centro da conduta.

Os valores das variáveis correspondentes aos três ensaios realizados encontram-se na Tabela 5-2.

Tabela 5-2 Valores das variáveis dos 3 ensaios realizados.

Ensaio	Velocidade de Escoamento (m/s)	Temperatura Inicial da Matriz (°C)	Temperatura Máxima do Ar (°C)
1	1,2	23	63,24
2	1,4	20	85,11
3	1,7	28	63,39

5.4.1.1. Ensaio n.º 1

Os valores da velocidade do escoamento, da temperatura inicial da matriz e da temperatura máxima do ar relativos a este ensaio são referidos na Tabela 5-2.

1ª Análise

Na Figura 5-2 e na Figura 5-3 são apresentados os valores da temperatura do ar obtidos experimentalmente e os dados fornecidos pelo modelo teórico, adimensionalizados de acordo com a equação (19), correspondentes aos instantes de tempo de ensaio de 40 e 60 segundos. As tabelas com os valores de temperatura obtidos encontram-se no APÊNDICE A.

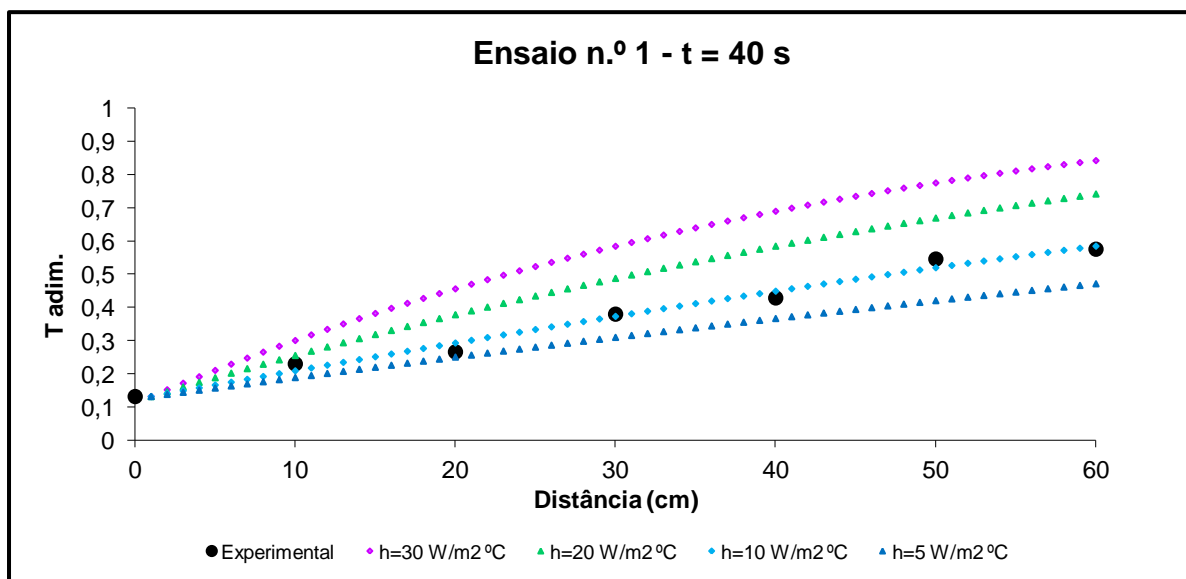


Figura 5-2 Variação da temperatura adimensional em função da distância para o instante de 40 segundos.

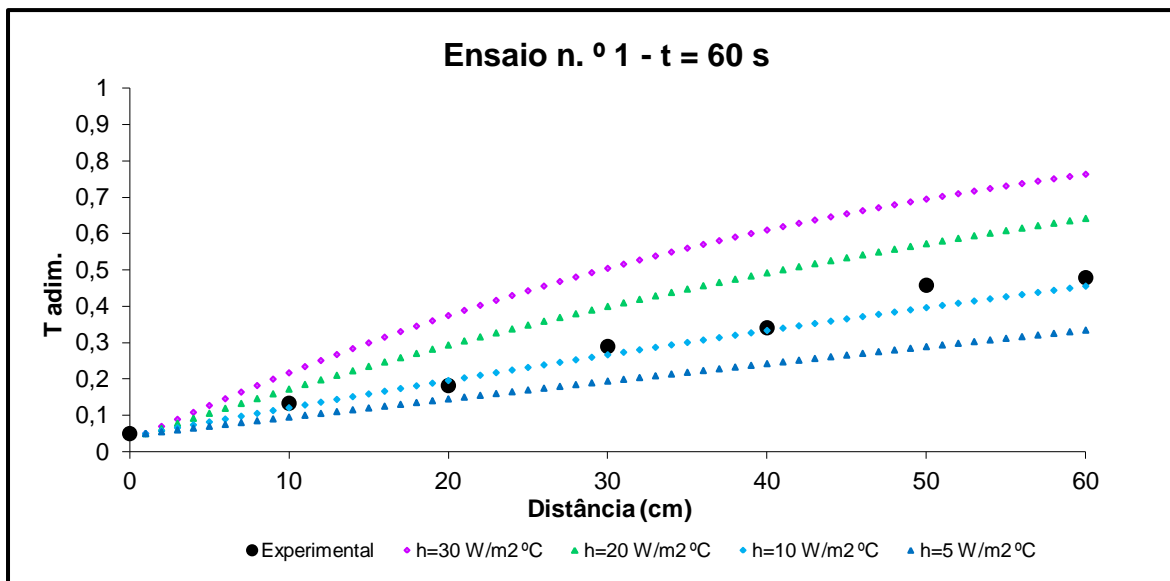


Figura 5-3 Variação da temperatura adimensional em função da distância para o instante de 60 segundos.

Da análise dos gráficos, ao longo do espaço percorrido, nos dois instantes de tempo, verifica-se uma aproximação dos valores experimentais aos valores de h igual a $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ dados pelo modelo teórico.

2ª Análise

De seguida são apresentados os gráficos que representam três dos sete termopares colocados ao longo da conduta, à distância de 10, 30 e 60 centímetros do seu início, mostrando como varia a temperatura ao longo do tempo. Os gráficos estão representados na Figura 5-4, na Figura 5-5 e na Figura 5-6.

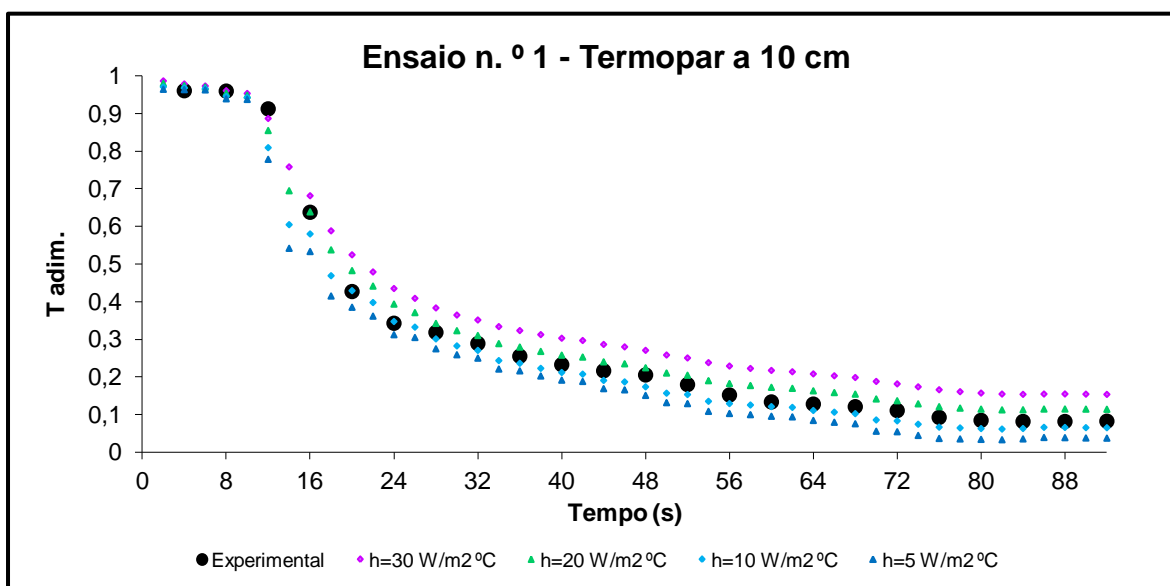


Figura 5-4 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 10 cm de distância.

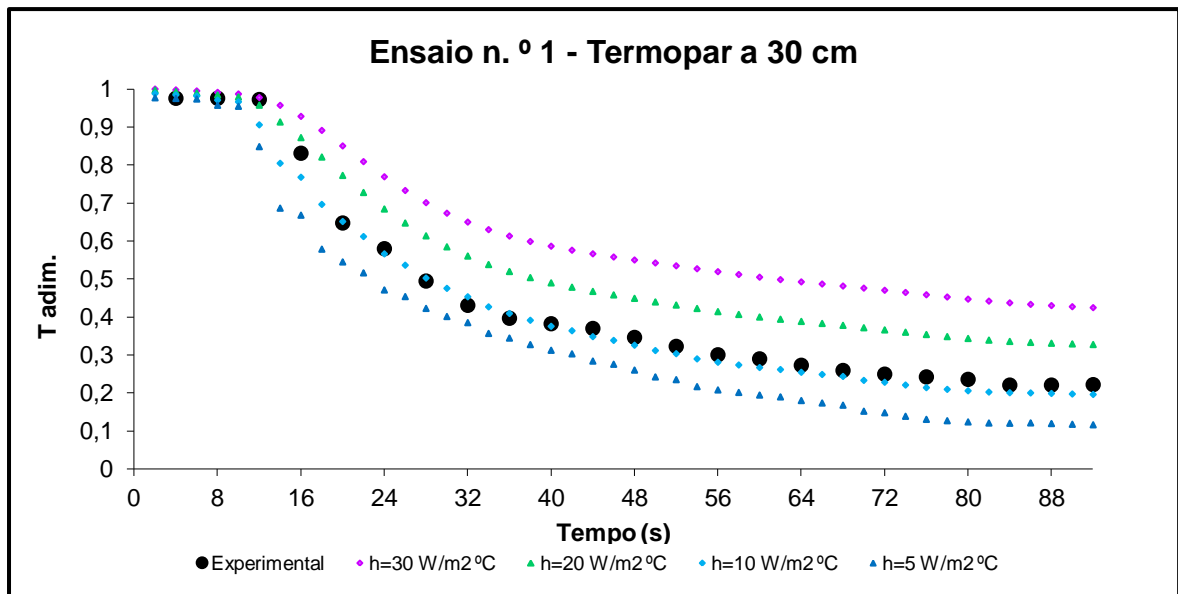


Figura 5-5 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 30 cm de distância.

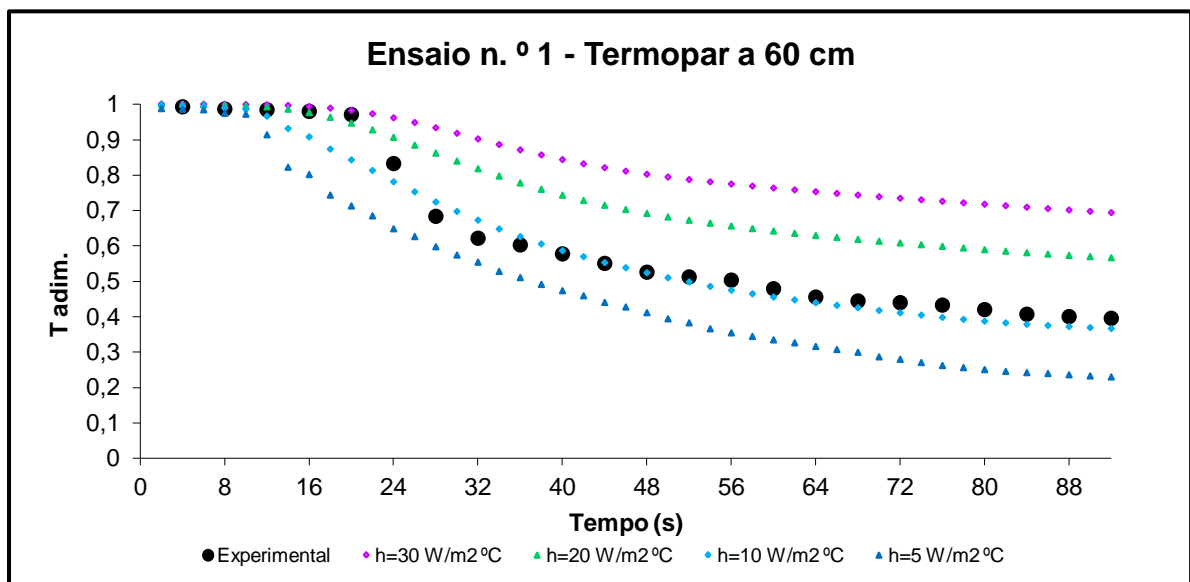


Figura 5-6 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 60 cm de distância.

No início do ensaio, a temperatura do ar medida experimentalmente mantém-se praticamente constante, o que significa que não há uma grande absorção de calor por parte da matriz.

Nos primeiros 10 segundos as curvas dos valores teóricos e experimentais sobrepõem-se.

Nos três termopares verifica-se uma descida de temperatura acentuada dos 12 aos 24 segundos no termopar a 10 centímetros, dos 12 aos 32 segundos no termopar a 30 centímetros e dos 20 aos 32 segundos no termopar a 60 centímetros. Isto significa que houve uma maior transferência de calor do ar para a matriz metálica nestes instantes.

Ao longo do tempo, para cada uma das distâncias consideradas, verifica-se uma aproximação dos valores experimentais aos valores da curva do coeficiente de transferência de calor igual a $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, dada pelo modelo teórico.

3ª Análise

Foi considerada a hipótese de a transferência de calor junto à parede (H_p) ser menor do que a transferência mais próxima do centro da conduta (H). Para isso considerou-se o coeficiente transferência de calor do escoamento junto da parede $1/2$, $1/3$ e $1/5$ menor que no centro da conduta (Figura 5-7, Figura 5-8 e Figura 5-9).

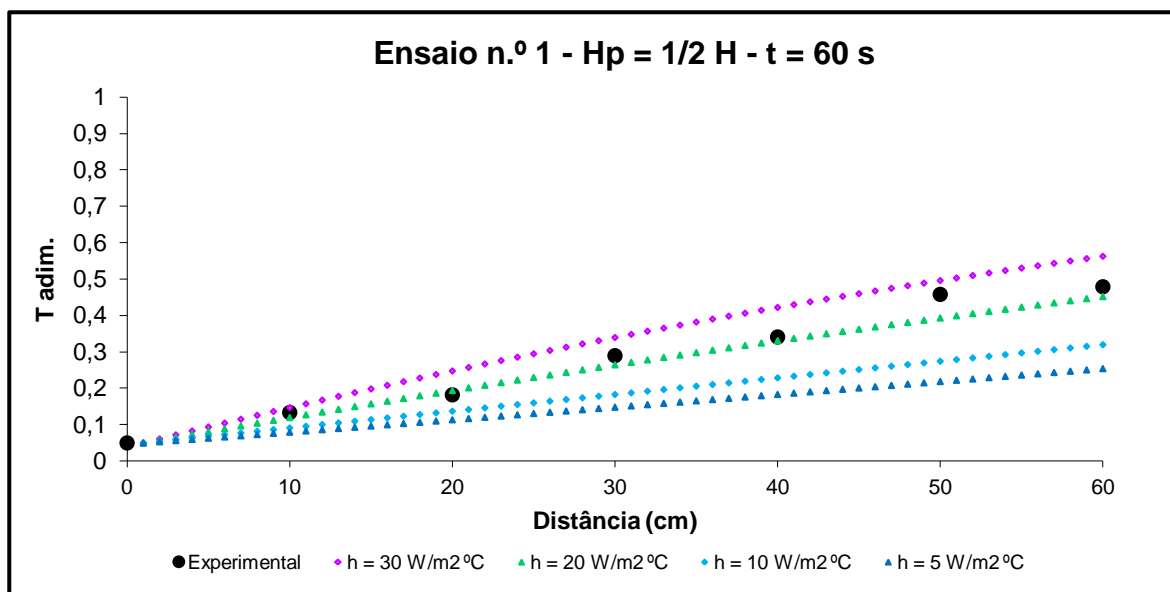


Figura 5-7 Variação da temperatura adimensional em função da distância quando H_p é $1/2$ do valor de H , no fim de 60 segundos.

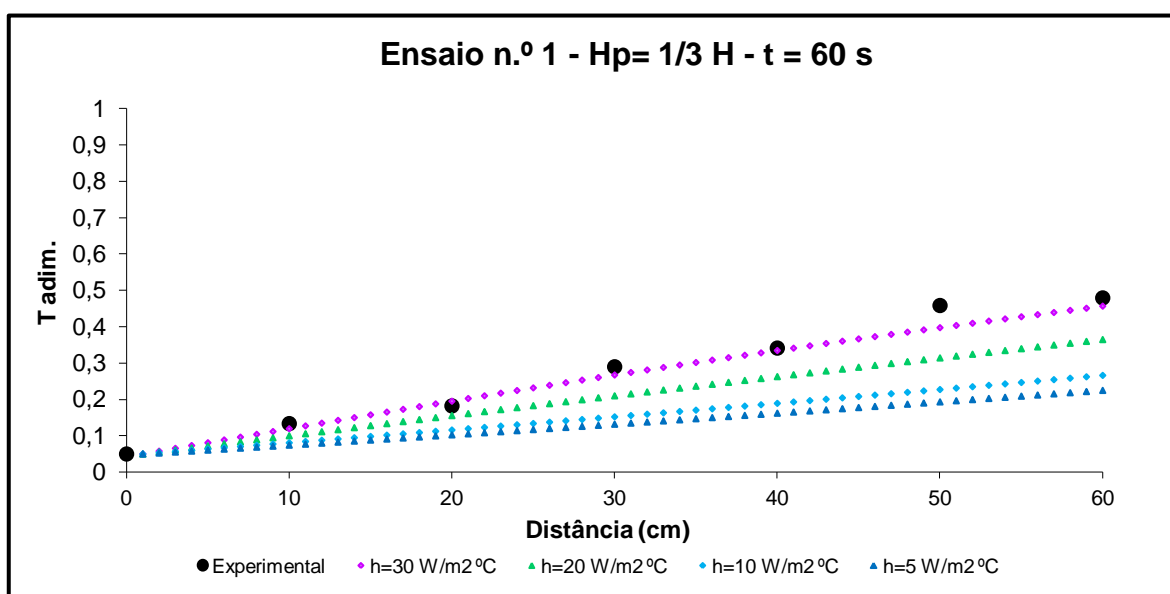


Figura 5-8 Variação da temperatura adimensional em função da distância quando H_p é $1/3$ do valor de H , no fim de 60 segundos.

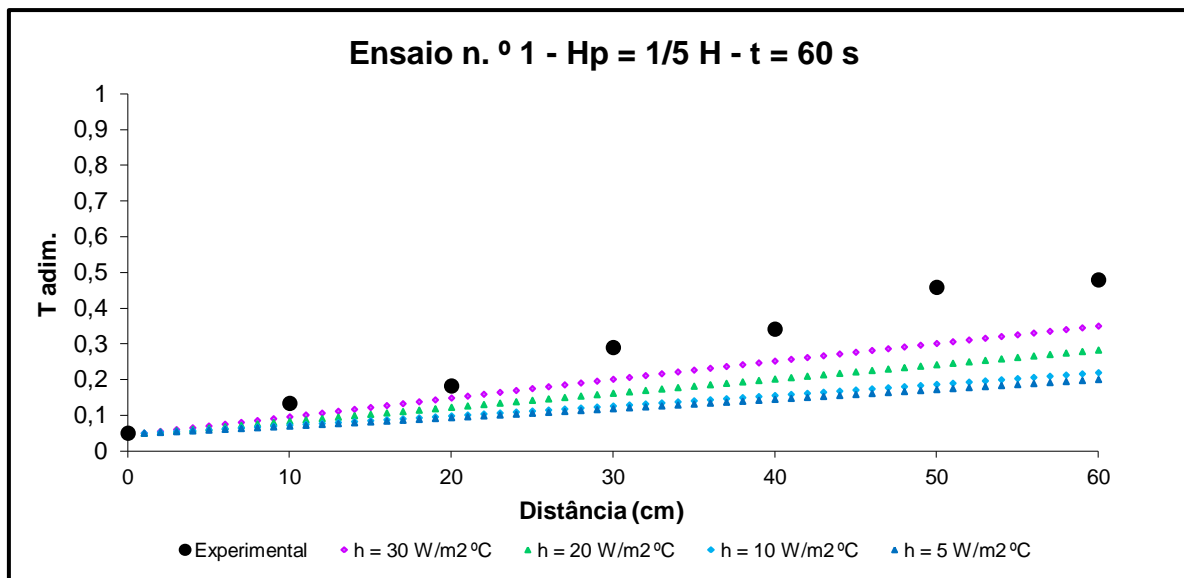


Figura 5-9 Variação da temperatura adimensional em função da distância quando H_p é $1/5$ do valor de H , no fim de 60 segundos.

Da observação dos gráficos conclui-se que no caso em que se considera maior a diferença entre os coeficientes de transferência de calor no interior da conduta e na zona mais próxima da parede, mais afastados estão os valores experimentais dos valores dados pelo modelo teórico. Sendo assim, o valor do coeficiente de transferência de calor junto da parede não deve diferir significativamente do valor de h no centro da conduta.

5.4.1.2. Ensaio n.º 2

Os valores das variáveis deste ensaio, velocidade de escoamento, temperatura inicial da matriz e temperatura máxima do ar, encontram-se na Tabela 5-2.

1ª Análise

Na Figura 5-10 e Figura 5-11 são apresentados os valores da temperatura do ar obtidos experimentalmente e os dados fornecidos pelo modelo teórico, adimensionalizados de acordo com a equação (19), correspondentes aos instantes de tempo de ensaio de 40 e 60 segundos. As tabelas com os valores de temperatura obtidos encontram-se no APÊNDICE A.

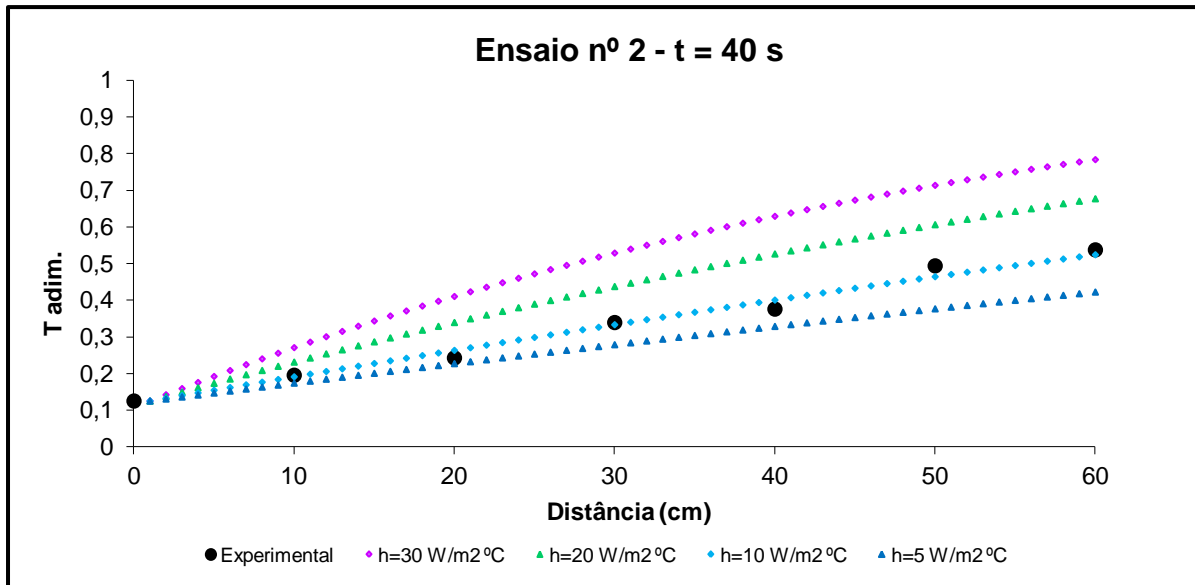


Figura 5-10 Variação da temperatura adimensional em função da distância para o instante de 40 segundos.

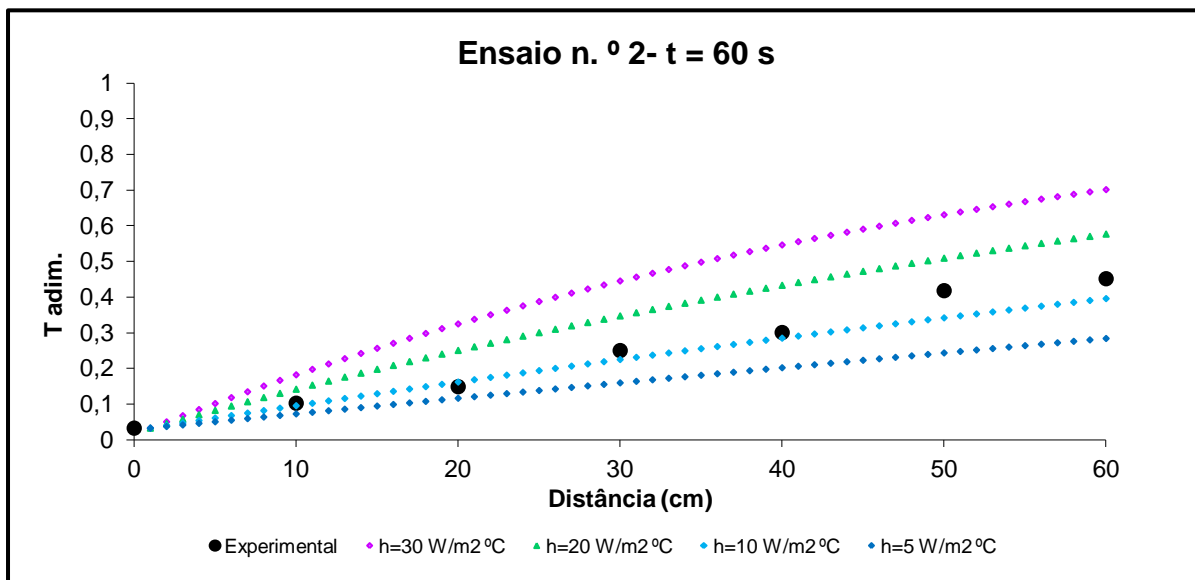


Figura 5-11 Variação da temperatura adimensional em função da distância para o instante de 60 segundos.

Da análise dos gráficos, ao longo do espaço percorrido, nos dois instantes de tempo, verifica-se uma aproximação dos valores experimentais aos valores de h igual a $10 \text{ W/m}^2\text{°C}$ dados pelo modelo teórico.

2ª Análise

De seguida são apresentados os gráficos que representam três dos sete termopares colocados ao longo da conduta, à distância de 10, 30 e 60 centímetros do seu início, mostrando como varia a temperatura ao longo do tempo. Os gráficos estão representados nas Figura 5-12, Figura 5-13 e Figura 5-14.

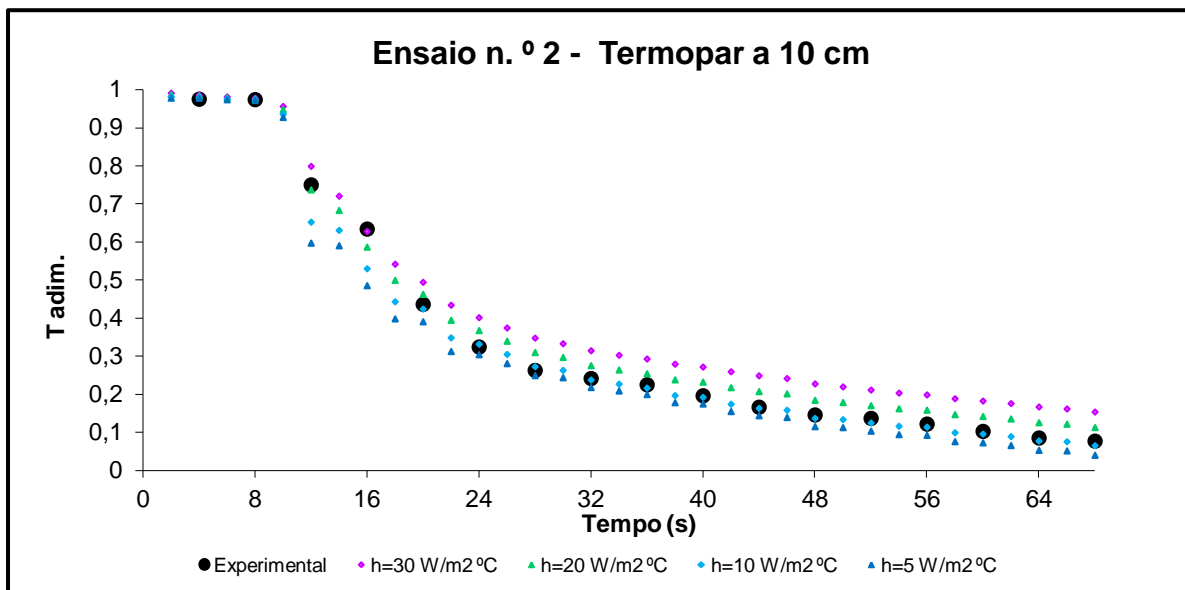


Figura 5-12 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 10 cm de distância.

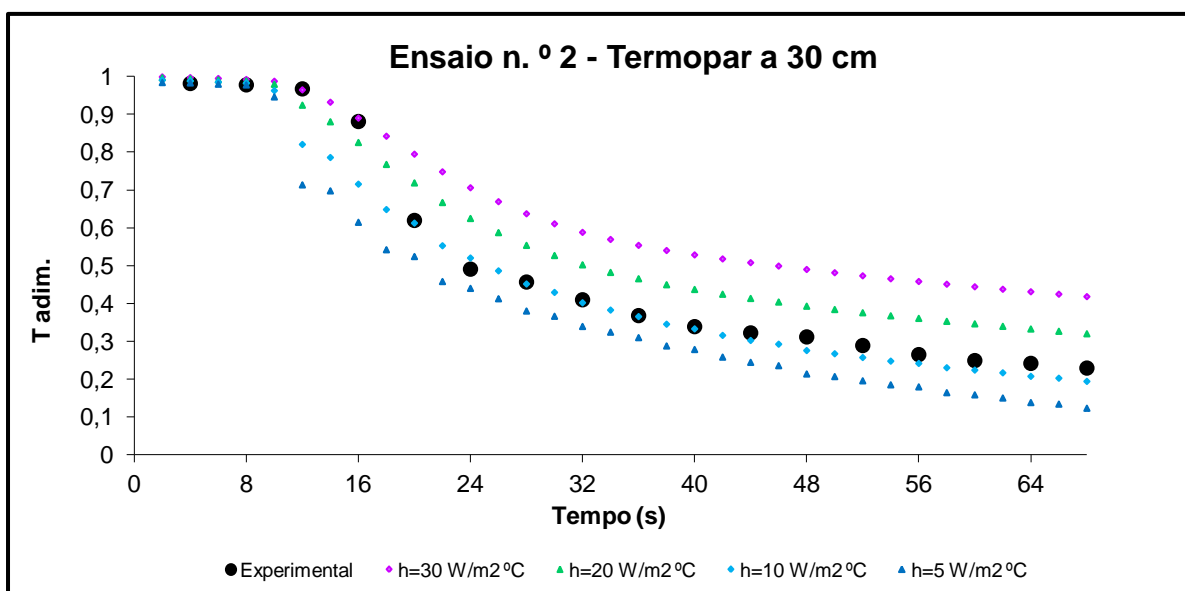


Figura 5-13 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 30 cm de distância.

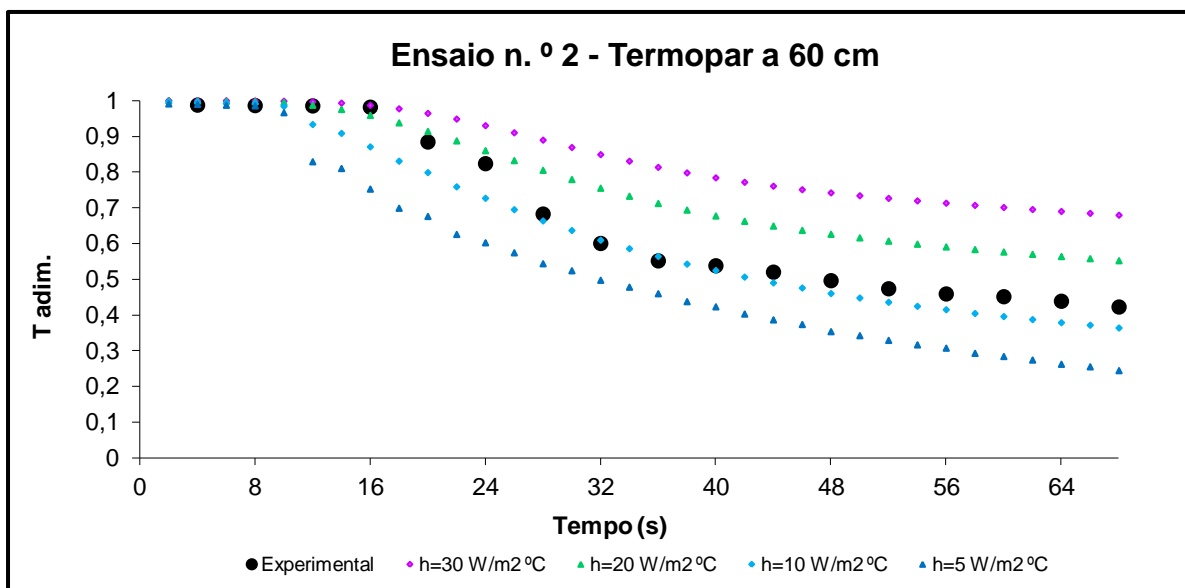


Figura 5-14 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 60 cm de distância.

No início do ensaio, a temperatura do ar medida experimentalmente mantém-se praticamente constante, o que significa que não há uma grande absorção de calor por parte da matriz.

Nos primeiros 10 segundos as curvas dos valores teóricos e experimentais sobrepõem-se.

Nos três termopares verifica-se uma descida de temperatura acentuada dos 8 aos 28 segundos no termopar a 10 centímetros, dos 12 aos 24 segundos no termopar a 30 centímetros e dos 16 aos 36 segundos no termopar a 60 centímetros, o que significa que houve uma maior transferência de calor do ar para a matriz porosa nestes intervalos de tempo.

Ao longo do tempo, para cada uma das distâncias consideradas, verifica-se uma aproximação dos valores experimentais aos valores da curva do coeficiente de transferência de calor igual a $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, dada pelo modelo teórico. No entanto, esta concordância não é tão notória no termopar colocado a 60 centímetros de distância.

5.4.1.3. Ensaio n.º 3

Na Tabela 5-2 são referidos os valores das variáveis relativas a este ensaio (velocidade de escoamento, temperatura inicial da matriz e temperatura máxima do ar atingida).

1ª Análise

Na Figura 5-15 e na Figura 5-16 são apresentados os valores da temperatura do ar obtidos experimentalmente e os dados fornecidos pelo modelo teórico, adimensionalizados de acordo com a equação (19), correspondentes aos instantes de tempo de ensaio de 40 e 60 segundos. As tabelas com os valores de temperatura obtidos encontram-se no APÊNDICE A.

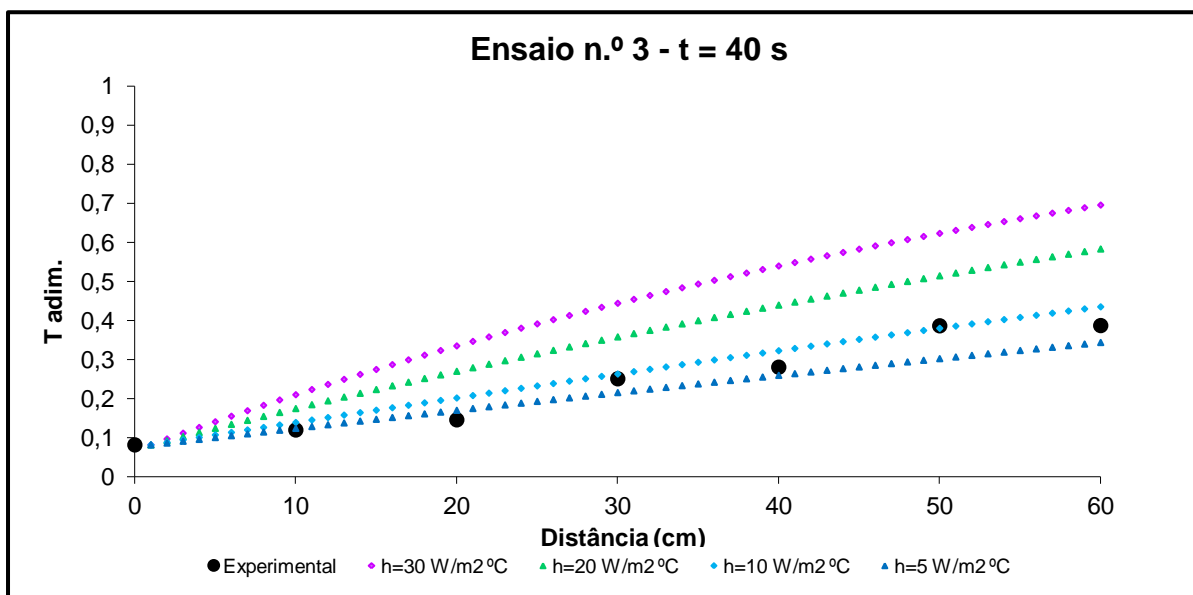


Figura 5-15 Variação da temperatura adimensional em função da distância para o instante de 40 segundos.

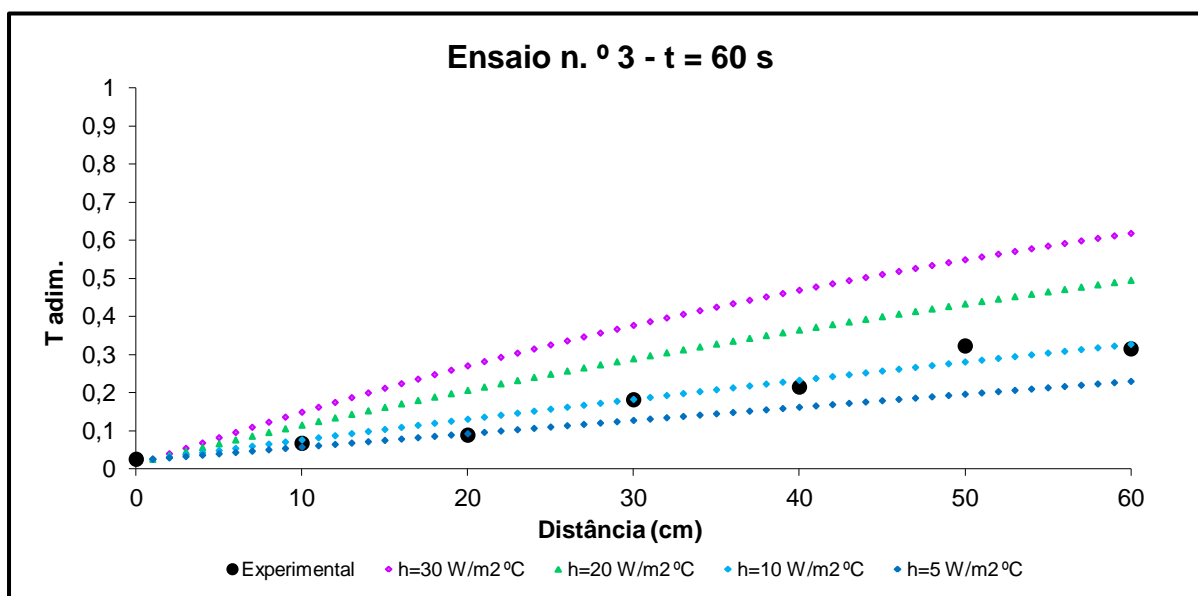


Figura 5-16 Variação da temperatura adimensional em função da distância para o instante de 60 segundos.

Em relação ao instante de tempo de 40 segundos, os valores experimentais, ao longo da conduta, aproximam-se dos valores de h iguais a 5 e 10 W/m².°C, não permitindo deduzir qual o valor do coeficiente de transferência de calor da matriz.

Ao comparar os dois instantes de tempo, é notória uma maior proximidade dos valores experimentais à curva do valor de h igual a 10 W/m².°C no final de 60 segundos.

2ª Análise

De seguida são apresentados os gráficos que representam três dos sete termopares colocados ao longo da conduta, à distância de 10, 30 e 60 centímetros do seu início, mostrando como varia a temperatura ao longo do tempo. Os gráficos estão representados na Figura 5-17, na Figura 5-18 e na Figura 5-19.

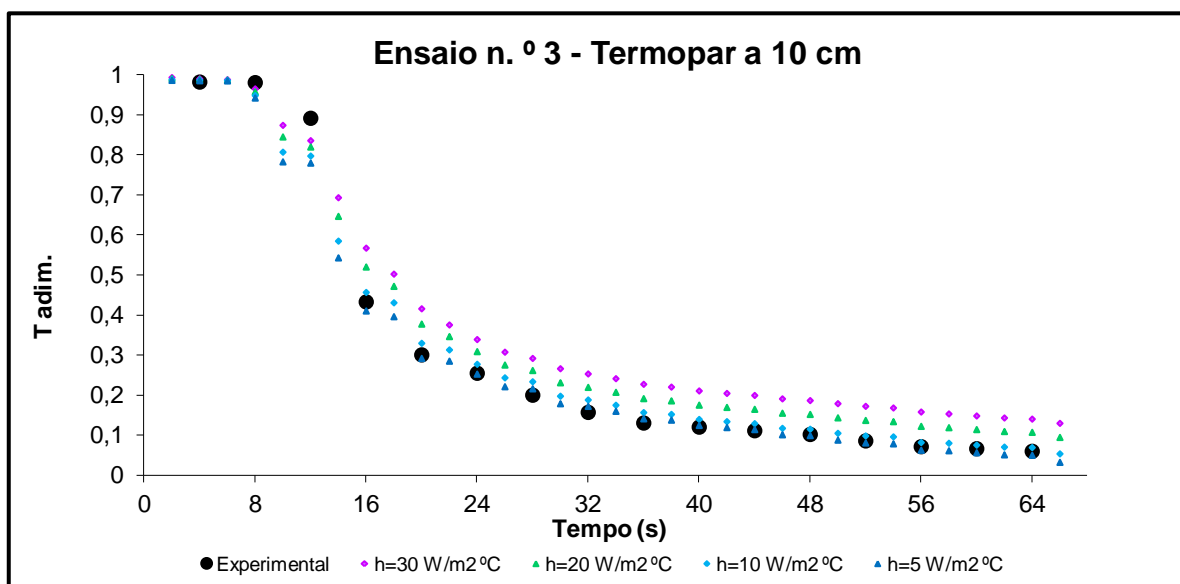


Figura 5-17 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 10 cm de distância.

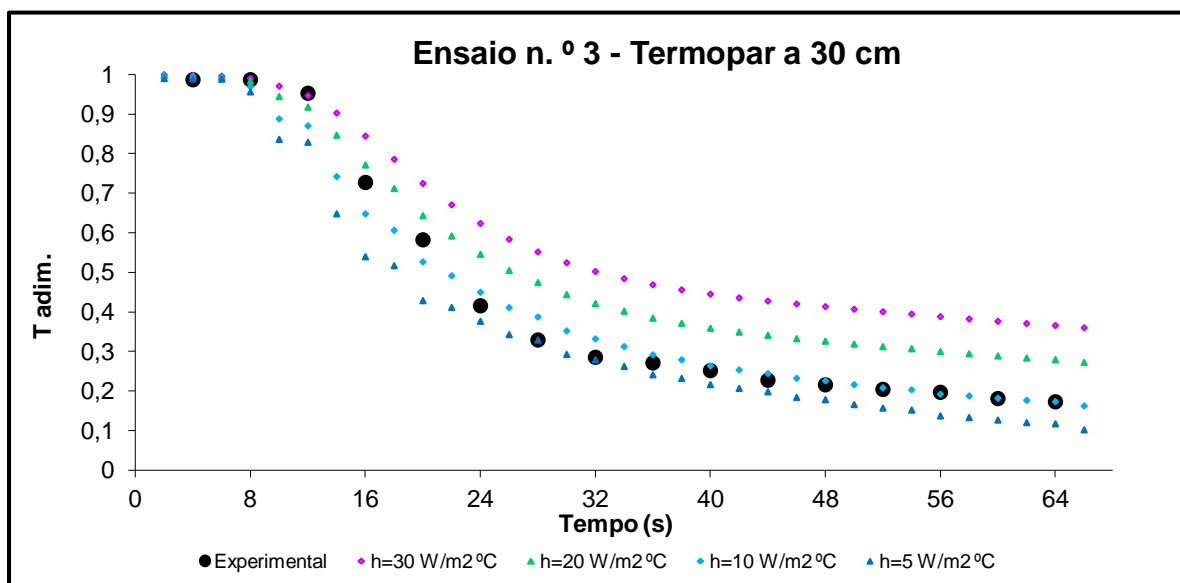


Figura 5-18 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 30 cm de distância.

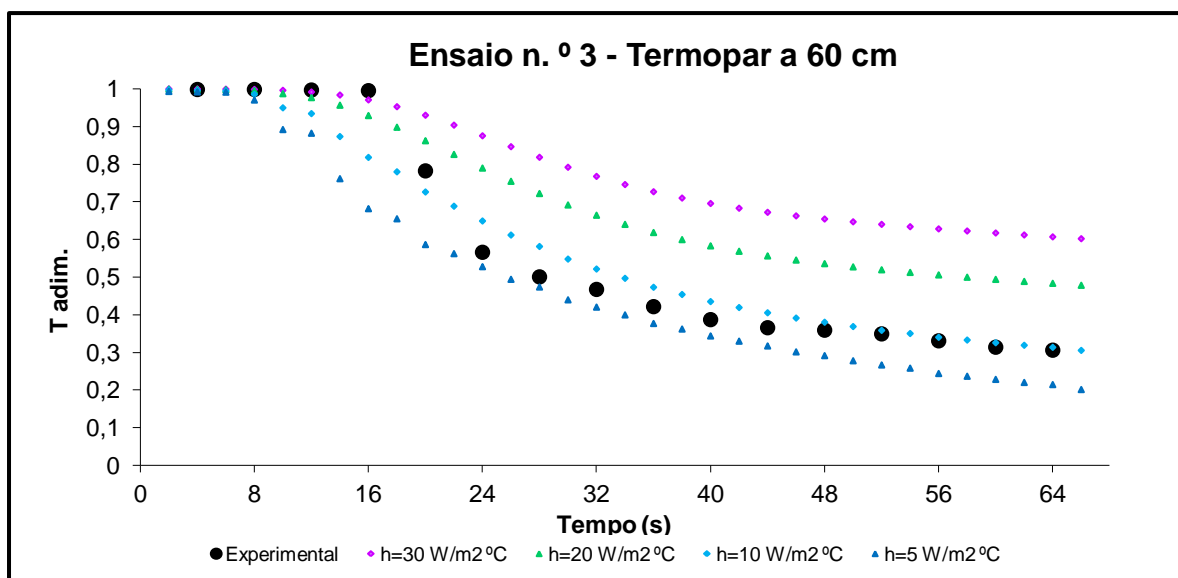


Figura 5-19 Variação da temperatura adimensional em função do tempo, no termopar a 60 cm de distância.

No início do ensaio, a temperatura do ar medida experimentalmente mantém-se praticamente constante, o que significa que não há uma grande absorção de calor por parte da matriz.

Nos primeiros 8 segundos as curvas dos valores teóricos e experimentais sobrepõem-se.

Nos três termopares verifica-se uma descida de temperatura acentuada dos 8 aos 36 segundos no termopar a 10 centímetros, dos 12 aos 32 segundos no termopar a 30 centímetros e dos 16 aos 40 segundos no termopar a 60 centímetros, o que significa que houve uma maior transferência de calor do ar para a matriz porosa nestes intervalos de tempo.

Ao longo do ensaio os valores situam-se entre os valores teóricos do coeficiente de transferência de calor entre de 5 e 10 W/m².°C, no entanto, ao longo do tempo e para uma temperatura de entrada já relativamente constante, os dados experimentais nas diferentes localizações sobrepõem-se quase na totalidade com o valor teórico de h igual a 10 W/m².°C.

5.4.1.4. Resumo dos Ensaios

Nos três ensaios, nos instantes iniciais, as curvas teóricas e experimentais sobrepunham-se, não existindo variações de temperatura no fluido o que sugere que a matriz não absorveu calor nesse intervalo de tempo.

Verificou-se também que a partir de um certo instante de tempo de ensaio mais avançado, havia uma queda brusca da temperatura do ar devido à absorção de calor por parte da matriz porosa.

O ensaio n.º 2 difere dos outros porque ao longo do tempo, a uma distância de 60 centímetros do início da conduta da instalação experimental, os valores experimentais não se aproximam de uma forma tão notória aos valores teóricos de h iguais a $10 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, como observado nos outros dois ensaios, contudo o afastamento não é significativo.

Depois de comparados os dados fornecidos pelo modelo teórico com os valores experimentais através da sua representação gráfica, foi possível chegar ao valor do coeficiente de transferência de calor por convecção da matriz. Na Tabela 5-3 encontram-se os resultados dos ensaios de forma resumida.

Tabela 5-3 Resumo dos ensaios para a determinação de h .

	Ensaio n.º 1	Ensaio n.º 2	Ensaio n.º 3
Valor de h da matriz ($\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)	10	10	10

Em todos os ensaios, o coeficiente de transferência de calor por convecção aproxima-se tendencialmente do valor de $10 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$.

5.4.1.5. Comparação dos valores de h obtidos com os valores teóricos referidos na literatura

Com o objectivo de comparar o valor de h obtido nos ensaios experimentais (subcapítulo 5.4.1.) com os valores teoricamente expectáveis, recorreu-se a correlações empíricas sugeridas por Bird *et al.*, no livro “Transport Phenomena” (1960). Estas permitem determinar o valor do coeficiente de transferência de calor no caso em que existe convecção forçada através de leitos preenchidos com um meio poroso.

Assim, as correlações que permitem analisar a transferência de calor na situação referida são as seguintes:

Factor de Colburn:

$$j_H = 0,91 Re^{-0,51} \varphi \quad \text{se } Re < 50 \quad (20)$$

$$j_H = 0,61 Re^{-0,41} \varphi \quad \text{se } Re > 50 \quad (21)$$

$$j_H = \frac{h}{c_{p_m} G_0} \left[\frac{c_p \mu}{k} \right]_f^{2/3} \quad (22)$$

Onde:

G_0 - Velocidade mássica, kg/m².s

φ - Factor determinado pelo formato das partículas que preenchem o leito

f - Subscrito para designar fluido

A equação que permite o cálculo do número de Reynolds neste caso é:

$$Re = \frac{G_0}{a \mu_f \varphi} \quad (23)$$

Embora seja difícil caracterizar a geometria dos elementos unitários da matriz utilizada, consideram-se dois valores de φ referentes a cilindros e a anéis de partição, por serem consideradas as formas geométricas mais aproximadas à estrutura da matriz em estudo.

Os cálculos efectuados encontram-se no APÊNDICE B.

No caso em que as partículas têm forma cilíndrica, a que corresponde um valor de φ igual a 0,91, o valor de h obtido é 520 W/m².°C.

Se as partículas forem anéis de partição, em que φ toma o valor de 0,67, o valor de h é igual a 331 W/m².°C.

Os valores obtidos diferem significativamente do valor que se obteve através dos ensaios experimentais. As razões que podem levar a este afastamento de valores devem-se ao facto de as correlações utilizadas, pela sua especificidade, não serem adequadas ao caso em estudo e à dificuldade em identificar qual a forma das partículas da matriz porosa metálica, uma vez que a alteração no valor do factor de forma conduz a valores significativamente diferentes do coeficiente de transferência de calor por convecção, tendo sido os dois valores de φ adoptados como exemplos ilustrativos.

5.4.2. Teste de Pressão na Instalação

Com o objectivo de verificar se a matriz porosa metálica se encontra uniformemente distribuída ao longo da conduta da instalação experimental, foram realizados ensaios para determinar as variações de pressão no seu interior. Para isso, na instalação experimental descrita anteriormente, foram feitos orifícios para instalar tomadas de pressão distribuídas ao longo da conduta, de 10 em 10 centímetros.

O ar não é previamente aquecido, circulando à temperatura ambiente. Através de um manómetro obtêm-se os valores da pressão em cada um dos pontos de medição, individualmente.

Se existir homogeneidade na distribuição da matriz, a perda de carga ao longo do escoamento deve ser aproximadamente linear.

A variação de pressão de um escoamento ao longo de um determinado troço é dada pela equação (24).

$$\Delta p_1 = K' \frac{1}{2} \rho V_1^2 L \Leftrightarrow \frac{\Delta p_1}{L} = K' \frac{1}{2} \rho V_1^2 \quad (24)$$

Onde:

K' - Coeficiente de perda de carga, m^{-1}

A variação de pressão de um escoamento ao longo de um troço verificada noutro ensaio diferente é então dada pela equação (25).

$$\Delta p_2 = K' \frac{1}{2} \rho V_2^2 L \Leftrightarrow \frac{\Delta p_2}{L} = K' \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (25)$$

Pode comparar-se a razão dos declives das rectas de tendência com a razão do quadrado das velocidades de dois ou mais ensaios realizados. Quanto mais próximos forem os seus valores, melhor é a relação linear (equação (26)).

$$\frac{m_1}{m_2} \simeq \frac{V_1^2}{V_2^2} \quad (26)$$

Realizaram-se 10 ensaios. Nos dois primeiros ensaios, ensaio n.º 1 e ensaio n.º 2, dois dos orifícios encontravam-se parcialmente obstruídos, pelo que os dados dos respectivos ensaios não foram considerados.

5.4.2.1. Ensaio nº 3

As medições dos valores de pressão foram feitas a 10, 20, 30, 40 e 50 centímetros de distância do início da conduta. As tomadas de pressão localizam-se nas peças de madeira que separam as secções da conduta. Nas distâncias a 10 e 30 centímetros não foram considerados os valores de pressão medidos, devido a uma obstrução nos orifícios. A velocidade do escoamento do ar é 1,4 m/s. Na Tabela 5-4 e na Figura 5-20 encontram-se os valores obtidos no ensaio.

Tabela 5-4 Valores de pressão e da velocidade de escoamento ao longo da conduta.

Distância (cm)	20	40	50
Pressão (mbar)	4,3	2	1,1

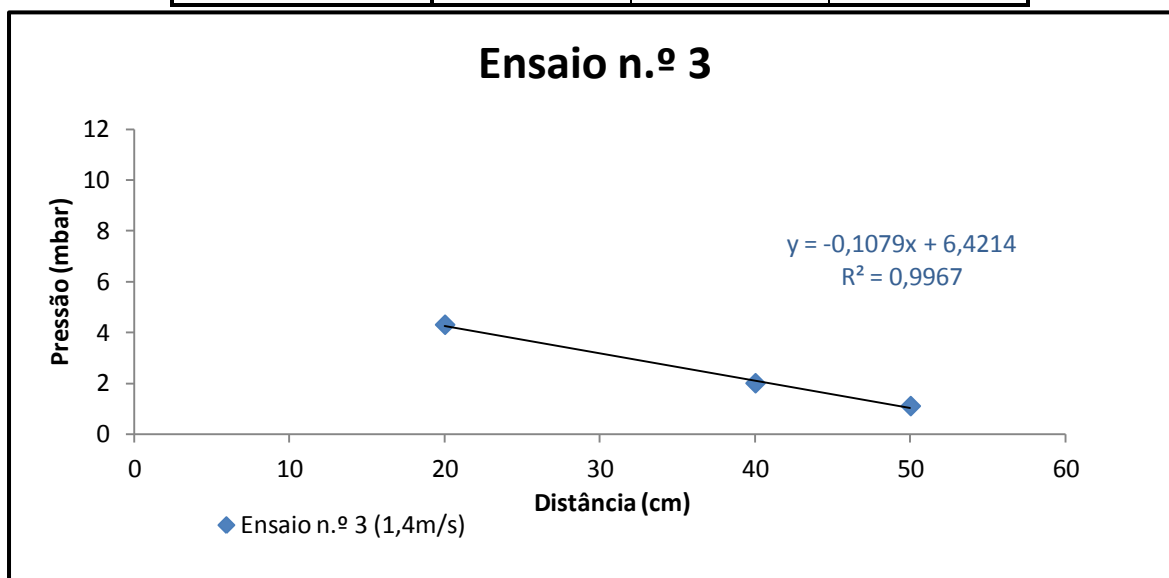


Figura 5-20 Valores de pressão ao longo da conduta e respectiva linha de tendência.

Da análise do gráfico verifica-se que os pontos seguem uma tendência linear, o que permite concluir que a distribuição da matriz é homogénea.

5.4.2.2. Ensaio nº 4

Neste ensaio as medições dos valores de pressão são feitas a 10, 20, 40 e 50 centímetros de distância do início da conduta. A velocidade do escoamento do ar é 1,7 m/s. Na Tabela 5-5 e na Figura 5-21 encontram-se os valores obtidos no ensaio.

Tabela 5-5 Valores de pressão e da velocidade de escoamento ao longo da conduta.

Distância (cm)	10	20	40	50
Pressão (mbar)	7,8	6,5	3	1,6

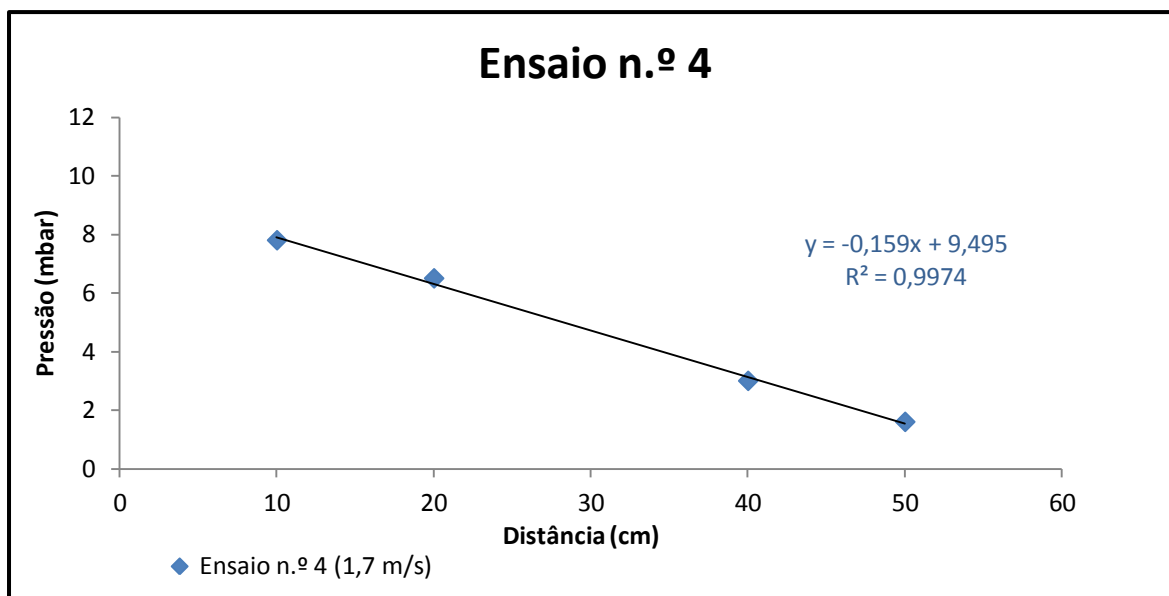


Figura 5-21 Valores de pressão ao longo da conduta e respectiva linha de tendência.

Da análise do gráfico verifica-se que os pontos seguem uma tendência linear, o que permite concluir que a distribuição da matriz é homogénea, sendo a velocidade de escoamento superior à do ensaio anterior. O valor de pressão do ponto a 30 centímetros de distância não foi considerado porque se obteve um valor absurdo, por obstrução da tomada de pressão.

Em ambos os ensaios, como seria de esperar, verifica-se uma queda de pressão ao longo do escoamento.

Relação entre a razão dos declives das rectas de tendência e a razão do quadrado das velocidades

Tabela 5-6 Relação da razão dos declives com a razão do quadrado das velocidades.

	Ensaio n.º 3	Ensaio n.º 4
Declive - m	-0,108	-0,159
Velocidade (m/s)	1,4	1,7
Razão dos declives (m_3/m_4)	0,679245	
Razão do quadrado das velocidades	0,678201	
% Variação	0,153	

Verifica-se um valor muito próximo entre as duas relações o que indica uma satisfatória relação linear nestes dois ensaios.

5.4.2.3. Ensaio n.º 5 a n.º10

Para a realização de ensaios com vista a obter mais valores experimentais, a instalação foi alterada passando a dispor de mais duas tomadas de pressão, uma no início da conduta (0 cm) e outra no final da conduta (60 cm), contando assim com sete pontos de medição da pressão do ar, distanciados entre eles dez centímetros.

Estes ensaios variam entre si na velocidade de escoamento do fluido; estes valores estão indicados na Tabela 5-8.

Na Tabela 5-7 e na Figura 5-22 encontram-se os resultados dos ensaios.

Tabela 5-7 Valores de pressão e da velocidade de escoamento ao longo da conduta.

	Distância (cm)	0	10	20	40	50	60
Pressão (mbar)	Ensaio n.º5	6,4	4,9	4,2	1,9	1,1	0,1
	Ensaio n.º6	8,2	6,4	5,6	2,7	1,5	0,1
	Ensaio n.º 7	5,1	3,9	3,2	1,5	0,8	0,1
	Ensaio n.º 8	6,6	5,1	4,2	2,0	1,1	0,1
	Ensaio n.º 9	8,6	6,6	5,7	2,7	1,5	0,0
	Ensaio n.º 10	10,2	7,7	6,6	3,1	1,8	0,0

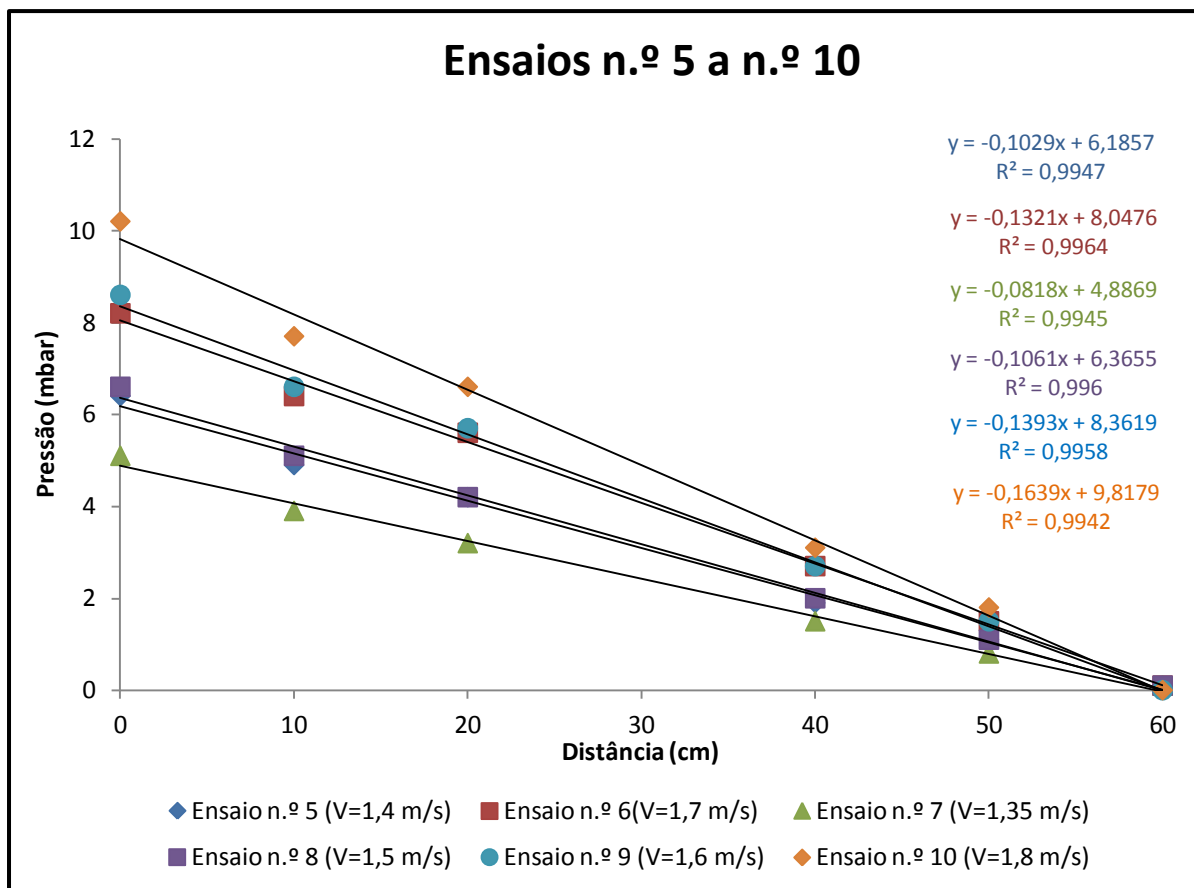


Figura 5-22 Valores de pressão ao longo da conduta e respectiva linha de tendência.

Nestes ensaios verifica-se uma relação linear entre os vários valores de pressão ao longo do escoamento. Os valores para o ponto a 30 centímetros de distância não foram novamente considerados pelo motivo descrito em 5.4.2.2..

No ponto a 10 centímetros de distância nota-se uma queda de pressão mais acentuada uma vez que o valor nessa tomada se afasta ligeiramente da tendência linear, resultado de uma maior concentração ou obstrução da matriz no troço de 0 a 10 centímetros.

Relação entre a razão dos declives das rectas de tendência e a razão do quadrado das velocidades

Tabela 5-8 Valores dos declives e das velocidades para cada ensaio.

	Ensaio n.º 5	Ensaio n.º 6	Ensaio n.º 7	Ensaio n.º 8	Ensaio n.º 9	Ensaio n.º 10
Declive - m	-0,1029	-0,1321	-0,0818	-0,1061	-0,1393	-0,1639
V (m/s)	1,40	1,70	1,35	1,50	1,60	1,80

Tabela 5-9 Relação da razão dos declives com a razão do quadrado das velocidades e sua variação.

Razão dos declives		Razão do quadrado das velocidades		% Variação
m_5/m_6	0,779	V_5^2/V_6^2	0,678	12,93
m_5/m_7	1,258	V_5^2/V_7^2	1,075	14,51
m_5/m_8	0,970	V_5^2/V_8^2	0,871	10,18
m_5/m_9	0,738	V_5^2/V_9^2	0,766	3,65
m_5/m_{10}	0,628	V_5^2/V_{10}^2	0,605	3,64
m_6/m_7	1,615	V_6^2/V_7^2	1,586	1,81
m_6/m_8	1,245	V_6^2/V_8^2	1,284	3,16
m_6/m_9	0,948	V_6^2/V_9^2	1,129	19,04
m_6/m_{10}	0,806	V_6^2/V_{10}^2	0,892	10,67
m_7/m_8	0,771	V_7^2/V_8^2	0,810	5,06
m_7/m_9	0,587	V_7^2/V_9^2	0,712	21,23
m_7/m_{10}	0,499	V_7^2/V_{10}^2	0,563	12,71
m_8/m_9	0,762	V_8^2/V_9^2	0,879	15,39
m_8/m_{10}	0,647	V_8^2/V_{10}^2	0,694	7,28
m_9/m_{10}	0,850	V_9^2/V_{10}^2	0,790	7,03
Média da Variação	9,89	Desvio-Padrão	6,03	

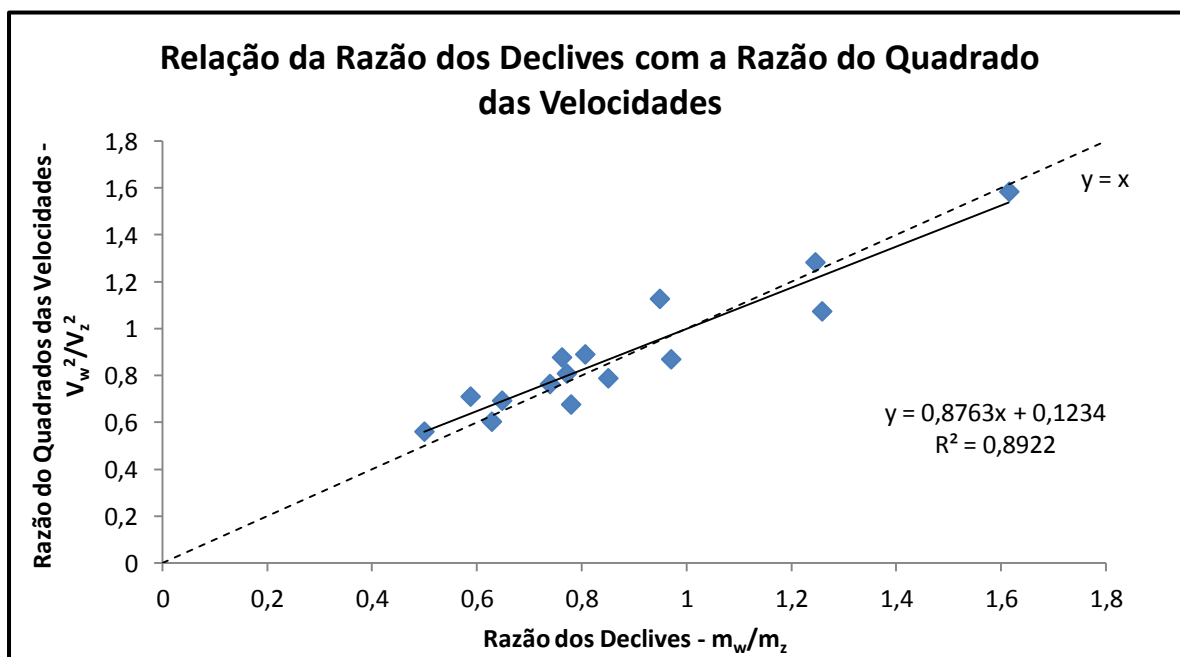


Figura 5-23 Relação entre a razão dos declives e a razão do quadrado das velocidades e comparação com a recta expectável ($y=x$). w e z correspondem a dois ensaios diferentes.

Da análise da Tabela 5-9 e da Figura 5-23 verifica-se que os valores seguem uma tendência linear, com alguma dispersão devida à heterogeneidade da própria matriz, à dificuldade em obter uma distribuição uniforme dos discos de palha-de-aço ao longo da conduta da instalação experimental e à provável ocorrência de escoamentos preferenciais.

5.4.2.4. Coeficiente de Permeabilidade

Uma vez medidas as pressões ao longo do escoamento de ar no interior da conduta preenchida com a matriz porosa metálica é possível determinar o coeficiente de permeabilidade, K , referido anteriormente na subsecção 4.1.1.1, recorrendo à equação (11) e resolvendo em ordem a K :

$$K = \frac{V \times \mu}{\partial P / \partial x} \quad (27)$$

Para este cálculo vão ser apenas considerados os ensaios n.º 7, 8, 9 e 10 por termos um maior conjunto de valores de pressão e consequentemente mais troços para análise.

Os valores do gradiente de pressão estão indicados na Tabela 5-10.

Tabela 5-10 Gradientes de pressão.

Troço (cm)	Gradiente de Pressão, $\partial P / \partial x$ (mbar/cm)			
	V=1,35 m/s	V=1,5 m/s	V=1,6 m/s	V=1,8 m/s
0 - 10	0,12	0,15	0,2	0,25
10 - 20	0,07	0,09	0,09	0,11
20 - 40	0,085	0,11	0,15	0,175
40 - 50	0,07	0,09	0,12	0,13
50 - 60	0,07	0,1	0,15	0,18

Admitindo o valor da viscosidade dinâmica do ar, μ , igual a $1,8 \times 10^{-5}$ Pa.s que corresponde a $1,8 \times 10^{-7}$ mbar.s e tendo o valor da velocidade em centímetros por segundo, obtêm-se os valores do coeficiente de permeabilidade da palha-de-aço indicados na Tabela 5-11.

Tabela 5-11 Valores do coeficiente de permeabilidade.

Troço (cm)	Coeficiente de Permeabilidade, K (cm ²)				Valores Globais
	V=1,35 m/s	V=1,5 m/s	V=1,6 m/s	V=1,8 m/s	
0 - 10	$2,025 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,44 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-4}$	
10 - 20	$3,471 \times 10^{-4}$	3×10^{-4}	$3,2 \times 10^{-4}$	$2,95 \times 10^{-4}$	
20 - 40	$2,859 \times 10^{-4}$	$2,45 \times 10^{-4}$	$1,92 \times 10^{-4}$	$1,85 \times 10^{-4}$	
40 - 50	$3,471 \times 10^{-4}$	3×10^{-4}	$2,4 \times 10^{-4}$	$2,49 \times 10^{-4}$	
50 - 60	$3,471 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-4}$	$1,92 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-4}$	
Média	$3,06 \times 10^{-4}$	$2,59 \times 10^{-4}$	$2,18 \times 10^{-4}$	$2,08 \times 10^{-4}$	$2,48 \times 10^{-4}$
Desvio- Padrão	$6,363 \times 10^{-5}$	$4,98 \times 10^{-5}$	$6,65 \times 10^{-5}$	$6,45 \times 10^{-5}$	$6,11 \times 10^{-5}$

Depois de calculados a média e o desvio-padrão dos valores de permeabilidade obtidos nos vários ensaios, realizados a diferentes velocidades, e sendo este último relativamente baixo, pode concluir-se que o valor do coeficiente de permeabilidade é aproximadamente igual a $2,48 \times 10^{-4}$ cm², equivalente a $2,48 \times 10^{-8}$ m².

Através dos dados presentes na Tabela 5-11 foi obtida a Figura 5-24.

No caso de a matriz se encontrar uniformemente distribuída, os pontos representados na Figura 5-24 estariam todos sobrepostos, pois a permeabilidade seria igual em todos os troços e para qualquer velocidade de escoamento do fluido.

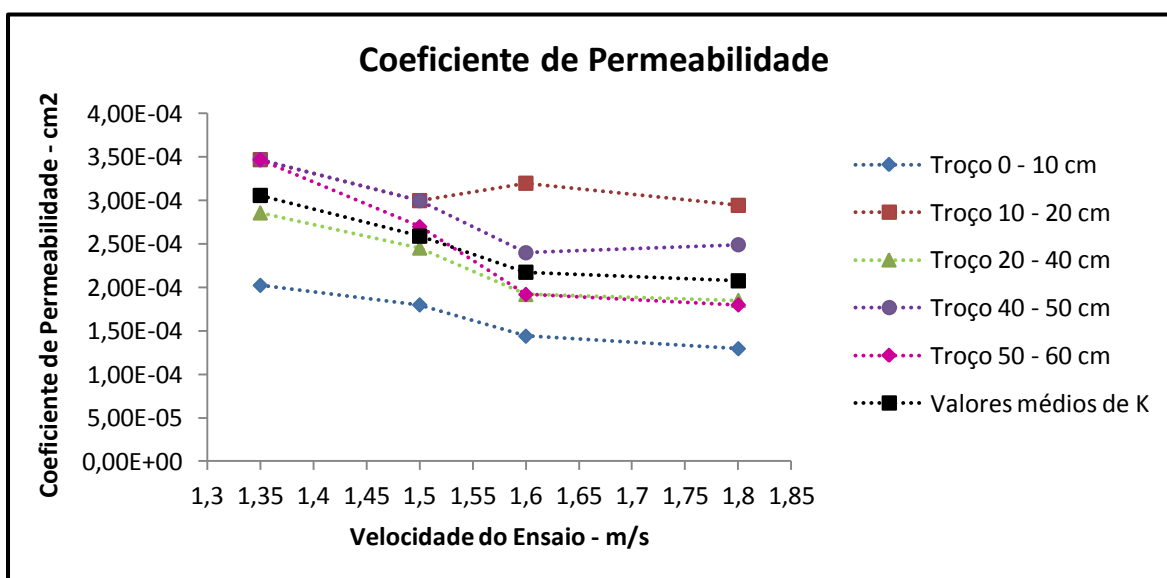


Figura 5-24 Variação do valor do coeficiente de permeabilidade em função da velocidade de ensaio e do troço da conduta.

Da análise da Figura 5-24 verifica-se que o valor do coeficiente de permeabilidade diminui com o aumento da velocidade de escoamento o que significa que existem escoamentos preferenciais, tal como indicado na análise da relação entre a razão dos declives e o quadrado das velocidades (Tabela 5-9 e Figura 5-23).

Observa-se também que o troço de 0 a 10 centímetros é o que apresenta um valor do coeficiente de permeabilidade mais baixo. Nos ensaios onde foi avaliada a queda de pressão em cada troço, como por exemplo, os ensaios n.º 5 a n.º 10 referidos no subcapítulo 5.4.2.3., já se verificava uma maior diminuição da pressão do escoamento no início da conduta, possivelmente causada por uma maior concentração ou obstrução da matriz, como indicado anteriormente, ou seja, há uma certa dificuldade em obter uma distribuição homogénea da matriz.

6. CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objectivo principal a caracterização de uma matriz porosa metálica (palha-de-aço) que funciona como placa absorvedora num colector solar. Pretendeu-se determinar o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção, h .

Foram realizados três ensaios numa instalação experimental, procedendo-se depois à sua análise, comparando os dados obtidos através do modelo teórico com as medições experimentais.

Pôde concluir-se da análise dos ensaios que para tempos mais avançados, onde a temperatura de entrada é praticamente constante, em vários pontos ao longo da conduta da instalação, os dados experimentais sobrepõem-se com o valor teórico de h igual a $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

No decorrer do estudo mediu-se a pressão do ar dentro da instalação em vários pontos, determinando-se a sua variação nos diferentes troços, com o objectivo de estudar a homogeneidade da matriz porosa. Foram realizados dez ensaios.

Concluiu-se que existia uma distribuição praticamente uniforme em todos os troços da conduta, uma vez que a relação dos valores de pressão nas várias tomadas é praticamente linear, havendo alguns desvios que podem ter sido causados pela ocorrência de escoamentos preferenciais ou pela heterogeneidade da matriz.

Ao determinar a variação de pressão ao longo do escoamento de ar foi possível calcular o valor do coeficiente de permeabilidade da matriz porosa que se encontra dentro da conduta da instalação experimental e que neste caso é aproximadamente igual a $2,48 \times 10^{-8} \text{ m}^2$.

Futuramente é recomendável um ajuste na instalação experimental por forma a minimizar as perdas de calor que ocorrem através da parede da instalação e a utilização de um método que certifique uma distribuição homogénea da matriz porosa e que evite a ocorrência de escoamentos preferenciais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amer, B.M.A.; Hossain, M.A.; Gottschalk, K. (2010). “Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana”. *Energy Conversion and Management* 51, pag. 813–820.
- AMRPB (2011). Associação de Municípios da Região do Planalto Beirão: Eco Agenda 2012.
- Baños, R.; Manzano-Agugliaro, F.; Montoya, F.G.; Gil, C.; Alcayde, A.; Gomez, J. (2010). “Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review”, Spain; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, pag. 1753-1766.
- Bird, R. Byron; Stewart, Warren E.; Lightfoot, Edwin N. (1960). “Transport Phenomena”, Singapura, John Wiley & Sons, pag. 411, 412.
- Calçada, Cláudia C. R. (2011). “Caracterização da Interação Térmica entre um Escoamento e uma Matriz Porosa Metálica – Aplicação a um Colector Solar”. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Departamento de Engenharia Mecânica – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Casper, Julie Kerr (2007). “Energy – Powering the Past, Present, and Future”, Chelsea House Publishers, pag. 46, 114.
- Çengel, Yunus A. (2009). “Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática”, São Paulo, Mcgraw-Hill. Pag. 1-40, 355-366, 451.
- DGEG (2012). Direção Geral de Energia e Geologia. Acedido a 23 de Fevereiro de 2012, em <http://www.dgeg.pt/>.
- Fohr, J.P; Figueiredo, A. R. (1987). “Agricultural solar air collectors: design and performances”, France; *Solar Energy* 38 (5), pag. 311-321.
- Fudholi, A.; Sopian, K.; Ruslan, M. H.; Alghoul, M. A.; Sulaiman, M.Y. (2010). “Review of solar dryers for agricultural and marines products”, Malaysia; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, pag. 1-30.
- Kalogirou, Soteris (2003). “The potential of solar industrial process heat applications”, Cyprus, *Applied Energy* 76, pag. 337–361.
- Kalogirou, Soteris A. (2004). “Solar thermal collectors and application”, Cyprus, *Progress in Energy and Combustion Science* 30, pag. 231–295.
- Kalogirou, Soteris (2009). “Solar Energy Engineering”, U.S.A., Academic Press, pag. xiii, 1, 2, 32, 33, 410-416.
- Kaltsschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang; Wiese, Andreas (2007). “Renewable Energy – Technology, Economics and Environment”, Springer, pag. Prefácio, 23-26.
- Martins, António A. A., (2006). “Fenómenos de Transporte em Meios Porosos”

- Dissertação para obtenção de Grau de Doutor em Química, FEUP. Pag. 7-15.
- MRE (2012). Ministério das Relações Exteriores, Brasil. Acedido a 15 de Março de 2012, em <http://www.itamaraty.gov.br/temas/temas-multilaterais/energia-e-biocombustiveis/recursos-nao-renovaveis>.
- Murthy, M.V. Ramana (2009). “A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers”, India, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, pag. 835-844.
- National Weather Service JetStream - Online School for Weather (2012). Acedido a 23 de Fevereiro de 2012, em http://www.srh.noaa.gov/jetstream/global/global_intro.htm.
- Panwar, N.L.; Kaushikb, S.C.; Kotharia, Surendra (2010). “Role of renewable energy sources in environmental protection: A review”, India, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, pag. 1513-1524.
- Pessêgo, Ana S. D. (2010), “ Colector Solar Com Placa de Absorção Porosa para Aplicação em Operações de Secagem”. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Departamento de Engenharia Mecânica – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Quintela, D. (2009). Apontamentos de apoio às aulas da unidade curricular do DEM: Energética do Meio Ambiente.
- Sharma, Atul; Chen, C. R.; Lan, Nguyen Vu; (2009). “Solar-energy drying systems: A review”, Taiwan, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, pag. 1185-1210.
- Silva, Vítor; Figueiredo, A. Rui; Costa, José J.; Gonçalves, João (2010). “Programa de simulação de comportamento e desenvolvimento de protótipo de colector solar”, Portugal, Actas do 1º Encontro Português de Secagem de Alimentos.
- Sopian, K.; Supranto; Daud, W.R.W.; Othman, M.Y.; Yatim, B., (1999). “Thermal performance of the double-pass solar collector with and without porous media”. Renewable Energy 18, pag. 557-564.
- Tadrist, L.; Miscevic, M.; Rahli, O.; Topin, F. (2004). “About the use of fibrous materials in compact heat exchangers”. Experimental Thermal and Fluid Science 28, pag: 193-199.
- Wikipédia_a (2012). Acedido a 23 de Fevereiro de 2012 em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Sol>.
- Wikipédia_b (2012). Acedido a 17 de Abril de 2012 em http://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Darcy.
- Yang, Yue-Tzu; Hwang, Ming-Lu; (2009). “Numerical simulation of turbulent fluid flow and heat transfer characteristics in heat exchangers fitted with porous media”. International Journal of Heat and Mass Transfer 52, pag: 2956-2965.

8. APÊNDICE A

Em seguida são apresentadas as tabelas com os valores de temperatura em graus Celsius e os valores adimensionalizados segundo a equação (19) correspondentes aos gráficos apresentados no subcapítulo 5.4.1.

Ensaio n.º 1

Tabela 8-1 Valores de temperatura do ar em função da distância obtidos experimentalmente para $t = 40$ s.

Distância (cm)	0	10	20	30	40	50	60
Temp. do Ar (° C) (t = 40 s)	57,87	53,92	52,47	47,9	45,94	41,23	40,04
Temp. do Ar (Adim.) (t= 40 s)	0,133	0,232	0,268	0,381	0,430	0,547	0,577

Tabela 8-2 Valores de temperatura do ar em função da distância obtidos experimentalmente para $t = 60$ s.

Distância (cm)	0	10	20	30	40	50	60
Temp. do Ar (° C) (t = 60 s)	61,27	57,91	55,95	51,62	49,55	44,84	44
Temp. do Ar (Adim.) (t = 60 s)	0,049	0,132	0,181	0,289	0,340	0,457	0,478

Ensaio n.º 2

Tabela 8-3 Valores de temperatura do ar em função da distância obtidos experimentalmente para $t = 40$ s.

Distância (cm)	0	10	20	30	40	50	60
Temp. do Ar (° C) (t = 40 s)	76,98	72,4	69,32	63,04	60,65	52,97	50,13
Temp. do Ar (Adim.) (t = 40 s)	0,125	0,195	0,243	0,339	0,376	0,494	0,537

Tabela 8-4 Valores de temperatura do ar em função da distância obtidos experimentalmente para $t = 60$ s.

Distância (cm)	0	10	20	30	40	50	60
Temp. do Ar (° C) (t = 60 s)	83,04	78,49	75,48	68,88	65,59	57,95	55,77
Temp. do Ar (Adim.) (t = 60 s)	0,032	0,102	0,148	0,249	0,230	0,417	0,451

Ensaio n.º 3

Tabela 8-5 Valores de temperatura do ar em função da distância obtidos experimentalmente para $t = 40$ s.

Distância (cm)	0	10	20	30	40	50	60
Temp. do Ar ($^{\circ}$ C) ($t = 40$ s)	60,5	59,15	58,23	54,51	53,46	49,71	49,69
Temp. do Ar (Adim.) ($t = 40$ s)	0,082	0,12	0,146	0,251	0,281	0,387	0,387

Tabela 8-6 Valores de temperatura do ar em função da distância obtidos experimentalmente para $t = 60$ s.

Distância (cm)	0	10	20	30	40	50	60
Temp. do Ar ($^{\circ}$ C) ($t = 60$ s)	62,54	61,06	60,3	57,01	55,83	52,01	52,28
Temp. do Ar (Adim.) ($t = 60$ s)	0,024	0,066	0,087	0,180	0,214	0,322	0,314

9. APÊNDICE B

Os cálculos realizados para a determinação empírica do valor do coeficiente de transferência de calor por convecção da matriz, referida no subcapítulo 5.4.1.5, são apresentados em seguida.

Partículas com forma cilíndrica

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{G_0}{a\mu_f\varphi} \quad (28)$$

Onde:

$$G_0 = \rho \times V = 1,1 \times 1,4 = 1,54 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \quad (29)$$

E φ igual a 0,91.

Então:

$$Re = \frac{1,54}{50293 \times 1,8 \times 10^{-5} \times 0,91} = 1,87 \quad (30)$$

Logo:

$$j_H = 0,91 Re^{-0,51} \varphi = 0,91 \times 1,87^{-0,51} \times 0,91 = 0,6 \quad (31)$$

$$\begin{aligned} j_H &= \frac{h}{c_{pm} G_0} \left[\frac{c_p \mu}{k} \right]_f^{2/3} \Leftrightarrow 0,6 \\ &= \frac{h}{430 \times 1,54} \left[\frac{1003 \times 1,8 \times 10^{-5}}{0,027} \right]_f^{2/3} \Leftrightarrow h = 519,6 \text{ W/m}^2\text{°C} \end{aligned} \quad (32)$$

Partículas com forma de anéis de partição

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{G_0}{a\mu_f\varphi} \quad (33)$$

Onde:

$$G_0 = \rho \times V = 1,1 \times 1,4 = 1,54 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \quad (34)$$

E φ igual a 0,67.

Então:

$$Re = \frac{1,54}{50293 \times 1,8 \times 10^{-5} \times 0,67} = 2,54 \quad (35)$$

Logo:

$$j_H = 0,91 Re^{-0,51} \varphi = 0,91 \times 1,87^{-0,51} \times 0,67 = 0,38 \quad (36)$$

$$\begin{aligned} j_H &= \frac{h}{c_{pm} G_0} \left[\frac{c_p \mu}{k} \right]_f^{2/3} \Leftrightarrow 0,38 \\ &= \frac{h}{430 \times 1,54} \left[\frac{1003 \times 1,8 \times 10^{-5}}{0,027} \right]_f^{2/3} \Leftrightarrow h = 331 \text{ W/m}^2\text{°C} \end{aligned} \quad (37)$$

(Bird *et al.*, 1960)