

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

JANAINA SANTANA ORFANO

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS CONSTRUTIVOS
DE PAREDES DE SECADORES NAS PERDAS TÉRMICAS**

BELO HORIZONTE

2013

JANAINA SANTANA ORFANO

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS CONSTRUTIVOS
DE PAREDES DE SECADORES NAS PERDAS TÉRMICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal Tecnológico de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: André Guimarães Ferreira

BELO HORIZONTE

2013

JANAINA SANTANA ORFANO

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS CONSTRUTIVOS
DE PAREDES DE SECADORES NAS PERDAS TÉRMICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal Tecnológico de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 05/04/2013

BANCA EXAMINADORA

Prof. André Guimarães Ferreira – Orientador

Prof. Euclides Gonçalves Martins Filho

Prof. Lindomar Matias Gonçalves

Prof. Wanderlei Ferreira de Freitas

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Mariane e Ivan, pelo amor incondicional, incentivo e apoio.

Ao Luccas pelos bons momentos compartilhados.

Ao Prof. André Guimarães Ferreira pelos ensinamentos, paciência e dedicação.

Aos amigos que torceram pelo meu sucesso e que fizeram essa caminhada mais divertida e repleta de momentos descontraídos.

RESUMO

O presente trabalho visa analisar a influência dos materiais construtivos de paredes de secadores nas perdas térmicas, através de análise numérica utilizando o software TransCal. A secagem é realizada a fim de facilitar o manuseio de substâncias pulverulentas, reduzir o custo de transporte de matérias-primas, aumentar o valor de uma *commodity*, cumprir especificações a respeito da matéria-prima ou de um produto. Nesse sentido, torna-se necessário o estudo de configurações de secadores que tenham a menor perda térmica possível durante o processo e que consuma o mínimo de energia necessária para que o processo seja viável e o produto apresente qualidade elevada. Para as simulações numéricas foram considerados que a temperatura no interior do secador vale 75°C e a temperatura ambiente vale 25°C. Foram estudadas seções da estrutura do secador combinando os seguintes materiais construtivos: ar, madeira, lã de vidro e metalon. A simulação numérica realizada para verificar as perdas térmicas em uma seção de testes na porta do secador utilizando madeira e lã de vidro indicou um fluxo de calor de 78,67W/m², enquanto a simulação da mesma região formada por metalon e lã de vidro apresentou um fluxo térmico de 5.397,4W/m². Estes resultados numéricos indicam que a utilização de madeira ao invés de perfis de metalon para a confecção da estrutura de estufas e de secadores pode ser uma alternativa mais interessante, pois reduz as perdas de calor.

Palavras-chave: Secador. Perdas térmicas. TransCal.

ABSTRACT

This work intends to analyze the influence of the constitutive materials of dryer walls on thermal losses through numerical analysis using TransCal software. The drying is performed to facilitate the handling of pulverulent substances, reduce the raw material transport costs, increase the value of some commodity or meet the specifications of a raw material or product. Therefore, it's necessary to find dryer configurations that have the minimum possible loss during the process and that consumption the minimal amount of energy so that the process is viable and the quality of the product is high. For the numerical simulations, the internal dryer temperature was assumed to be 75°C and the ambient temperature was assumed to be 25°C. Sections of the dryer structure for the study were built combining the following constitutive materials: air, wood, glass wool and metalon. The numerical simulation executed to verify the thermal losses in a test section from the dryer's door using wood and glass wool indicated a heat flow of 78.67W/m² and the simulation of the same region made of metalon and glass wool showed a thermal flow of 5,397.4 W/m². These numerical results suggest that using wood instead of metalon profiles to build heaters and dryers can be a more interesting alternative, because it reduces the heat losses.

Keywords: Dryer. Thermal losses. TransCal

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Corte longitudinal do secador proposto	13
Figura 2- Estrutura do secador proposto.....	15
Figura 3 - Vista externa do secador	16
Figura 4 - Curvas típicas de secagem (a) e de velocidade de secagem (b).....	19
Figura 5 - Secador de bandejas.....	25
Figura 6 - Esquema da instalação de secagem por atomização.....	26
Figura 7 - Transferência de calor através de uma parede plana	33
Figura 8 - Circuito térmico equivalente.....	35
Figura 9 - Circuito térmico equivalente para uma parede composta em série	36
Figura 10 - Circuito térmico equivalente para uma parede composta série-paralela	36
Figura 11 - Desenvolvimento da camada-limite térmica sobre uma placa plana isotérmica ...	38
Figura 12 - Variação do coeficiente de transferência convectiva de calor no escoamento dentro de tubos	40
Figura 13 - Transição da camada limite na convecção livre sobre placa vertical	44
Figura 14 - Escoamentos movidos pelo empuxo em placas inclinadas.....	46
Figura 15 - Escoamentos movidos pelo empuxo em placas horizontais frias (a) e (b) e placas quentes (c) e (d).....	46
Figura 16 - Domínio bidimensional discretizado com a delimitação dos elementos de volume	49
Figura 17 - Taxa de convergência para o Estudo de caso 1	55
Figura 18 - Distribuição térmica no Estudo de caso 1.....	55
Figura 19 - Circuito térmico da estrutura de metalon, supondo seções transversais isotérmicas	57
Figura 20- Sistema térmico da estrutura de metalon, supondo seções longitudinais adiabáticas	57
Figura 21 - Taxa de convergência para a estrutura de madeira descrita no Estudo de caso 2..	59
Figura 22 - Distribuição térmica para a estrutura de madeira descrita no Estudo de caso 2....	59
Figura 23 - Taxa de convergência para a estrutura de metalon descrito no Estudo de caso 2...	60
Figura 24 - Distribuição térmica para a estrutura de madeira descrita no Estudo de caso 2....	60
Figura 25 - Malha utilizada na análise numérica da parede do secador construído	62
Figura 26 - Taxa de convergência para a parede construída com madeira e lã de vidro.....	63
Figura 27 - Distribuição térmica da parede construída utilizando madeira e lã de vidro.....	64

Figura 28 - Malha utilizada na análise numérica da seção construída com madeira.....	65
Figura 29 - Taxa de convergência térmica da seção contendo madeira como material construtivo	65
Figura 30 - Distribuição térmica do secador utilizando-se madeira como material construtivo	66
Figura 31 - Malha utilizada na análise numérica da seção construída com metalon.....	67
Figura 32 - Taxa de convergência utilizando metalon como material construtivo	67
Figura 33 - Distribuição térmica do secador utilizando-se metalon como material construtivo	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos secadores artificiais.....	23
Tabela 2 - Características de secadores selecionados.....	24
Tabela 3 - Propriedades térmicas dos materiais utilizados na confecção do secador.....	32
Tabela 4 - Números de Nusselt no escoamento laminar completamente desenvolvido em tubos de diversas seções.....	43

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área, m^2
a	Aceleração, m/s^2
C	Taxa de capacidade calorífica, W/K
c_p	Calor específico à pressão constante, $kJ/(kg.K)$
D	Diâmetro, m
E	Energia térmica, J
Gr	Número de Grashof
h	Coefficiente convectivo, $W/(m^2.K)$
\bar{h}	Coefficiente convectivo médio, $W/(m^2.K)$
K	Condutividade térmica, $W/(m.K)$
L	Comprimento característico, m
\dot{m}	Vazão mássica, kg/s
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
q	Taxa de transferência de calor, W
\dot{q}	Taxa de geração de energia térmica por volume, W/m^3
q''	fluxo térmico, W/m^2
Q_{esc}	Calor do escoamento, J
R	Resistência térmica, K/W
Ra	Número de Rayleigh
Re	Número de Reynolds
x, y, z	Coordenadas retangulares, m
T	Temperatura, $^{\circ}C$ ou K
U	Coefficiente global de transferência de calor, $W/(m^2.K)$
U	Componente da velocidade mássica média do fluido, m/s
Letras gregas	
α	Difusividade térmica
δ	Espessura da camada limite fluidodinâmica, m
β	Coefficiente de expansão volumétrica, k^{-1}

μ	Viscosidade, (N.s/m ²)
η	Eficiência
ρ	Densidade, kgm ³

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa e relevância	12
1.2	Objeto de Estudo.....	13
2	OBJETIVOS.....	17
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
3.1	Princípios físicos da secagem	18
3.2	Tipos de secadores	20
3.2.1	Secadores solares.....	20
3.2.2	Secadores artificiais.....	22
3.2.3	Secadores híbridos.....	28
3.3	Parâmetros operacionais dos secadores	28
3.4	Rendimento térmico de um secador.....	29
3.5	Propriedades térmicas de materiais construtivos de secadores.....	30
3.6	Modelagem da condução bidimensional em paredes compostas.....	31
3.7	Modelagem da convecção interna e externa	37
4	METODOLOGIA	47
4.1	Estudo de casos	47
4.4.1	Estudo de caso 1	53
4.4.2	Estudo de caso 2	56
4.4.3	Comparação entre os métodos de solução analítica e numérica	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5.1	Distribuição térmica da parede	62
5.2	Análise comparativa das perdas térmicas através da porta.....	64
6	CONCLUSÕES.....	70
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE A _ Distribuição térmica do Estudo de caso 1	74
	APÊNDICE B _ Distribuição térmica estrutura de madeira do Estudo de caso 2	83
	APÊNDICE C_ Distribuição térmica da estrutura de metalon do Estudo de caso 2	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e relevância

A secagem é realizada a fim de facilitar o manuseio de substâncias pulverulentas, reduzir o custo de transporte de matérias-primas, aumentar o valor de uma *commodity*, cumprir especificações a respeito da matéria-prima ou de um produto. O processo pode ser utilizado, também, para reduzir o volume de efluentes sólidos. No caso de alimentos, a secagem é responsável por intensificar nutrientes e sabor e aumentar o tempo de vida de prateleira através da redução do crescimento de microrganismos.

Antigamente, a secagem era realizada diretamente ao sol, método denominado secagem natural. Embora esse método de secagem necessite de baixos investimentos, ele apresenta altas perdas já que o produto a ser secado reabsorve umidade nos períodos chuvosos, pode haver contaminação com microrganismos patogênicos, ataque de roedores, pássaros e insetos e além de reações enzimáticas. Dessa forma, a secagem não ocorre de maneira homogênea e eficiente.

Para reduzir as perdas geradas na secagem natural e aumentar a qualidade dos produtos obtidos, foram desenvolvidos diversos tipos de secadores solares e/ou artificiais. Os secadores solares são diretamente influenciados pelas condições ambientais, em contrapartida, é um processo que possui custo de operação baixo já que o processo utiliza apenas energia solar. Os secadores artificiais promovem uma secagem de maior qualidade já que o processo não é muito influenciado pelas condições ambientais, porém esse tipo de secador consome quantidade considerável de energia (elétrica, fóssil, eólica ou de outra natureza) para aquecer o ar que irá escoar através do equipamento promovendo a secagem e esse consumo energético pode inviabilizar economicamente a utilização do equipamento.

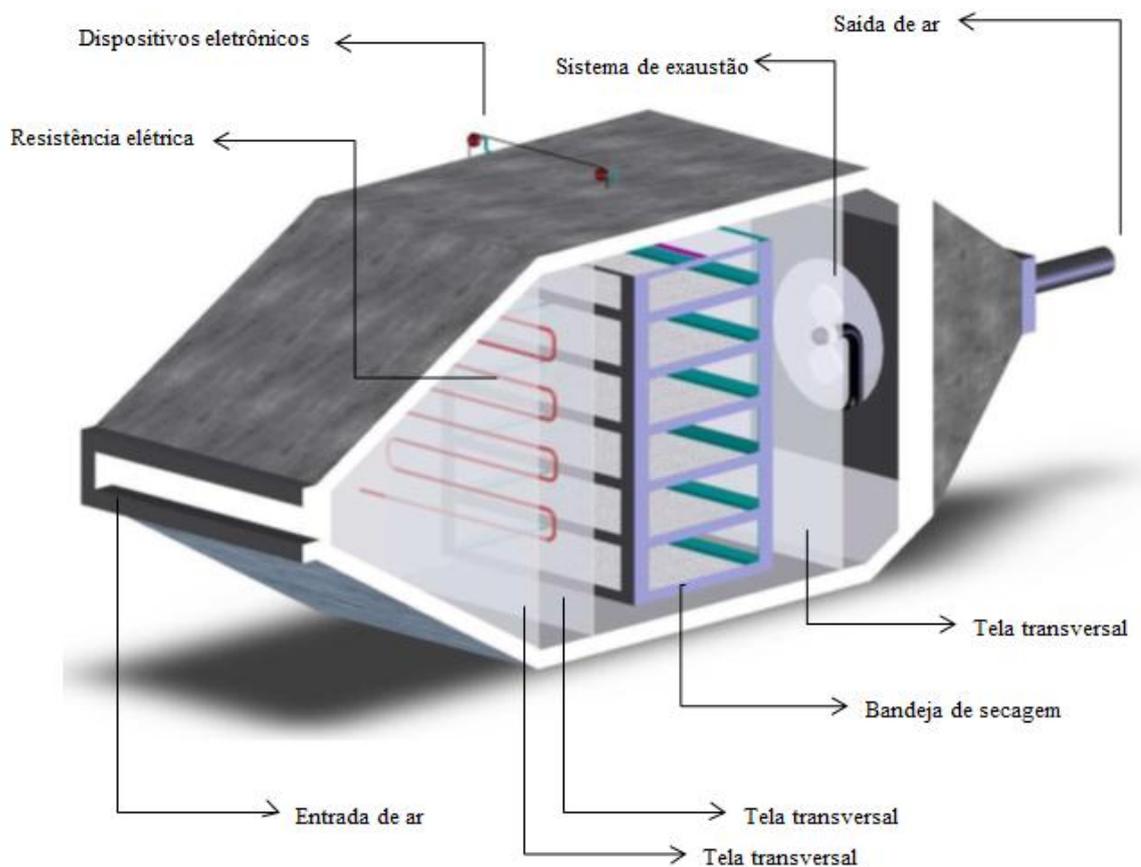
Nesse sentido, torna-se necessário o estudo de configurações de secadores que tenham a menor perda possível durante o processo e que consuma o mínimo de energia necessária para que o processo seja viável e o produto apresente qualidade elevada. Dessa forma, os secadores híbridos (aquecimentos solar e artificial combinados) apresentam-se como alternativas interessantes uma vez que o produto final da secagem possui a mesma qualidade final que o obtido em secadores artificiais, porém o consumo energético é significativamente menor já que o sol é uma das fontes utilizada para aquecer o ar de secagem.

Assim, torna-se relevante realizar estudos comparativos entre diferentes geometrias e materiais de isolamento térmico para avaliar qual seria a configuração mais apropriada para a construção de um secador. No caso do trabalho proposto, será avaliada a influência dos diferentes materiais propostos na perda térmica de um secador artificial.

1.2 Objeto de Estudo

O objeto de estudo desse trabalho é um secador artificial cuja geometria pode ser observada na figura 1. A configuração geométrica e as telas instaladas antes de o escoamento de ar atravessar as bandejas favorecem a uniformidade do fluxo reduzindo a heterogeneidade da secagem, que é comumente observada em grande parte dos equipamentos.

Figura 1- Corte longitudinal do secador proposto



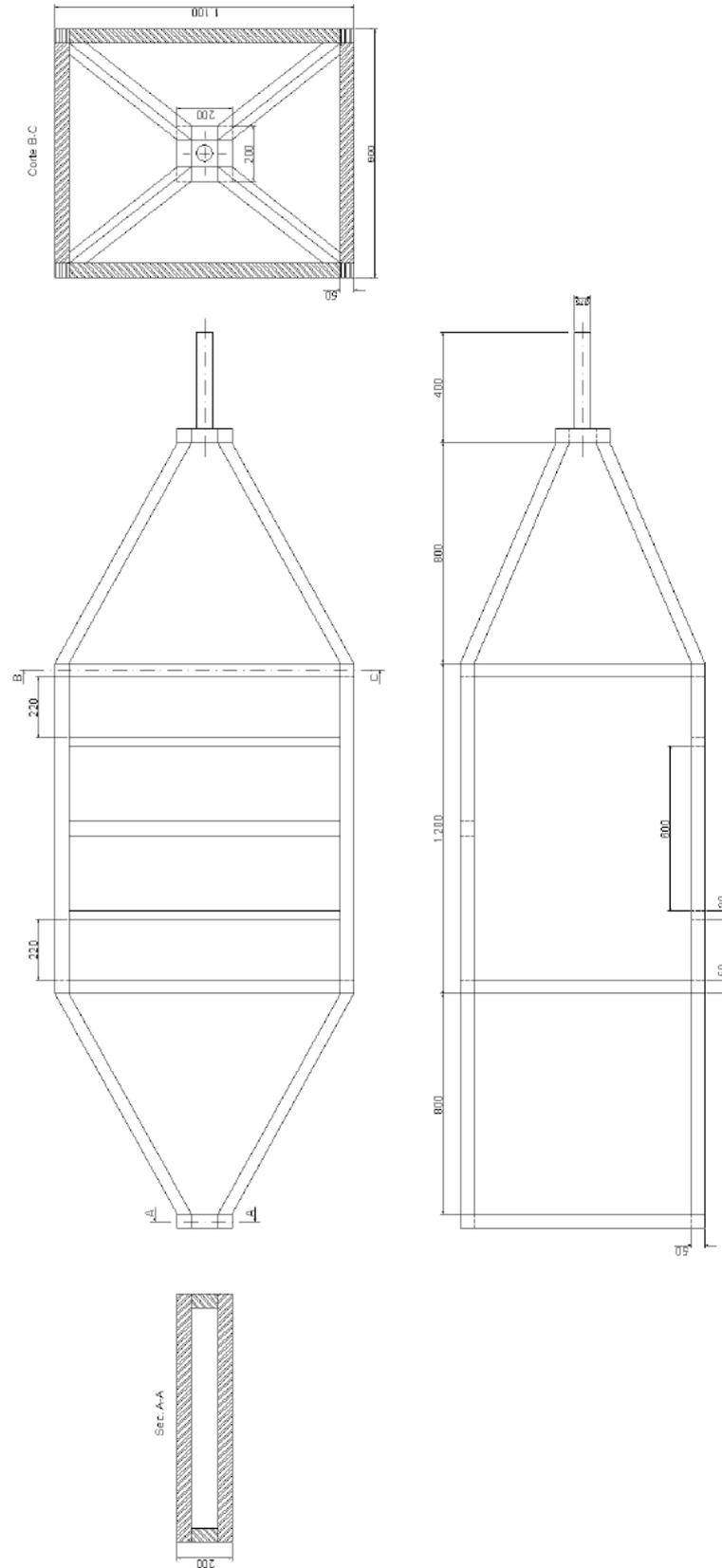
Fonte: Ferreira (2011).

Nesse secador, o escoamento de ar à temperatura ambiente penetra o equipamento através de um canal retangular. Ao atravessar o canal de entrada, o ar entra em contato com uma resistência elétrica e é aquecido até alcançar a temperatura previamente definida. Assim, o ar aquecido percorre as bandejas que contêm o material cuja umidade deve ser removida e deixa o secador através de um canal tubular telado sob a ação de um sistema de exaustão instalado na extremidade do secador.

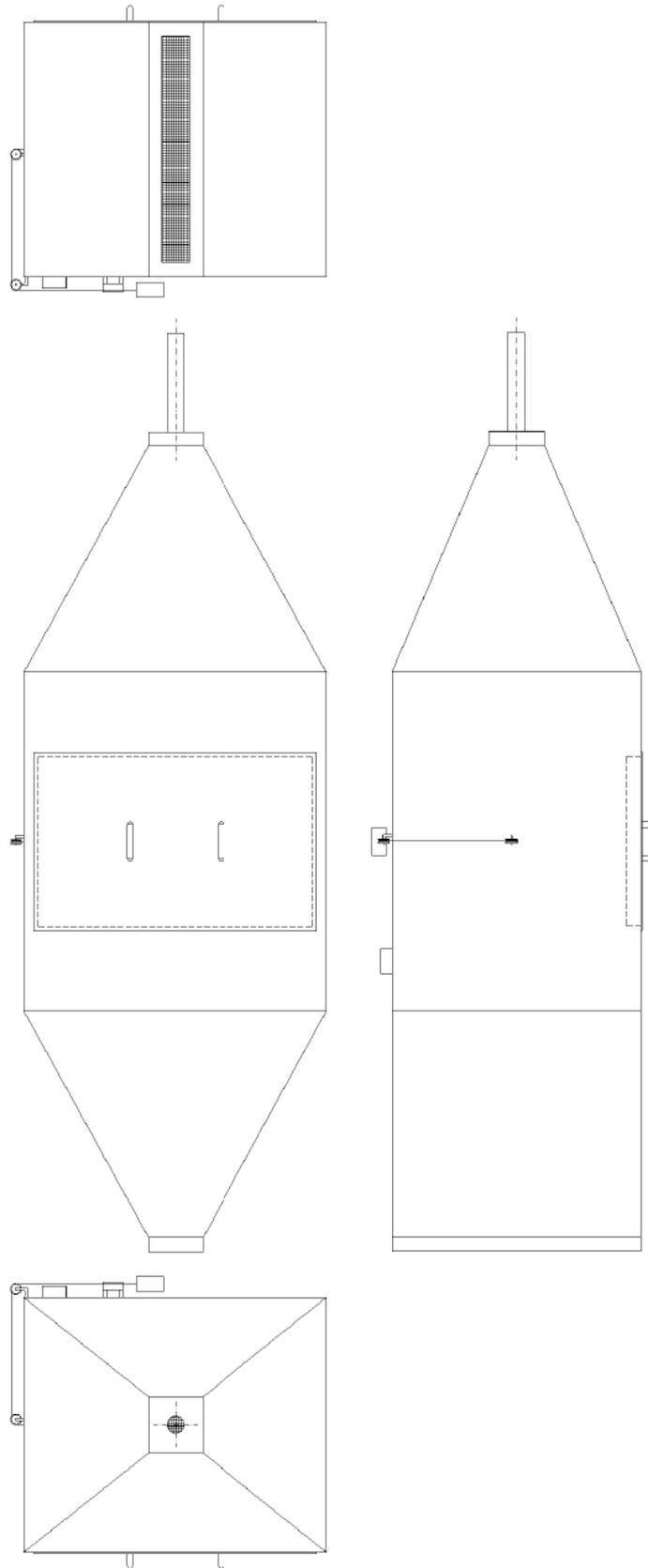
As bandejas de secagem são dispostas em uma estrutura em balanço, ligada a uma célula de carga por cabos de aço e polias. A célula de carga permite identificar quanto de massa de água foi removida do material a ser seco sem abrir a porta do secador. Isso possibilita redução da variação da temperatura e da energia consumida durante o processo.

A estrutura do secador (figura 2) é composta por madeira, o isolamento térmico das paredes do equipamento é realizado por lã de vidro. O secador é revestido interna e externamente por chapas de aço galvanizado conforme pode ser observado na figura 3. As chapas de aço revestem a estrutura para que a umidade contida no material a ser seco e no ar não comprometa a integridade física da madeira e para que não ocorra contaminação do produto a ser secado. Foi feita uma simulação para analisar as perdas térmicas da parede do secador com estrutura de madeira e de metalon a fim de comparar as perdas térmicas durante o processo de secagem quando o secador é estruturalmente composto por esses materiais.

Figura 2- Estrutura do secador proposto



Fonte: Ferreira (2011).

Figura 3 - Vista externa do secador

Fonte: Ferreira (2011).

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi realizar um estudo numérico sobre a influência de materiais construtivos nas perdas térmicas de um secador elétrico.

Foram objetivos específicos deste trabalho:

- Pesquisar as propriedades térmicas dos materiais envolvidos no estudo;
- Simular numericamente as perdas térmicas para cada material estudado, utilizando o software TransCal;
- Realizar a análise comparativa entre materiais utilizados.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Princípios físicos da secagem

A remoção de um fluido de um material sólido para uma fase gasosa não saturada utilizando mecanismos de vaporização térmica em temperaturas inferiores à temperatura de ebulição do fluido é denominada secagem. O teor de umidade do produto, a temperatura, a umidade relativa e a pressão de escoamento são variáveis essenciais no processo de secagem.

O processo de secagem envolve fenômenos de transferência de calor e de massa entre o produto a ser secado e o meio secante até que o sistema alcance o equilíbrio. Geralmente, o calor é transferido ao produto por convecção e essa energia contribui para impulsionar a movimentação da umidade no interior do sólido.

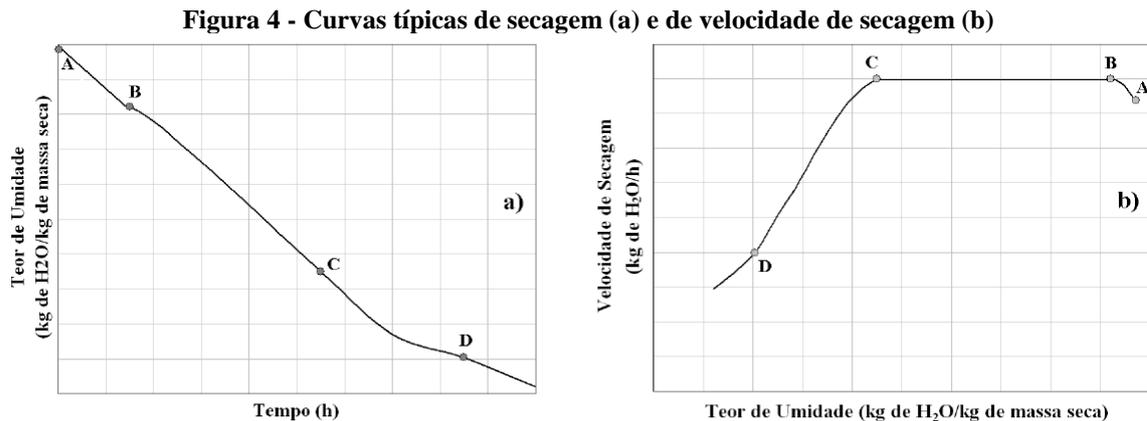
Na secagem, é estabelecido um contato entre a amostra e o meio secante e essa interação é responsável por ajustar a temperatura do sólido e a velocidade de secagem para que o sistema opere em regime permanente sendo que a temperatura do sólido molhado é a temperatura de bulbo-úmido do meio secante (FOUST et al., 1982).

Quando a temperatura do sólido se iguala à temperatura de bulbo-úmido do gás elas permanecem estáveis e inicia-se o período de secagem a taxa constante até que o sólido atinja o teor de umidade crítico. No início do processo de secagem, quando os sólidos relativamente homogêneos encontram-se com elevado teor de umidade, o fluido escoar do centro do sólido para sua superfície através de difusão sendo o que gradiente hidráulico obedece à Lei de Fick. O período de secagem a taxa constante tem como força motriz a diferença entre o teor de umidade inicial e o teor de umidade de equilíbrio sendo essa diferença conhecida por umidade livre. Assim, a redução da umidade relativa ou aumento da temperatura do ar resultam na redução do teor de umidade de equilíbrio, no aumento da umidade livre e, conseqüentemente, no aumento da velocidade do processo de secagem (AGUIRRE e GASPARINO FILHO, 1999).

Ao reduzir a umidade, os diâmetros dos poros e capilares contraem e, portanto, o volume do produto diminui. No decorrer do processo de secagem, a água líquida estabelece interações com as partículas sólidas do produto denominadas pontes líquidas sendo que essa água escoar por capilaridade e através de sucessivas condensações e evaporações. Dessa maneira, a

pressão parcial do vapor diminui e a taxa de contração do produto reduz até que o equilíbrio com o meio secante seja estabelecido.

O comportamento típico do processo de secagem de um material sólido através do escoamento de ar com temperatura e umidade controladas pode ser observado nas curvas da figura 4:



Fonte: Foust et al. (1982).

De acordo com Foust et al. (1982) o segmento AB das curvas da figura 4 representa o período do processo em regime não permanente correspondendo à fase de crescente velocidade de secagem. Em termos práticos, representa o aquecimento do material introduzido no secador em operação ou o aquecimento do secador com o material em seu interior. O trecho BC, período de taxa de secagem constante, caracteriza uma etapa do processo em que a velocidade de secagem não depende do teor de umidade do material já que a superfície exposta do sólido encontra-se saturada de líquido na forma de uma película contínua. O período de velocidade decrescente, segmento CD, indica que a velocidade do movimento do líquido do interior do material para sua superfície é inferior à velocidade de transferência da massa da superfície para o meio secante e, por esse motivo, a integridade do filme líquido na superfície do sólido é comprometida.

A existência e a duração dos trechos da curva do processo de secagem são influenciadas pelas condições termodinâmicas do escoamento (temperatura, umidade e pressão), pelo teor de umidade inicial, estrutura (cristalina ou porosa), tamanho e geometria do produto além da forma de distribuição do material no secador e dos parâmetros operacionais do equipamento.

3.2 Tipos de secadores

Os secadores podem ser classificados em função da maneira como o ar de secagem é aquecido podendo ser classificados como secadores solares, artificiais e secadores híbridos. Assim, quando a energia solar é utilizada para aquecimento do ar, o secador é denominado secador solar. Se a fonte de energia utilizada para o aquecimento não for solar, ou seja, for energia elétrica, fóssil entre outras formas energéticas, trata-se o equipamento por secador artificial. No entanto, é possível e interessante combinar a energia solar e a energia convencional para aquecer o ar de secagem caracterizando os secadores híbridos (EKECHUKWU et al., 1999).

3.2.1 *Secadores solares*

O método de secagem natural, largamente utilizado em regiões tropicais, promove a eliminação de umidade através da absorção de radiação solar incidente e pela ação do vento. Este antigo processo de secagem foi responsável por impulsionar o estudo e desenvolvimento dos secadores existentes atualmente, já que o produto seco naturalmente ficava exposto ao ambiente ocasionando perdas consideráveis ou redução da eficiência do processo.

A classificação dos secadores solares de acordo com a maneira de aquecimento e de utilização da energia solar foi proposta por Ekechukwu et al. (1999). Segundo essa classificação, um secador é considerado passivo se o escoamento de secagem ocorre por convecção natural enquanto o secador é classificado como ativo se o escoamento é provocado por convecção forçada. Os secadores passivos podem operar sem consumo de energia além da solar, porém a convecção natural é comprometida nos períodos em que há pouca ou nenhuma incidência de radiação solar. Por outro lado, os secadores solares ativos permitem a secagem mais homogênea do material através do controle da vazão e temperatura do meio secante.

Outra classificação divide os secadores em integrados, distribuídos e mistos. Nos secadores integrados a radiação solar incide diretamente sobre o material a ser secado já que a câmara de secagem e a região absorvedora localizam-se na mesma estrutura. Nos secadores distribuídos a câmara de secagem e a região de absorção são independentes e por esse motivo o material não recebe radiação diretamente sendo necessário a utilização de um dispositivo de secagem. Quando a câmara de secagem e a região absorvedora são independentes, porém

separadas por uma superfície translúcida, o material é submetido à radiação solar e por isso o secador é denominado misto (EKECHUKWU et al., 1999).

Os componentes principais de um secador solar industrial são a câmara de secagem e o coletor solar. No caso de secadores que utilizam o processo de convecção forçada, ventiladores para a circulação do ar no interior do secador é um componente fundamental (MORAIS-DUZAT *et al.*, 2003).

Vários estudos têm sido realizados sobre secadores solares para diversos tipos de alimentos. A avaliação de desempenho de um secador de duplo passe também chamado de secador solar do tipo indireto de convecção forçada, na região central do Vietnã, para a secagem de pimenta vermelha foi proposta por Banout et al. (2011). Neste estudo, foi comparado o protótipo com um secador solar do tipo cabine típico com a secagem natural sendo que o teor de umidade final em base úmida desejado para pimenta vermelha é de 10%. Para atingir este teor desejado o secador de duplo passe necessitou de 32 horas, o secador cabine gastou 73 horas e a secagem natural não atingiu o objetivo mesmo após 93 horas de ensaio. A eficiência de secagem global para o secador duplo passe foi de 24,04%, para o secador cabine foi de 11,52% e para a secagem natural que só alcançou 15% de teor de umidade final foi de 8,03%. O custo da secagem por quilo de pimenta vermelha foi 39% maior no secador cabine se compararmos com o secador duplo passe. Este resultado indica que o secador duplo passe é uma técnica adequada e economicamente viável para a secagem de pimenta vermelha na região central do Vietnã (BANOUT et al., 2011).

Segundo projeto desenvolvido por Ong (1999), na região Ásia-Pacífico, o método tradicional de secagem é o solar ao ar livre o qual apresenta muitas desvantagens de contaminação do produto, sendo que a secagem solar mecânica (usando convecção natural ou de circulação forçada) poderia minimizar tais desvantagens. No estudo, o autor priorizou três tipos de secadores solares: o secador solar do tipo cabine de convecção natural, secador solar indireto de circulação forçada e o secador solar do tipo estufa e constatou que o secador solar do tipo cabine possui custo relativamente baixo em termos de construção e operação, porém o seu desempenho é limitado. Já o secador solar do tipo indireto de convecção forçada tem projetos variados, além de seu desempenho ser maior do que o secador solar do tipo cabine. O secador solar do tipo estufa é um secador direto simples que possui potencial de secagem de alto desempenho mesmo em produtos volumosos, que não precisam ser removidos frequentemente durante o processo de secagem.

O desempenho experimental e numérico de um secador solar do tipo estufa ventilado para a secagem de banana sem casca, com estrutura do telhado no formato parabólico foi avaliado por Janjai et al. (2009). Neste estudo a temperatura do ar de secagem variou entre 30 a 60°C e o tempo de secagem foi de 4 dias. Sob condições similares, a secagem solar natural necessita de 5 a 6 dias para alcançar os resultados esperados. O secador proposto resultou numa considerável redução do tempo de secagem em comparação com a secagem ao ar livre e o produto seco apresentou alta qualidade além de este tipo de secador poder ser utilizado em áreas rurais já que não necessita de redes de eletricidade.

Gbaha et al. (2007) projetou um secador solar simples com convecção natural de fluxo de calor para a secagem de gêneros alimentícios como mandioca e banana que pode ser fabricado pelos agricultores a partir de madeira, placa de vidro e metal. Este tipo de secador é de fácil utilização e seu custo é moderado. O secador reduziu o teor de umidade da mandioca e da banana doce em aproximadamente 80% num período de 19 e 22 horas, respectivamente, para alcançar um valor limite de 13%, o que possibilita conservação destes produtos em, aproximadamente, 1 ano sem deterioração.

3.2.2 Secadores artificiais

Os secadores artificiais podem ser classificados em adiabáticos ou de transferência de calor por superfície sólida. Nos secadores adiabáticos o processo de secagem ocorre através do escoamento de ar aquecido enquanto nos secadores de transferência de calor por superfície sólida ocorre secagem a vácuo (GAVA, 1998). A Tabela 1 contém as principais classificações dos secadores artificiais.

Tabela 1- Classificação dos secadores artificiais

Secador	Tipo	Princípio de funcionamento
Adiabático	Cabine	Câmara contendo bandejas de secagem sendo que o ar quente movimenta-se entre as bandejas secando o material contido nessas bandejas.
	Túnel	Túneis longos com vagões e transportadores, onde são dispostos os produtos de maneira que o escoamento de ar quente passe sobre o produto.
	Atomizador	Líquido ou pasta do produto é pulverizado no interior da câmara, trocando calor e massa com escoamento de ar quente.
	Leito Fluidizado	Material a ser secado é disposto em esteira perfurada e o escoamento de ar quente é forçado através da esteira e do produto.
	Fornos secadores	Ar aquecido em um forno passa pelo produto removendo umidade por convecção.
Superfície sólida	Tambor	Um ou mais tambores rotativos aquecidos internamente são parcialmente mergulhados no produto líquido ou em pasta. Sob atmosfera de baixa pressão, o produto perde umidade sobre o cilindro aquecido. Então, o material é raspado por lâmina e direcionado para uma câmara.

Fonte: Ferreira, (2011).

Apresentam-se na tabela 2 as características de alguns secadores existentes e observa-se que os secadores de maior consumo de energia são o a vácuo e congelamento enquanto os secadores de menor consumo são os de bandeja e tambor. Quanto à eficiência, o secador de tambor é o mais eficiente seguido pelo de bandeja.

Tabela 2 - Características de secadores selecionados.

Tipo	Capacidade de evaporação (kg água/m²h)	Consumo de energia (kJ/kg água)	Eficiência térmica (%)	Tempo de residência (s, min, h)
Bandeja ou Cabine	0,1-1	3000-4500	50-80	2-24 h
Túnel ou transporte	5-18	4000-6000	35-60	10-180 min
Rotativo	30-120 ^a	3500-6000	40-70	10-60 min
Leito fluidizado	30-90	3100-6000	40-80	5-30 min
Pneumático	10-100 ^a	3500-5000	50-75	2-15 s
Pulverizador	1-30 ^a	4000-5000	50-60	5-120 s
Tambor	4-30	3000-3500	70-85	10-30 s
Vácuo e Congelamento	1-7	>7500	-	1-24 h

Fonte: Crapiste et al. (1997).

3.2.2.1 Secador de cabine

Os secadores de cabine são comumente utilizados para desidratar alimentos. Gouveia et al. (2001) realizou um estudo que tinha por objetivo estudar a cinética de desidratação do feijão preto utilizando secador de cabine (figura 5) que opera com 1000 kg de frutas frescas e produzem 200 kg de frutas desidratadas. Esse secador possibilita a movimentação periódica das bandejas o que reduz o tempo gasto para que a secagem seja concluída.

Figura 5 - Secador de bandejas



Fonte: Gouveia (2001).

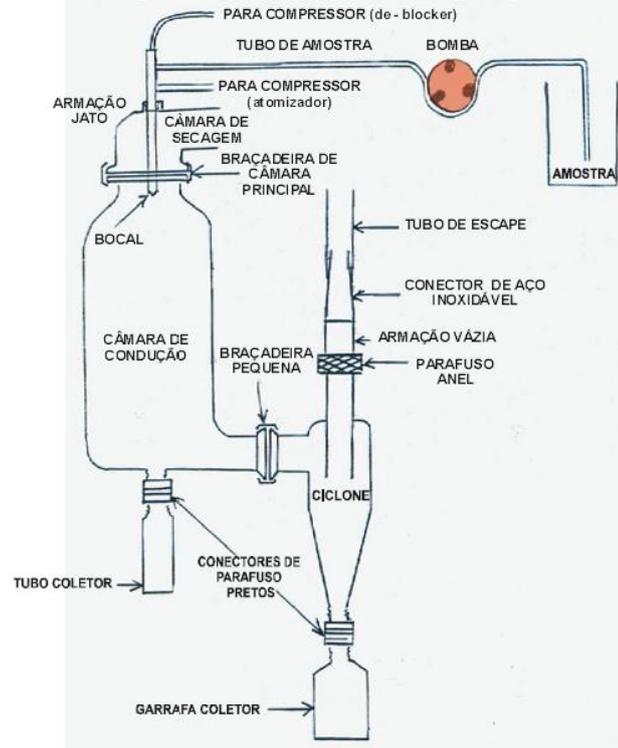
No secador de cabine, a transferência de calor se dá por convecção forçada de ar quente. O equipamento é composto pela câmara que contem as bandejas e por outro compartimento onde se localiza o sistema de aquecimento a gás, ventilação e exaustão. Em secadores desse tipo, deve ser determinado o tamanho, configuração e distancia entre as bandejas de forma que possibilite a circulação de ar com maior eficiência.

Jesus et al. (2005) avaliaram os diferentes genótipos de banana-passa sendo que para que seu objetivo fosse alcançado foi necessário desidratar as frutas utilizando um secador de cabine com circulação forçada de ar. O ar que circulou entre as bandejas estava à temperatura igual a 67°C e as frutas permaneceram com 20±1% de umidade final sendo que a perda de umidade ocorrida já foi suficiente para reduzir o volume do produto e aumentar sua durabilidade.

3.2.2.2 *Secadores por atomização*

Os secadores por atomização possuem grande aplicação na secagem de soluções, emulsões, polpas e pastas no processamento de alimentos (MARSTERS, 1996). No estudo desenvolvido por Valduga et al. (2003) foram extraídos solúveis da erva-mate que foram posteriormente secos em um secador por atomização representado na figura 6. Essa secagem ocorreu mantendo a pressão constante e aumentando a temperatura de secagem a cada 15 minutos. Equipamentos dessa natureza podem ter a temperatura do ar de secagem, a pressão regulada de ar para atomização e vazão da bomba que alimenta o material.

Figura 6 - Esquema da instalação de secagem por atomização



Fonte: Vaduga (2003).

3.2.2.3 Secadores de túnel e de transporte

Os secadores de túnel e de transporte são usados para desidratar produtos alimentícios. Nestes secadores, matéria-prima é espalhada num leito fixo e a passagem do ar aquecido é responsável por secar a matéria-prima. No secador do tipo túnel, o material é carregado em bandejas empilhadas em carrinhos móveis que são transportados através do cilindro, sendo esta operação descontínua ou semi-contínua. Em um secador do tipo transporte o material é transportado lentamente no interior do secador em placas perfuradas ou telas de aço inoxidável. Nos dois tipos de secador o fluxo pode ser corrente ou em contracorrente (CRAPISTE et al., 1997).

3.2.2.4 Secador de tambor rotativo

O secador de tambor rotativo é constituído por um cilindro horizontal alongado de baixa rotação que possui pás longitudinais em toda a sua extensão, sendo esse inclinado para que o material seja deslocado por gravidade ao ser seco. Neste secador as pás são diferenciais, pois

fazem com que o material seja deslocado lentamente do interior do equipamento em contato perfeito com o ar aquecido que circula em contracorrente (COSTA, 2007). Este modelo de secador é adequado para produtos que tendem a ficar juntos, porém ele pode causar danos certos produtos pelo impacto e abrasão no tambor. Tipicamente, este secador possui de 0,5 a 3 metros de diâmetro e 5 a 10 vezes o diâmetro no comprimento sendo que a velocidade de rotação de 0,25 a 0,4 m/s, tamanho da partícula na faixa de 100 a 200 μm e velocidade do ar em torno de 0,5 a 2,5 m/s (CRAPISTE et al., 1997).

3.2.2.5 Secadores pneumáticos

Secadores pneumáticos ou flash utilizam material na forma de pó ou partícula que é seco num duto vertical através de uma corrente de ar aquecido. Estes secadores conseguem atingir altas temperaturas aumentando a taxa de evaporação e, conseqüentemente, reduzindo o tempo de secagem. O tamanho das partículas varia de 1 a 2 mm, a velocidade do ar está na faixa de 10 a 30 m/s, as dimensões do secador variam de 0,6 a 1,1 m de diâmetro e de 12 a 30m de comprimento (CRAPISTE et al., 1997).

3.2.2.6 Secadores pulverizadores

Os secadores pulverizadores utilizam um material que pode ser bombeado como soluções e suspensões finas. O produto desta pulverização é obtido na forma de pequenas gotas. Estes secadores são relativamente grandes e pouco eficientes na utilização de energia. O funcionamento do equipamento consiste em injetar ar num filtro de ar e, posteriormente, num aquecedor sendo que o ar entra no topo da câmara de secagem em corrente paralela com as gotículas atomizadas a serem secas, neste momento a umidade evapora rapidamente no gás quente e deixa o material sólido (normalmente pó), de modo que a secagem seja basicamente instantânea. Um sistema de secagem, deste tipo, dispõe de um sistema injetor de carga e atomizador, sistema de produção e de injeção de gás quente, câmara de secagem, sistema de separação sólido-gás e sistema de descarga do produto. O formato deste secador pode variar bastante dependendo do produto e do tipo de instalação sendo que este secador é utilizado na secagem de café, leite, sangue, amido, entre outros. (FOUST et al., 1982).

3.2.3 Secadores híbridos

Os secadores híbridos combinam duas ou mais tecnologias convencionais de secagem (CHUA et al., 2005). As tecnologias de secagem híbrida podem ser a de secagem combinada, secagem em múltiplos estágios e secagem em múltiplos processos. O desenvolvimento de novas tecnologias de secagem híbrida tem sido incentivado com o objetivo de melhorar a qualidade dos produtos, reduzir custos com energia e diminuir o impacto ambiental (CHOU et al., 2001).

Amer et al. (2010) avaliaram um projeto e desenvolveram um novo secador solar híbrido para banana madura, utilizando a energia solar direta e um trocador de calor. Em dias ensolarados o secador operou como um secador solar e em dias frios e à noite o secador operou como secador híbrido, através do estoque de energia solar num tanque de água. A capacidade de carga deste secador é de 30 a 32 kg de produto fresco. O teor de umidade inicial do produto foi medido pela secagem num forno a vácuo, numa temperatura de 70°C, até que o peso seco da amostra tornou-se estável. Encontrou-se um teor de umidade inicial de 75 a 82% e teor de umidade final de 18%. Ao estocar calor é possível prosseguir o processo de secagem em condições de clima adverso, porém é necessário utilizar grandes estruturas de estocagem de calor, além de programas, o que eleva os custos do projeto (AMER et al., 2010).

3.3 Parâmetros operacionais dos secadores

Os parâmetros operacionais relevantes no processo de secagem são as características do ar secante (temperatura, umidade e taxa de fluxo), características do produto (teor de umidade inicial e desejável, tamanho e estrutura) e as variáveis dimensionais do secador (LEON et al., 2002).

Segundo Leon et al. (2002) os parâmetros avaliados para a construção de secadores incluem características físicas, desempenho térmico, qualidade do produto seco e custo do secador tempo de retorno do investimento. Entre as características físicas que devem ser estudadas encontram-se o tipo, tamanho e forma do secador além da área da bandeja quando esta existir já que esses fatores influenciam a capacidade de carga do equipamento. O desempenho térmico é determinado através da taxa de secagem de um material sendo influenciado pela temperatura, umidade e taxa de fluxo de ar.

Uma desvantagem dos secadores solares é que há interrupções no processo de secagem nos períodos sem radiação solar quando os equipamentos não possuem armazenador de calor. No caso dos secadores que possuem esse armazenador, é possível manter o funcionamento contínuo mesmo que em menor escala nos períodos em que não há radiação solar.

3.4 Rendimento térmico de um secador

O rendimento térmico de um secador é dado em função de diversos parâmetros como o tempo de secagem, as dimensões e teor de umidade do produto no início e fim do processo, temperatura, umidade relativa e vazão do ar de secagem, aumento da temperatura do processo em relação à temperatura ambiente, condições climáticas e eficiência do secador.

O tempo de secagem merece destaque entre os fatores citados acima já que o rendimento térmico do equipamento é influenciado pelo tempo necessário para que o produto perca a umidade inicial. No caso de secador solar, é importante ressaltar que o tempo em que a radiação solar é indisponível é considerado ao contabilizar o tempo de secagem.

Ao elevar a temperatura do processo, a velocidade de secagem aumenta, pois a capacidade de escoamento de secagem e a temperatura do produto aumentam acelerando o processo de migração de umidade do interior para a superfície do produto e conseqüentemente reduzindo o tempo de secagem. Porém é necessário ponderar se a temperatura de operação não irá comprometer a qualidade do produto seco, no caso de alimentos essa elevação na temperatura pode causar perda de nutrientes, cor, aroma e sabor.

A vazão do escoamento secante também influencia o rendimento do processo. Vazões elevadas reduzem as perdas de calor através de radiação e condução já que as temperaturas do escoamento e da placa absorvedora são reduzidas, entretanto, esse fato pode aumentar o tempo de secagem. Vazões abaixo do recomendado elevam o tempo de secagem já que, neste caso, a remoção de umidade é lenta devido à saturação do escoamento de ar de secagem. Assim, o ideal é combinar vazões elevadas no início do processo de secagem, pois há mais umidade para ser removida e vazão baixa no fim do processo sendo que a temperatura pode ser elevada se necessário para efetuar a remoção de umidade. Além disso, em secadores grandes torna-se pertinente constatar se o tempo de secagem é o mesmo em diferentes

posições das telas de secagem para que essas telas sejam dispostas na configuração mais eficiente para o processo.

Segundo Leon et al. (2002), a eficiência térmica de um secador (η) é dada pela razão entre o calor absorvido pelo escoamento de ar de secagem (Q_{esc}) do secador vazio e a energia gasta pelo equipamento (E) durante 24 horas. Assim, a eficiência térmica é definida pela equação 1:

$$\eta = \frac{\int_{0h}^{24h} Q_{esc} dt}{\int_{0h}^{24h} E dt} \quad (1)$$

3.5 Propriedades térmicas de materiais construtivos de secadores

Os materiais usualmente utilizados na confecção do secador estudado são, basicamente, aço galvanizado, lã de vidro, madeira e perfis de metalon.

A estrutura do equipamento será confeccionada por madeira leve e resistente ou por perfis de metalon. A caixeta é uma madeira clara, com baixa densidade, boa trabalhabilidade, estável e com elevada resistência mecânica. Como a estrutura de madeira é capaz de absorver umidade, a caixeta deve ser impermeabilizada utilizando-se um produto à base de piche denominado Neutrol (Ferreira, 2011). Perfis de metalon são confeccionados por um material de baixa densidade em relação a outros metais, rígido e galvanizado. Então, caso essa estrutura seja de metalon, essa impermeabilização não é necessária, pois este material é resistente à umidade e à corrosão (Catálogo de produtos: TUBONASA).

Em ambas as situações, as paredes do equipamento são construídas utilizando-se aço galvanizado já que esse material possui elevada resistência à corrosão o que reduz as possibilidades de oxidação.

O isolamento térmico das paredes do equipamento é realizado com a utilização de lã de vidro que é instalada entre as chapas de aço galvanizado. Esse material apresenta baixa condutividade térmica e elétrica, sendo um tradicional isolante térmico. A lã de vidro é produzida a partir de sílica e sódio, aglomerados por resinas sintéticas, desenvolvidas especificamente para melhorar o isolamento térmico e acústico de construções. Esse material é comercializado com diferentes densidades, em rolos e em painéis de forma que se adequam

a diferentes situações. É um material de fácil manuseio, incombustível, que não ataca as superfícies com as quais entra em contato, não favorece a proliferação de fungos e bactérias, não deteriora e sua capacidade isolante não reduz com o tempo além de possuir alta flexibilidade, resistência à tração, flexão e impacto (Catálogo de produtos: Metálica).

Apresenta-se na tabela 3 as propriedades térmicas dos materiais construtivos utilizados para a realização desse trabalho à temperatura de 300K.

Tabela 3 - Propriedades térmicas dos materiais utilizados na confecção do secador

Material	ρ Kg/m³	C_p (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^7$ (Pa.s)	k (W/m.K)
Ar	1,1614	1,007	184,6	0,0263
Aço galvanizado	7860	490	–	52,9
Lã de vidro	32	835	–	0,038
Madeira	720	1255	–	0,16
Metalon	7874	445	–	80

Fonte: Produzido pela autora.

3.6 Modelagem da condução bidimensional em paredes compostas

A transferência de calor por condução ocorre quando se forma um gradiente de temperatura ao longo de um meio. Para determinar a distribuição de temperatura no interior de um corpo utilizam-se equações que descrevem a variação da temperatura em função da posição e do tempo. Tais equações são desenvolvidas através do estudo do balanço energético de um elemento infinitesimal de volume no interior de um meio sem movimento macroscópico.

No balanço de energia em um material isotrópico são consideradas as transferências de calor nas três direções ortogonais sendo que a taxa de acúmulo de energia é dada pelo somatório das taxas de energia de entrada, de saída e gerada.

O fluxo de calor é calculado através da Lei de Fourier (INCROPERA et al., 2011):

$$\vec{Q} = -k\vec{\nabla}T = -k\left(\frac{\partial T}{\partial x}\hat{i} + \frac{\partial T}{\partial y}\hat{j} + \frac{\partial T}{\partial z}\hat{k}\right) \quad (2)$$

onde:

- q'' é o fluxo de calor (W/m^2);
- k é a condutividade térmica ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$); e
- ∇T é o gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ou K/m).

A forma geral da equação da difusão do calor é o instrumento básico para a análise dos fenômenos de condução de calor e é dada pela equação 3 (SESHADRI et al, 2010):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

onde:

- $\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)$ está relacionado ao fluxo líquido de condução de calor para o volume de controle;
- \dot{q} é a taxa da energia térmica gerada por unidade de volume do meio (W/m^3);
- ρ é a densidade do meio;
- c_p é o calor específico do meio a pressão constante;
- $\frac{\partial T}{\partial t}$ é a variação da temperatura com o tempo.

Analisando a equação da difusão do calor percebe-se que a conservação da energia se dá de tal forma que em qualquer ponto do meio a taxa líquida de fluxo de calor por condução em um volume unitário mais a energia térmica gerada deve ser igual à variação da energia térmica que se acumula no volume estudado.

Em algumas situações, quando a condutividade térmica dos materiais são constantes a equação pode ser manipulada algebricamente resultando na equação 4 (SESHADRI et al., 2010):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

sendo que $\rho c_p / k$ é a difusividade térmica do material (α).

No caso estudado, não há geração de energia térmica na parede do secador, a condução se processa apenas em duas direções e, considerando que o sistema opera em regime

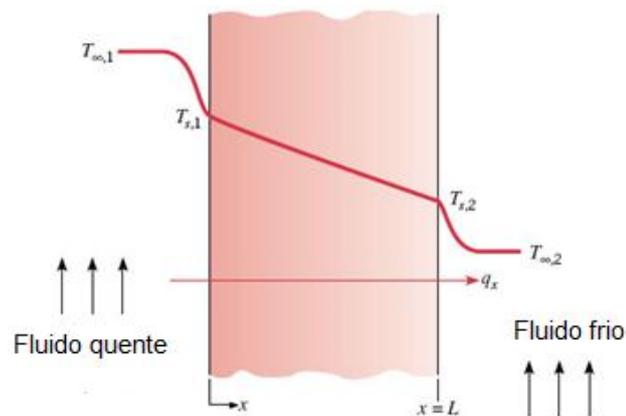
permanente, não há variação da energia térmica acumulada, portanto a equação 4 pode ser reduzida a:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (5)$$

A distribuição de temperaturas em uma parede plana, em alguns casos, pode ser simplificada através da resolução da equação da difusão do calor apenas para a direção x considerando que a transferência de calor ocorre em regime estacionário e que na parede estudada não há regiões com geração ou sumidouros de energia.

A figura 7 exemplifica como ocorre a transferência de calor unidimensional em uma parede plana que separa dois fluidos que estão em diferentes temperaturas. Nessa situação, inicialmente há transferência por convecção do fluido a $T_{\infty,1}$ para a superfície $T_{s,1}$, por condução ao longo da espessura da parede plana e por convecção entre a superfície a $T_{s,2}$ para o fluido a $T_{\infty,2}$.

Figura 7 - Transferência de calor através de uma parede plana



Fonte: Incropera et al. (2011).

Ao considerar que a condutividade térmica do material que compõe a parede for constante, o termo equação da difusão do calor que corresponde à condução na direção x pode ser integrado duas vezes de forma que se obtém a seguinte solução geral (INCROPERA et al, 2011):

$$T(x) = C_1 x + C_2 \quad (6)$$

Assim, para resolver a equação 3.6 é necessário analisar as condições de contorno para $x = 0$ e $x = L$. Na figura 5, tais condições são:

$$T(0) = T_{s,1} \quad \text{e} \quad T(L) = T_{s,2} \quad (7)$$

Assim, a distribuição de temperaturas nesse caso é dada pela equação 3.8 (INCROPERA et al, 2011):

$$T(x) = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1} \quad (8)$$

Esse resultado mostra que a variação da temperatura ocorre de forma linear em situações cuja condução em uma parede plana é unidimensional, em regime estacionário, sem geração de energia e com condutividade térmica constante.

A partir da Lei de Fourier, é possível determinar a taxa de transferência de calor por condução (q_x). Assim, segundo Incropera em 2011:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L} (T_{s,1} - T_{s,2}) \quad (9)$$

Sendo que A é a área normal à transferência de calor. Portanto, em paredes planas a área é constante independente de x . Isso permite concluir que o fluxo de calor (q_x) é dado por (INCROPERA et al, 2011):

$$q_x = \frac{q_x}{A} = \frac{k}{L} (T_{s,1} - T_{s,2}) \quad (10)$$

Assim, analisando as equações que descrevem a taxa de transferência de calor (equação 9) e o fluxo de calor (equação 10) nota-se que ambos os parâmetros não dependem de x .

Utilizando a analogia de circuitos elétricos a circuitos térmicos, a fim de facilitar o entendimento de situações onde a transferência de calor unidimensional, considerando que não há geração de energia e que as propriedades dos materiais são constantes, foi desenvolvida uma analogia entre difusão de calor e carga elétrica utilizando a Lei de Ohm. Como a resistência é definida como a razão entre o potencial da força motriz e a taxa de

transferência de calor. A resistência térmica para condução ($R_{t,cond}$) para parede plana é (INCROPERA et al., 2011):

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (11)$$

Da mesma forma, a partir da Lei do resfriamento de Newton (INCROPERA, 2011):

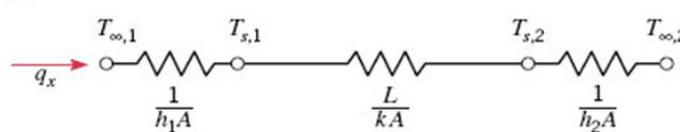
$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (12)$$

Pode-se determinar a resistência térmica para a convecção que é igual a (INCROPERA et al., 2011):

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \quad (13)$$

Para facilitar o estudo de caso, podem ser elaborados circuitos térmicos como o da figura 8.

Figura 8 - Circuito térmico equivalente

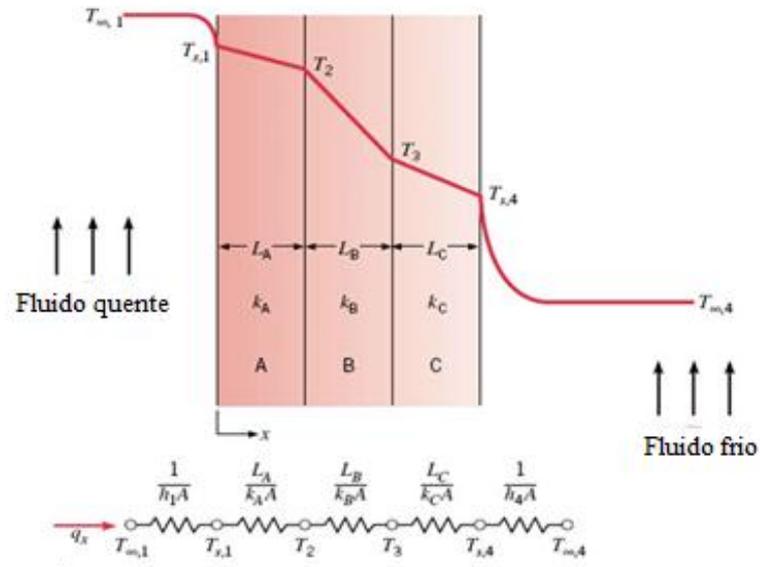


Fonte: Incropera et al. (2011).

No entanto, é importante destacar que a taxa de transferência de calor pode ser determinada através da análise de apenas um elemento da malha que compõe o circuito já que esse parâmetro é constante ao longo do corpo estudado.

No caso de sistemas mais complexos, como paredes compostas, é possível determinar a taxa de transferência de calor por condução através do estudo de um circuito térmico equivalente. As paredes podem apresentar configuração em séries (figura 9) e nesse caso, a taxa de transferência de calor unidimensional se dá através da razão entre a variação global de temperatura e a resistência térmica total ou através da razão entre a variação da temperatura e da resistência térmica de um único componente.

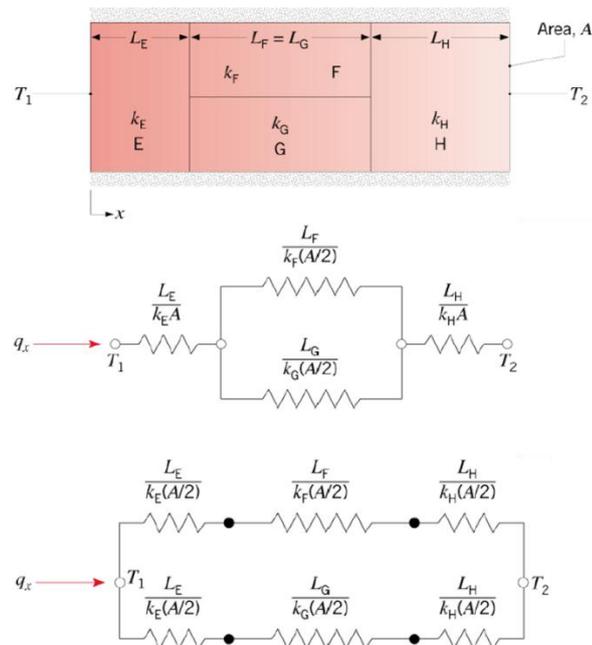
Figura 9 - Circuito térmico equivalente para uma parede composta em série



Fonte: Incropera et al. (2011).

Para paredes compostas similares ao representado na figura 10, a transferência de calor torna-se bidimensional. Entretanto dois circuitos térmicos simplificados podem ser utilizados para estimar a transferência de calor conforme a figura 10.

Figura 10 - Circuito térmico equivalente para uma parede composta série-paralela



Fonte: Incropera et al. (2011).

No entanto, é importante ressaltar que nesses casos são consideradas apenas transferências de calor unidimensional e por isso esse método apresenta erros que podem ser significativos. Dessa forma, torna-se necessário estudar como se processa a transferência de calor bidimensional.

No entanto, em alguns casos é conveniente realizar uma abordagem bidimensional ou tridimensional. Diante dessas situações, a determinação o perfil de temperaturas é realizada através da solução analítica ou numérica das equações diferenciais que regem a transferência de calor. Como a obtenção dessas soluções é complicada para situações que não envolvem condições de contorno simples e materiais com propriedades constantes, torna-se interessante utilizar métodos numéricos para resolver tais equações.

A técnica numérica discutida neste trabalho é denominada Volumes Finitos e sua utilização envolve a discretização do domínio a ser estudado, obtenção e resolução de um sistema linear com as equações da conservação de energia para cada elemento de volume em função das temperaturas nos mesmos.

3.7 Modelagem da convecção interna e externa

A transferência de calor por convecção é definida como a de energia no interior de um fluido devido à combinação entre condução e o escoamento do fluido sendo que esse movimento por ocorrer devido ao movimento molecular aleatório (difusão) ou através do movimento macroscópico do fluido que é associado ao número de moléculas que está se movendo coletivamente. Se no sistema em que essa movimentação ocorre há um gradiente de temperatura, o movimento molecular contribui para a transferência de calor.

O fluxo de calor por convecção é definida através da Lei do resfriamento de Newton cuja forma é (INCROPERA et al., 2011):

$$q'' = h(T_{sup} - T_{\infty}) \quad (14)$$

onde h ($W/m^2.K$) é o coeficiente de transferência de calor por convecção, T_{sup} é a superficial e T_{∞} é a temperatura do fluido.

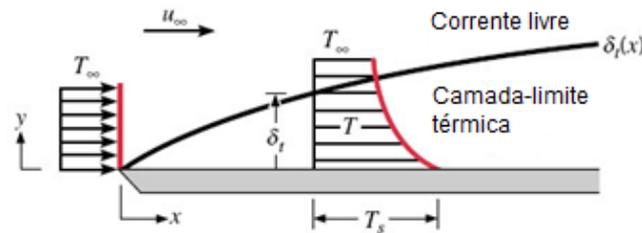
Ao estudar a convecção tem por objetivo determinar qual o coeficiente da transferência de calor sendo que essa constante varia em função das condições da camada limite. Essas condições, por sua vez, são influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do escoamento do fluido e pelas propriedades termodinâmicas e de transporte de fluido.

Em algumas situações onde toda a superfície deve ser considerada, torna-se necessário definir o coeficiente médio de transferência de calor (\bar{h}) que é definido como (INCROPERA et.al, 2011):

$$\bar{h} = \frac{1}{A_{sup}} \int_{A_{sup}} h dA_{sup} \quad (15)$$

Sempre que existem diferenças de temperatura entre o fluido na corrente livre e a superfície, forma-se uma camada limite térmica como no exemplo da figura 11. Assim, considera-se que o fluido distante da superfície possui temperatura igual a T_∞ . As partículas próximas à superfície entram em equilíbrio térmico com a superfície e essas partículas trocam calor com as partículas adjacentes a essas formando um gradiente de temperatura no fluido.

Figura 11 - Desenvolvimento da camada-limite térmica sobre uma placa plana isotérmica



Fonte: Incropera et al. (2011).

A espessura (δ) da camada limite é definida como o valor de y onde a razão abaixo (INCROPERA et al, 2011) é verdadeira.

$$\frac{T_{sup} - T}{T_{sup} - T_\infty} = 0,99 \quad (16)$$

Para possibilitar o entendimento da transferência por convecção, torna-se necessário definir o número de Reynolds e o número de Prandtl.

O número de Reynolds (Re_D) representa a razão entre a força de inércia que atua no fluido e sua força viscosa e é dado por (INCROPERA et al., 2011):

$$Re_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} \quad (17)$$

sendo que u_m é a velocidade média do fluido sobre a seção reta do tubo, ρ é a densidade do fluido, μ é a viscosidade do fluido e D é o diâmetro do tubo.

O número de Prandtl (Pr) é a razão entre a difusividade de momento e a difusividade térmica sendo definido por (INCROPERA et al., 2011):

$$Pr = \frac{c_P \mu}{k} \quad (18)$$

No caso de escoamentos internos, utiliza-se a temperatura média (T_m) ao invés de utilizar a temperatura na corrente livre no cálculo do fluxo térmico. Assim a equação da Lei do resfriamento de Newton é escrita como (INCROPERA et al., 2011):

$$q''_{sup} = h(T_{sup} - T_m) \quad (19)$$

Nessa situação, a temperatura na corrente livre é considerada constante no sentido do escoamento do fluido e T_m nesse sentido o que significa que dT_m/dx nunca é igual a zero e que quando a superfície se processa da superfície para o fluido, o valor de T_m aumenta com x .

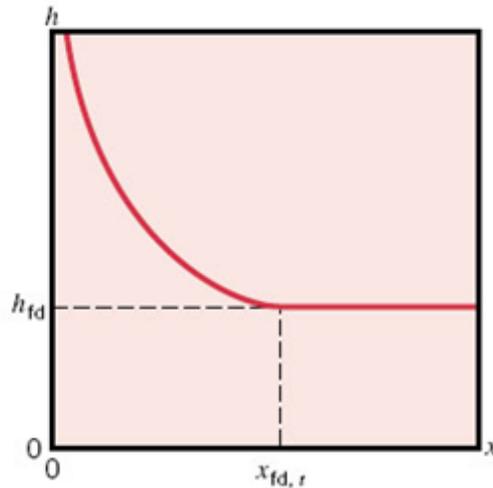
Para tornar possível o entendimento de como se processa a transferência de calor por convecção interna, é relevante que para um sistema ser termicamente completamente desenvolvido a equação 20 deve ser obedecida (INCROPERA et al., 2011).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_{sup(x)} - T(r, x)}{T_{sup(x)} - T_m(x)} \right]_{cd,t} = 0 \quad (20)$$

A condição exigida pela equação 20 é alcançada em escoamentos cujo fluxo de calor na superfície ou a temperatura na superfície são uniformes. Essa não é válida na região de entrada, onde h varia com x como é observado na figura 12. Como a espessura da camada limite térmica é nula na região de entrada do tubo, o coeficiente convectivo nessa região é

grande, porém, a medida que a camada limite térmica se forma, h diminui rapidamente tornando-se constante quando a camada limite está completamente desenvolvida.

Figura 12 - Variação do coeficiente de transferência convectiva de calor no escoamento dentro de tubos



Fonte: Incropera et al. (2011).

Como em dutos, o escoamento está completamente confinado, é possível determinar a temperatura média $T_m(x)$ e a maneira que a transferência de calor convectiva relaciona-se através da diferença entre as temperaturas de entrada e saída do duto. Essa determinação pode ser feita fazendo um balanço de energia do sistema onde se conclui que para todo duto a equação 21 é válida (INCROPERA et al., 2011).

$$q_{conv} = \dot{m}c_p(T_{m,o} - T_{m,i}) \quad (21)$$

Onde q_{conv} é a taxa total de transferência de calor no tubo e os índices i e o estão relacionados à entrada e saída do tubo, respectivamente.

Para escoamento laminar completamente desenvolvido em tubos circulares, com fluxo de calor constante na superfície, o número de Nusselt é constante e independente de Re_D , Pr e da localização axial. Assim, o número de Nusselt é dado pela expressão 22 (INCROPERA et al., 2011).

$$Nu_D \equiv \frac{h \cdot D}{k} = 4,36 \quad (22)$$

Em condições completamente desenvolvidas e com temperatura superficial constante, o número de Nusselt é representado na equação 23 (INCROPERA et al., 2011):

$$Nu_D \equiv \frac{h \cdot D}{k} = 3,66 \quad (23)$$

A hipótese mais simples para se solucionar a equação de energia na entrada de todos considera que as condições térmicas se desenvolvem na presença de um perfil de velocidades completamente desenvolvido. Em situações em que a temperatura superficial é constante, Nu_D é expresso pela equação 24 (INCROPERA et al., 2011).

Onde:

$$\bar{Nu}_D \equiv \bar{h}D/k. \quad (24)$$

Como esse resultado aceita um comprimento de entrada térmica, ele não é aplicável geralmente. Assim, utiliza-se o resultado obtido quando a entrada é combinada, ou seja, quando há desenvolvimento simultâneo dos perfis de temperaturas e velocidades conforme a equação 25 (INCROPERA et al., 2011):

$$\bar{Nu}_D = 1,86 \left(\frac{Re_D Pr}{L/D} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (25)$$

Sendo que para utilizar a equação 3.25, as seguintes condições devem ser obedecidas:

- temperatura superficial deve ser constante;
- $0,48 < Pr < 16.700$;
- $0,0044 < \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right) < 9,75$.

Para se determinar o número de Nusselt em um escoamento turbulento completamente desenvolvido hidrodinâmica e termicamente ($L/D > 60$) é comum utilizar a equação de Dittus-Boelter (equação 26), conforme Incropera et al. (2011):

$$\bar{Nu}_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n \quad (26)$$

onde:

- $n=0,4$ no aquecimento ($T_s > T_m$) e $n=0,3$ no resfriamento ($T_s < T_m$);
- $0,7 \leq Pr \leq 160$;
- $Re_D \geq 10.000$.

Como em escoamentos turbulentos possuem comprimento de entrada curto ($L/D < 60$) é razoável admitir que o número de Nusselt médio (\overline{Nu}_D) é igual ao número de Nusselt da região completamente desenvolvida (Nu_D). No entanto, em tubos curtos, o número de Nusselt médio será maior que o número de Nusselt da região completamente desenvolvida e pode ser expresso por (INCROPERA et al., 2011):

$$\frac{\overline{Nu}_D}{Nu_D} = 1 + \frac{C}{(x/D)^m} \quad (27)$$

Onde C e m dependem da natureza da entrada, dos números de Reynolds e Prandtl.

No secador estudado há o escoamento de ar aquecido internamente através de tubos de seção retangular, porém para uma primeira aproximação das características da transferência de calor há ferramentas para analisar situações que envolvem dutos com seção reta circular. Assim, é necessário determinar o diâmetro efetivo como comprimento característico. Segundo Incropera et al. (2011), tal diâmetro é conhecido como diâmetro hidráulico e é definido por:

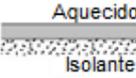
$$D_h = \frac{4A_{sr}}{P} \quad (28)$$

Onde A_{sr} é a área de seção reta no escoamento e P é o perímetro.

Então, ao calcular Re_D e Nu_D deve-se utilizar o diâmetro hidráulico.

A tabela 4 foi elaborada baseada na resolução das equações que regem a transferência de calor convectiva com escoamento laminar e fornece o número de Nusselt para regiões onde o escoamento é completamente desenvolvido.

Tabela 4 - Números de Nusselt no escoamento laminar completamente desenvolvido em tubos de diversas seções

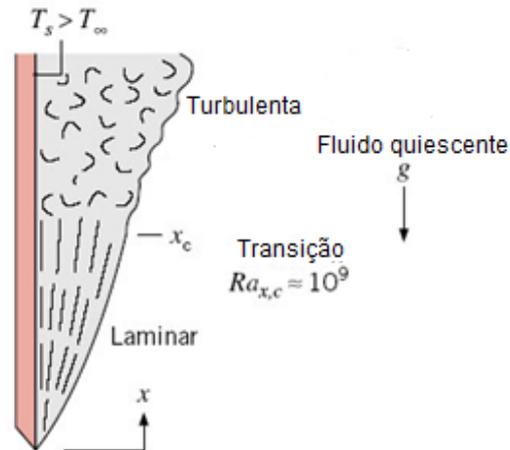
Seção reta	b/a	q_s^* uniforme	T_s uniforme	$f Re_{D_h}$
	—	4.36	3.66	64
	1.0	3.61	2.98	57
	1.43	3.73	3.08	59
	2.0	4.12	3.39	62
	3.0	4.79	3.96	69
	4.0	5.33	4.44	73
	8.0	6.49	5.60	82
	∞	8.23	7.54	96
 Aquecido Isolante	∞	5.39	4.86	96
	—	3.11	2.49	53

Fonte: Incropera et al. (2011).

No processo de transferência de calor por convecção natural, o fluido movimenta-se devido às forças de empuxo em seu interior. O empuxo, por sua vez, é devido à presença de um gradiente de massa específica no fluido e de uma força de corpo que é proporcional à massa específica.

Em algumas situações, instabilidades termodinâmicas podem surgir, pode haver distúrbios no escoamento que, se ampliados, causam a transição de escoamento laminar para turbulento. Uma representação esquemática desse fenômeno encontra-se na figura 13. A transição na camada limite de convecção é influenciada pelas forças de empuxo e viscosas sendo que é comum expressar o resultado em número de Rayleigh que é o produto nos números de Grashof e Prandtl.

Figura 13 - Transição da camada limite na convecção livre sobre placa vertical



Fonte: Incropera et al. (2011).

No caso de placas verticais, o número de Rayleigh é dado por (INCROPERA et al., 2011):

$$Ra_{x,c} = Gr_{x,c} Pr = \frac{(g\beta T_s - T_\infty)x^3}{v\alpha} \approx 10^9 \quad (29)$$

Algumas correlações empíricas foram desenvolvidas para facilitar o estudo da maior parte dos casos de escoamento externo. O número de Nusselt tem a seguinte forma (INCROPERA et al., 2011):

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} C Ra_L^n \quad (30)$$

Quando se trata de placas verticais aquecidas ou resfriadas em relação a um fluido, a placa é alinhada com o vetor gravitacional e por esse motivo, a força de empuxo atua apenas para induzir a movimentação ascendente ou descendente do fluido. No caso de escoamentos laminares em placa vertical, uma precisão maior nos cálculos pode ser alcançada utilizando a equação a seguir (INCROPERA et al., 2011):

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,670 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (31)$$

Se o número de Rayleigh for grande, o lado direito da equação apresenta a mesma forma da equação 3.31 uma vez que apenas a constante C é substituída pela função Pr. Se o número de

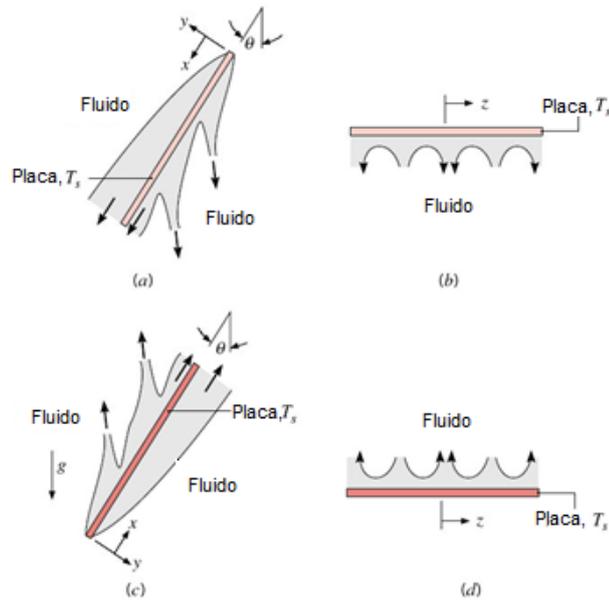
Rayleigh for muito pequeno, a primeira parcela do lado direito da equação 31 exerce maior influência e, então, a hipótese de camada-limite torna-se inválida e a condução paralela a placa é relevante.

Esses resultados foram obtidos para placas isotérmicas, porém se o fluxo térmico na superfície for constante a diferença entre as temperaturas ($T_s - T_\infty$) varia com x e aumenta a partir de um valor igual a zero na aresta frontal.

No caso de placas inclinadas em relação à força gravitacional, há força de empuxo possui uma componente normal e uma componente paralela à superfície. Essa decomposição da força de empuxo que atua no fluido faz com que sua intensidade seja menor reduzindo a velocidade ao longo da placa e, portanto, reduzindo a transferência de calor por convecção.

Ao analisar a figura 14 (a), percebe-se que se a placa estiver resfriada, a componente y da força de empuxo (normal à placa) mantém o escoamento descendente na camada-limite em contato com a região superior da placa. Como a componente x da aceleração da gravidade é igual a $g \cdot \cos\theta$, a velocidade de fluido e , conseqüentemente, a transferência de calor por convecção são reduzidas na superfície superior da placa. Na superfície inferior da placa, a componente y da força de empuxo afasta o fluido da superfície interrompendo o desenvolvimento da camada limite através do descarregamento de fluido frio de regiões próximas à superfície. Dessa forma, o escoamento resultante é tridimensional (na direção z) e, conforme pode ser observado na figura 14 (b), o fluido frio da superfície inferior da placa é frequentemente substituído pelo fluido ambiente que é mais quente. Esse mecanismo reduz a espessura da camada-limite térmica para aumentar a transferência de calor por convecção na superfície inferior das placas inclinadas. No caso de placas aquecidas, 14 (c) e 14 (d), a tendência da movimentação do fluido é similar de forma que o escoamento tridimensional ocorre na superfície superior que é a região a partir da qual o fluido aquecido é descarregado.

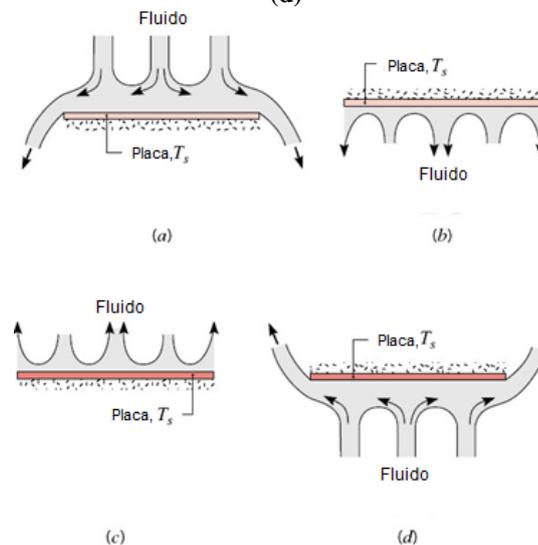
Figura 14 - Escoamentos movidos pelo empuxo em placas inclinadas



Fonte: Incropera et.al. (2011).

Em placas horizontais, a força de empuxo é normal à superfície e o comportamento do fluido pode ser analisado através da figura 15 (a) e (d). Em superfícies frias voltadas para cima e superfícies aquecidas voltadas para baixo, a placa impede o movimento descendente e ascendente que o fluido tende a realizar e por esse motivo, a troca de calor convectiva não é efetiva. No caso de superfície fria voltada para baixo e superfície aquecida voltada para cima (figuras 15 (b) e (c)) o escoamento é movido por porções de fluido descendentes e ascendentes, respectivamente e, dessa forma, há transferência de calor mais efetiva.

Figura 15 - Escoamentos movidos pelo empuxo em placas horizontais frias (a) e (b) e placas quentes (c) e (d)



Fonte: Incropera et al. (2011).

4 METODOLOGIA

4.1 Estudo de casos

A simulação da perda de energia no secador com diferentes materiais construtivos foi realizada utilizando o software TransCal. A simulação da transferência de calor será realizada em apenas uma região da porta do secador e será a referência para estimar a perda térmica total no equipamento.

A geometria seção reta da parede do secador, local onde foi feita a simulação de condução bidimensional, é retangular sendo que ela é composta por chapa de aço galvanizado na região mais externa, lã de vidro como isolante térmico e estrutura de caixeta ou metalon.

Assim, foi realizada uma comparação entre as perdas térmicas do secador cuja geometria é descrita anteriormente quando sua estrutura é composta por caixeta e por metalon. Sendo que essa simulação teve como resultados gráficos e tabelas que fornecem informações sobre o processo de transferência de calor no equipamento de secagem estudado.

4.2 TransCal

A simulação numérica do comportamento e transferências de calor no secador elétrico estudado é realizada através de um software chamado TransCal. Esse software foi desenvolvido em C++ utilizando as bibliotecas do Windows com o objetivo de promover o avanço do conhecimento de estudantes sobre os processos de transferência de calor por condução bidimensional. O software foi desenvolvido pelo Laboratório de Simulação numérica em Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor (SINMEC) que pertence a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e como o objetivo principal de seus criadores é auxiliar no processo de aprendizado o software é de utilização livre e o download da ferramenta pode ser realizado através do site do SINMEC.

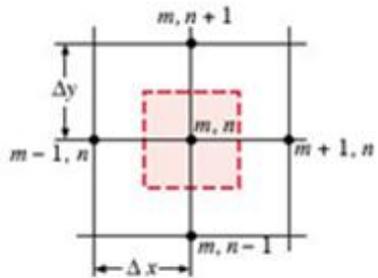
O programa é capaz de resolver problemas de condução de calor bidimensionais em regime permanente ou transiente, com ou sem geração de calor nos domínios do estudo. O software, de interface amigável, gera como resultados um mapa térmico que indica como seria a

distribuição das temperaturas ao longo do corpo estudado e uma tabela com os dados da transferência de calor.

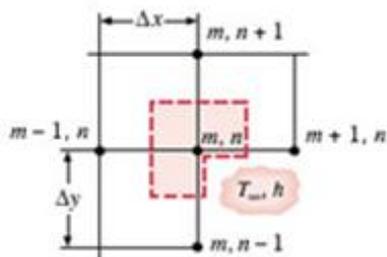
4.3 Metodologia de solução

A técnica de discretização estudada é utilizada, principalmente, no caso de problemas com geometrias simples e consiste em traçar linhas paralelas ao contorno do domínio onde há transferência de calor nas duas direções ortogonais sendo que os interseção são denominados *nós*. Nas regiões onde se espera maior gradiente de temperatura pode-se utilizar espaços menores entre as linhas paralelas para obter maior precisão no perfil de temperaturas ao longo do corpo estudado. Após essa etapa, são feitas linhas tracejadas no meio das linhas feitas anteriormente de forma que as linhas tracejadas estabelecerão os limites de cada elemento de volume como pode ser observado na figura 16. Através da figura também é possível perceber que existem trem tipos de elementos de volume que são os do interior do domínio, da face lateral e da quina.

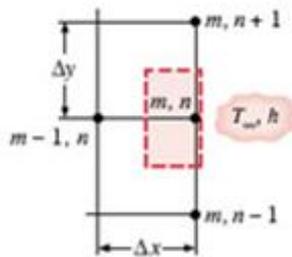
Figura 16 - Domínio bidimensional discretizado com a delimitação dos elementos de volume



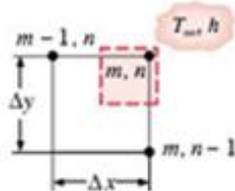
Caso 1: Ponto nodal interior



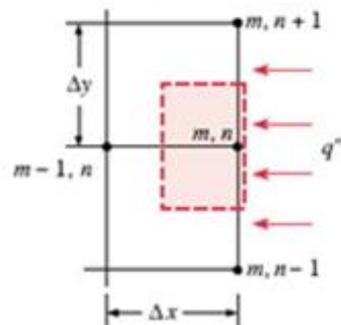
Caso 2: Ponto nodal em um vértice interno com convecção



Caso 3: Ponto nodal em uma superfície plana com convecção



Caso 4: Ponto nodal em um vértice externo com convecção



Caso 5: Ponto nodal em uma superfície plana com fluxo térmico uniforme

Fonte: Incropera et.al. (2011).

No caso da utilização de soluções numéricas para resolução das equações, a temperatura nos nós representará a temperatura nos elementos de volume. Sendo assim, a solução numérica é

obtida através da análise de um número finito de pontos enquanto a solução analítica resulta em uma função matemática que descreve a distribuição de temperatura e por isso permite a determinação da temperatura em qualquer ponto da região estudada.

Para se obter as equações do balanço de energia para elementos de volume nas diferentes posições, será considerado que os contornos do domínio trocam calor com um fluido a uma temperatura T_∞ e com coeficiente de transferência de calor por convecção (h). Além disso, será considerado que a transferência se dá de maneira estacionária e sem geração de calor.

Primeiramente, será realizado o estudo de um elemento de volume no interior do domínio e para isso será considerado que o domínio possui dimensão unitária na direção perpendicular ao papel.

Considerando que a variação de temperatura entre dois elementos de volume vizinhos é linear, o fluxo de calor entre esses elementos é expresso por (SESHADRI et al., 2010):

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = -k \frac{T_{1,j} - T_{i-1,j}}{\Delta x} = k \frac{T_{i-1,j} - T_{i,j}}{\Delta x} \quad (32)$$

Assim, a taxa de entrada de energia é descrita por (SESHADRI et al., 2010):

- direção x:

$$\Delta y \cdot 1 \cdot k \frac{T_{i-1,j} - T_{1,j}}{\Delta x} \quad (33)$$

- direção y:

$$\Delta x \cdot 1 \cdot k \frac{T_{i,j-1} - T_{1,j}}{\Delta y} \quad (34)$$

E a taxa de saída de energia é definida por (SESHADRI et al., 2010):

- direção x:

$$\Delta y \cdot 1 \cdot k \frac{T_{i,j} - T_{i+1,j}}{\Delta x} \quad (35)$$

- direção y:

$$\Delta x. 1. k \frac{T_{i,j} - T_{i,j+1}}{\Delta y} \quad (36)$$

Logo, tem-se que a equação do balando de energia é igual a (SESHADRI et al., 2010):

$$\begin{aligned} \Delta y. 1. k \frac{T_{i-1,j} - T_{1,j}}{\Delta x} + \Delta x. 1. k \frac{T_{i,j-1} - T_{1,j}}{\Delta y} - \Delta y. 1. k \frac{T_{i,j} - T_{1+1,j}}{\Delta x} \\ - \Delta x. 1. k \frac{T_{i,j} - T_{i,j+1}}{\Delta y} = 0 \end{aligned} \quad (37)$$

Lembrando que $\Delta x.1$ e $\Delta y.1$ são áreas perpendiculares às direções em que ocorre a troca de calor e que a condutividade térmica (k) pode assumir valores distintos em cada face se essa grandeza for uma função da temperatura.

No caso de elementos de volumes nas faces laterais do domínio a taxa de entrada de energia é definida por (SESHADRI et al., 2010):

- direção x:

$$\Delta y. 1. k \frac{T_{i-1,j} - T_{1,j}}{\Delta x} \quad (38)$$

- direção y:

$$\frac{\Delta x}{2}. 1. k \frac{T_{i,j-1} - T_{i,j}}{\Delta y} \quad (39)$$

E a de saída, por:

- direção x:

$$\Delta y. 1. h (T_{i,j} - T_{\infty}) \quad (40)$$

- direção y:

$$\frac{\Delta x}{2}. 1. k \frac{T_{i,j} - T_{i,j+1}}{\Delta y} \quad (41)$$

Portanto, a equação do balanço de energia é (SESHADRI et al., 2010):

$$\begin{aligned} \Delta y \cdot 1 \cdot k \frac{T_{i-1,j} - T_{1,j}}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{2} \cdot 1 \cdot k \frac{T_{i,j-1} - T_{1,j}}{\Delta y} - \Delta y \cdot 1 \cdot k (T_{i,j} - T_{\infty}) \\ - \frac{\Delta x}{2} \cdot 1 \cdot k \frac{T_{i,j} - T_{i,j+1}}{\Delta y} = 0 \end{aligned} \quad (42)$$

Quando k é constante e uniforme na região estudada e $\Delta x = \Delta y$, a equação acima pode ser simplificada (SESHADRI et al., 2010):

$$2 \frac{\Delta x h}{k} T_{\infty} + 2T_{i-1,j} + T_{i,j-1} + T_{i,j+1} = \left(2 \frac{\Delta x h}{k} + 4 \right) T_{i,j} = 0 \quad (43)$$

Sendo que $\frac{\Delta x h}{k}$ é o número de Biot (Bi) que é um adimensional de grande importância no estudo das transferências de calor principalmente em regimes transientes. Nesses casos, se o número de Biot for inferior a 0,1 considera-se que a o corpo troca calor isotermicamente, ou seja, os gradientes de temperaturas são desprezíveis. Por outro lado, se o número de Biot aumenta, os gradientes de temperatura tornam-se significativos.

No caso de elementos de volumes localizados em quinas, assumindo-se as mesmas considerações discutidas acima, as equações que definem a taxa de entrada de energia são expressas por (SESHADRI et al., 2010):

- direção x:

$$\Delta y \cdot 1 \cdot k \frac{T_{i-1,j} - T_{1,j}}{\Delta x} \quad (44)$$

- direção y:

$$\Delta x \cdot 1 \cdot k \frac{T_{i,j-1} - T_{1,j}}{\Delta y} \quad (45)$$

e as que definem a taxa de saída de energia são:

- direção x:

$$\Delta y \cdot 1 \cdot h (T_{i,j} - T_{\infty}) \quad (46)$$

- direção y:

$$\Delta x \cdot 1 \cdot h(T_{i,j} - T_{\infty}) \quad (47)$$

Dessa forma, tem-se que o balanço energético de um elemento de volume em quinas é dado por (SESHADRI et al., 2010):

$$\Delta y \cdot 1 \cdot k \frac{T_{i-1,j} - T_{1,j}}{\Delta x} + \Delta x \cdot 1 \cdot k \frac{T_{i-1,j} - T_{1,j}}{\Delta y} - \Delta y \cdot 1 \cdot h(T_{i,j} - T_{\infty}) - \Delta x \cdot 1 \cdot h(T_{i,j} - T_{\infty}) \quad (48)$$

Simplificando a equação acima, obtém-se:

$$T_{i-1,j} + T_{i,j-1} - \left(2 + 2 \frac{\Delta x h}{k}\right) T_{i,j} + 2 \frac{\Delta x h}{k} T_{\infty} = 0 \quad (49)$$

Como é observado, as equações da conservação de energia para os elementos de volume são equações lineares cujas variáveis são as temperaturas dos elementos vizinhos ao elemento de volume estudado. Portanto, para determinar as temperaturas envolvidas é necessário resolver o sistema linear composto pelas equações do balanço de energia.

4.4 Validação do método

Com o objetivo de validar a metodologia numérica adotada neste trabalho são apresentadas as soluções analítica e numérica correspondente à taxa de transferência de calor e fluxo de transferência de calor através de dois estudos de casos.

4.4.1 Estudo de caso 1

O primeiro caso estudado trata-se da transferência de calor em uma parede de tijolos com 25 cm de espessura, 3m de altura e 5 m de comprimento. Foi considerado que a temperatura da face interna interna é 25°C, que a temperatura da face externa é -10°C e que a condutividade térmica do tijolo é igual a 0,72 W/(m.K).

4.4.1.1 Solução analítica

Sabe-se que o fluxo de transferência de calor é dado por:

$$q_x'' = k \frac{dT}{dx}$$

Então:

$$q_x'' = k \frac{\Delta T}{x} = 0,72 \frac{W}{m} \cdot K \times \frac{25^\circ C - (-10^\circ C)}{0,25m} = 100,80 \text{ w/m}^2$$

A taxa de taxa de transferência de calor é dada por:

$$q_x = q_x'' \times A$$

Então:

$$q_x = 100,80 \frac{W}{m^2} \times 5m \times 3m = 1.512,0 W$$

4.4.1.2 Solução numérica

A solução numérica foi realizada através do TransCal utilizando coordenadas cartesianas, sendo que os números de volumes na direção i é igual a 20, e na direção j, é igual a 30. A temperatura inicial foi definida em 10°C e as condições de contorno foram definidas da seguinte forma:

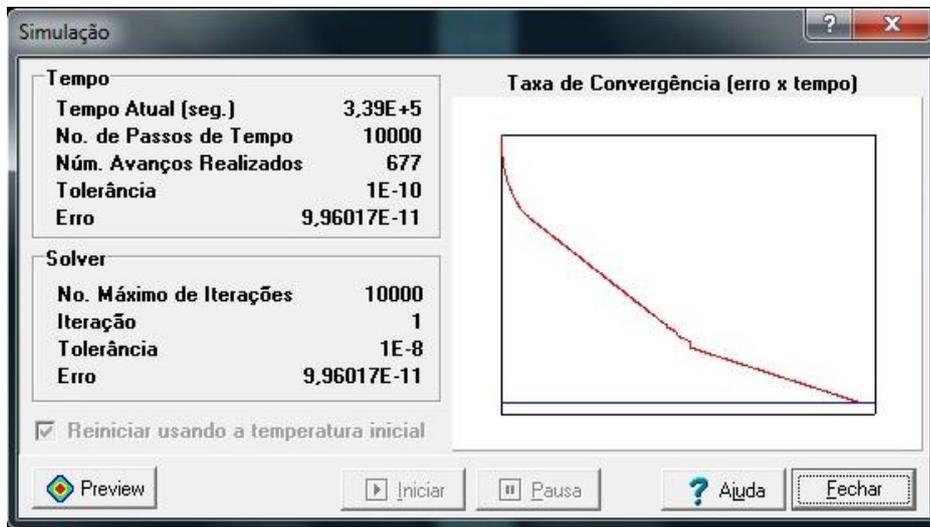
- Fluxo de transferência de calor no norte igual a 0;
- Fluxo de transferência de calor no norte igual a 0;
- Temperatura leste = -10°C;
- Temperatura oeste = 25°C.

Os parâmetros em relação ao tempo e à solução utilizados na simulação numérica foram:

- Avanço no tempo igual a 500 segundos;
- Número de avanço igual a 10.000;
- Tolerância admitida foi de 10^{-10} ;
- Número de iterações igual a 10.000;
- Tolerância do solver igual a 10^{-8} .

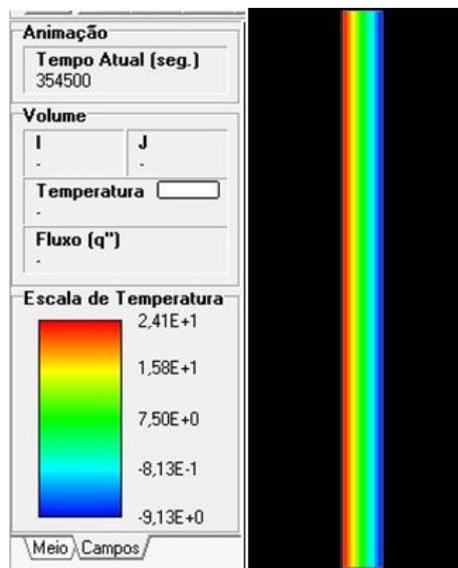
Os resultados obtidos através da simulação, a curva que apresenta a taxa de convergência a distribuição térmica encontram-se nas figuras 17 e 18.

Figura 17 - Taxa de convergência para o Estudo de caso 1



Fonte: Simulação no software TransCal (Realizado pela autora)

Figura 18 - Distribuição térmica no Estudo de caso 1



Fonte: Simulação no software TransCal (Realizado pela autora)

Analisando os resultados obtidos através da simulação observa-se que a soma do fluxo por unidade de comprimento é igual 302,40 W/m conforme Apêndice A. Assim o fluxo da transferência de calor pode ser obtido conforme a equação a seguir:

$$q_x'' = \frac{q'}{H} = \frac{302,4 \text{ W/m}}{3\text{m}} = 100,8\text{W/m}^2$$

A taxa de transferência de calor pode ser calculada segundo a equação a seguir, validando a metodologia numérica com a solução analítica:?

$$q = q' \times L = 302,4 \text{ W/m} \times 5 \text{ m} = 1.512,0 \text{ W}$$

4.4.2 Estudo de caso 2

Este estudo de caso tem o objetivo comparar a solução analítica para materiais compostos. Para isso, será avaliada a taxa de transferência de calor unidimensional por uma viga de madeira de dimensões 5 cm x 5 cm x 1 cm isolada termicamente na superfície inferior e superior e com temperaturas externa e interna do secador iguais a 20°C e 75C respectivamente. Em seguida, será apresentada a solução analítica aproximada para um perfil de metalon de mesmas dimensões externas e de espessura de parede igual a 1 mm sendo que o interior da estrutura é preenchido com ar.

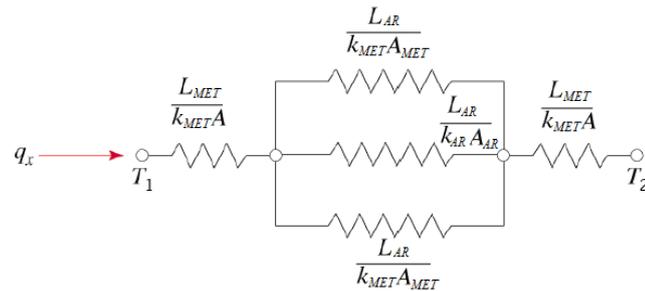
Solução analítica

A taxa de transferência de calor para o secador construído utilizando-se madeira é dada por:

$$q_x = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} = 0,15 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \times 0,05\text{m}^2 \frac{(75 - 20)^\circ \text{C}}{0,05\text{m}} = 8,25\text{W}$$

A transferência de calor bidimensional pode ser estudada através de dois circuitos térmicos unidimensionais apresentados na figuras 19 (supondo seções transversais isotérmicas) e 20 (supondo seções longitudinais adiabáticas).

Figura 19 - Circuito térmico da estrutura de metalon, supondo seções transversais isotérmicas



Fonte: Incropera et al. (2011).

Neste caso, a taxa de transferência de calor é dada por:

$$R_t = 2 \times \frac{L_M}{K_M A} + \left[\left(\frac{L_{Ar}}{K_{Ar} A_{Ar}} \right)^{-1} + 2 \times \left(\frac{L_{Ar}}{K_M A_M} \right)^{-1} \right]$$

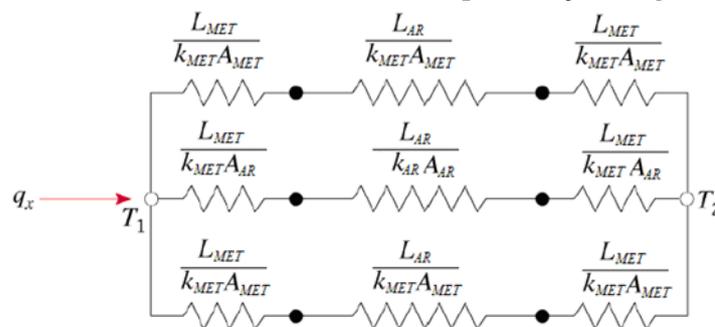
$$A = 0,05m^2; A_{Ar} = 0,048m^2; A_M = 0,001m^2$$

$$R_t = 2 \times \frac{0,001 \text{ m}}{80 \frac{W}{mK} 0,05m^2} + \left[\left(\frac{0,048 \text{ m}}{0,026 \frac{W}{mK} 0,048m^2} \right)^{-1} + 2 \times \left(\frac{0,048 \text{ m}}{80 \frac{W}{mK} 0,001m^2} \right)^{-1} \right]^{-1}$$

$$R_t = 0,2982 \text{ K/W}$$

$$q_x = \frac{75^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{0,2982 \text{ K/W}} = 184,44 \text{ W}$$

Figura 20- Sistema térmico da estrutura de metalon, supondo seções longitudinais adiabáticas



Fonte: Incropera et al. (2011).

Dessa forma, a taxa de transferência de calor pode ser calculada da seguinte maneira:

$$R_t = \left[\left(2 \times \frac{L_M}{k_M A_{AR}} + \frac{L_{AR}}{k_{AR} A_{AR}} \right)^{-1} + 2 \times \left(2 \times \frac{L_M}{k_M A_M} + \frac{L_{AR}}{k_M A_M} \right)^{-1} \right]^{-1}$$

$$R_t = \left[\left(2 \times \frac{0,001}{80 \times 0,048} + \frac{0,048}{0,026 \times 0,048} \right)^{-1} + 2 \times \left(2 \times \frac{0,001}{80 \times 0,001} + \frac{0,048}{80 \times 0,001} \right)^{-1} \right]^{-1}$$

$$R_t = 0,30998 \text{ K/W}$$

$$q_x = \frac{75 - 20}{0,30998} = 177,43 \text{ W}$$

Comparando-se as duas soluções analíticas aproximadas, pode ser observado que a solução exata está entre 177,43 W e 184,44 W.

4.4.2.1 Solução numérica

A solução numérica foi realizada utilizando a geometria cartesiana sendo que o número de volumes na direção i é igual a 20 e na direção j é igual a 40 para a estrutura construída com madeira enquanto para a estrutura construída com metalon o número de volumes na direção i é igual a 10 e na direção j é igual a 50.

A temperatura inicial foi definida em 10°C e as condições de contorno foram definidos da seguinte forma:

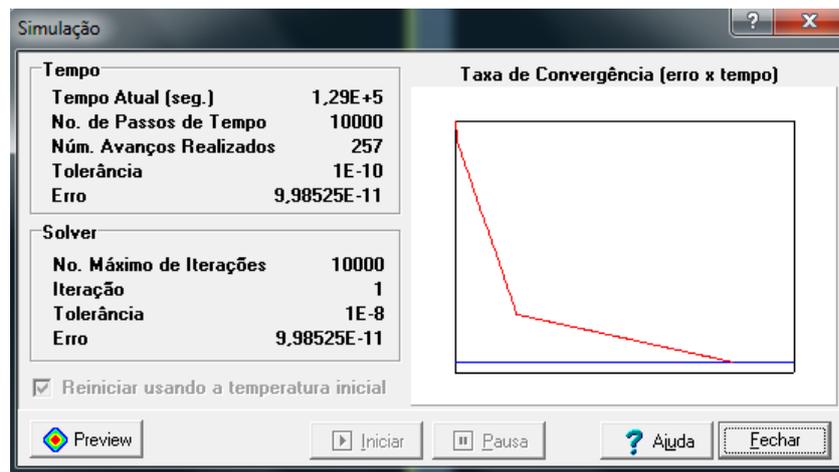
- Fluxo de transferência de calor no norte igual a 0;
- Fluxo de transferência de calor no norte igual a 0;
- Temperatura leste = 20°C;
- Temperatura oeste = 75°C.

Os parâmetros em relação ao tempo e à solução utilizados na simulação foram:

- Avanço no tempo igual a 500 segundos;
- Número de avanço igual a 10.000;
- Tolerância admitida foi de 10^{-10} ;
- Número de iterações igual a 10.000;
- Tolerância do solver igual a 10^{-8} .

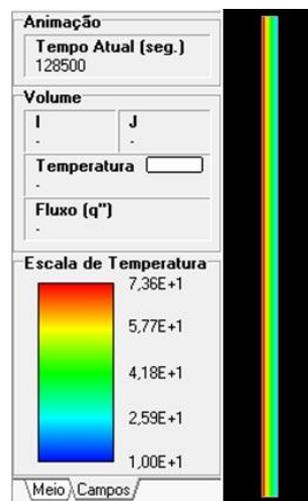
Os resultados obtidos através da simulação, a curva que apresenta a taxa de convergência e o a distribuição térmica para a estrutura de madeira encontram-se nas figuras 21 e 22.

Figura 21 - Taxa de convergência para a estrutura de madeira descrita no Estudo de caso 2



Fonte: Simulação no software TransCal (Realizado pela autora)

Figura 22 - Distribuição térmica para a estrutura de madeira descrita no Estudo de caso 2



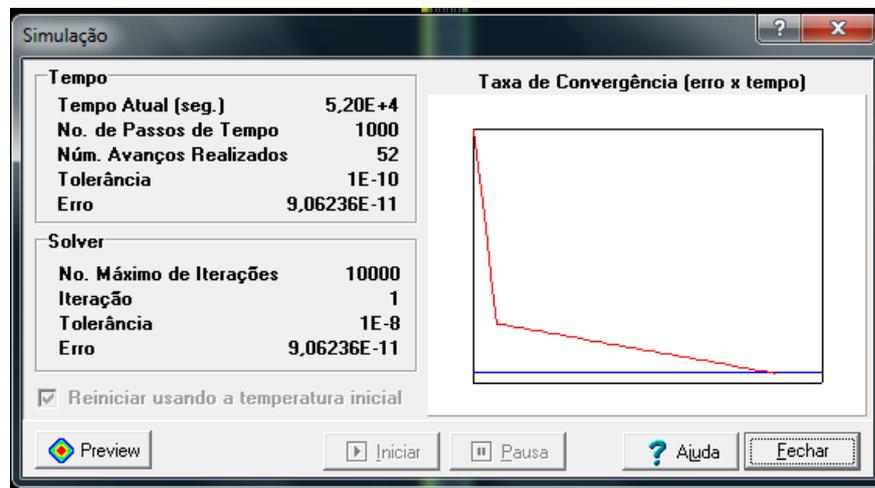
Fonte: Simulação no software TransCal (Realizado pela autora)

Analisando os resultados obtidos através da simulação observa-se que a soma do fluxo por unidade de comprimento de Oeste para Leste é igual 175,9996 W/m conforme Apêndice B. Assim o fluxo da transferência de calor pode ser obtido conforme a equação a seguir:

$$q_x'' = 175,999 \frac{W}{m} \times 0,05m = 8,8 W$$

Os resultados obtidos através da simulação, a curva que apresenta a taxa de convergência e o da distribuição térmica para a estrutura de metalon encontram-se nas figuras 23 e 24.

Figura 23 - Taxa de convergência para a estrutura de metalon descrito no Estudo de caso 2



Fonte: Simulação no software TransCal (Realizado pela autora)

Figura 24 - Distribuição térmica para a estrutura de madeira descrita no Estudo de caso 2



Fonte: Simulação no software TransCal (Realizado pela autora)

Analisando os resultados obtidos através da simulação observa-se que a soma do fluxo por unidade de comprimento de Oeste para Leste é igual 3.574,5981 W/m conforme Apêndice C. Assim o fluxo da transferência de calor pode ser obtido conforme a equação a seguir:

$$q_x = 3.574,5981 \frac{W}{m} \times 0,05m = 178,73 W$$

4.4.3 Comparação entre os métodos de solução analítica e numérica

Ao analisar os resultados obtidos no Estudo de caso 1 através dos métodos de solução analítica e numérica nota-se que a solução para a taxa e o fluxo de calor foram iguais a 1.512 W e 100,8 W/m² independente do método de solução.

No Estudo de caso 2, a taxa de transferência de calor obtida analiticamente para a estrutura de madeira foi de 8,25 W enquanto a solução numérica para este parâmetro foi 8,8 W. A variação entre os resultados obtidos foi de 6,25% e, portanto a diferença entre os resultados não inviabiliza a solução numérica.

No caso da estrutura com metalon, também descrita no Estudo de caso 2, a solução analítica e numérica consideraram a transferência de calor através de parede composta já que o interior do perfil de metalon é preenchido por ar. A solução analítica foi desenvolvida considerando circuitos térmicos unidimensionais simplificados, que forneceram a faixa de para a taxa de transferência indicando que o valor real para este parâmetro encontra-se entre as soluções encontradas. Ao obter a solução numérica para essa estrutura, nota-se que o valor da taxa de transferência de calor encontra-se no intervalo indicado pelas soluções analíticas unidimensionais aproximadas.

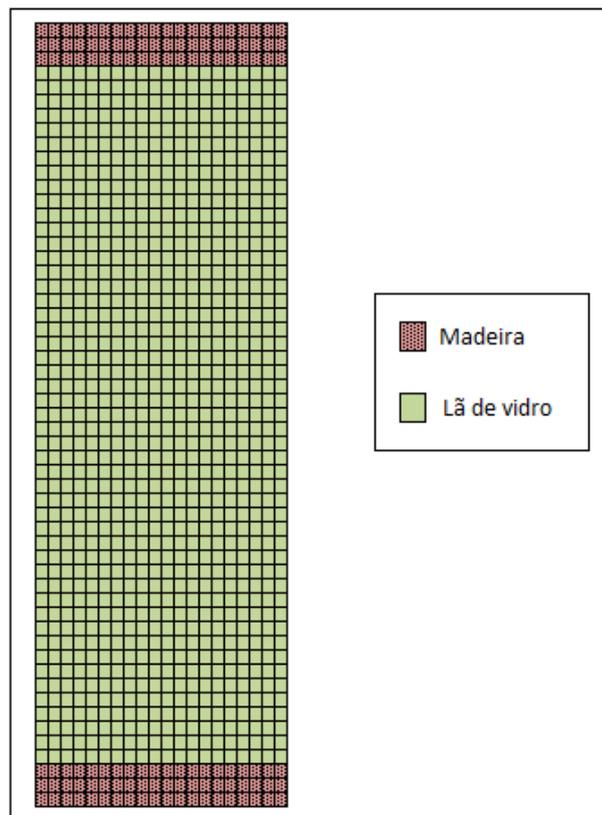
Através da comparação dos resultados analíticos e numéricos percebe-se que as simulações realizadas através do software TransCal possuem resultados muito similares adequados e portanto válidos para os casos necessários para comparar as perdas térmicas das diferentes estruturas construtivas do secador estudado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Distribuição térmica da parede

Com o objetivo de analisar a distribuição térmica em uma parede do secador construído, realizou-se a análise numérica, utilizando-se a metodologia de volumes finitos, para uma malha de 20 elementos horizontais e 55 elementos verticais conforme mostrado na figura 25. A parede simulada obedece às dimensões do equipamento: altura de 1,10m, espessura de duas vigas de madeira de 5cm, localizadas nas extremidades superior e inferior, e espessura da parede de 5cm. Foi considerada que a condutividade térmica da madeira é igual a 0,16 W/(m.K) e que a condutividade térmica da lã de vidro vale 0,038 W/(m.K), dada pelo fabricante. As temperaturas externa e interna no secador são, respectivamente, 25°C e 75°C.

Figura 25 - Malha utilizada na análise numérica da parede do secador construído



Fonte: Realizado pela autora

A solução numérica foi realizada através do TransCal utilizando a geometria cartesiana sendo que os números de volumes na direção i é igual a 20 e na direção j é igual a 55. A temperatura inicial foi definida em 10°C e as condições de contorno foram definidas da seguinte forma:

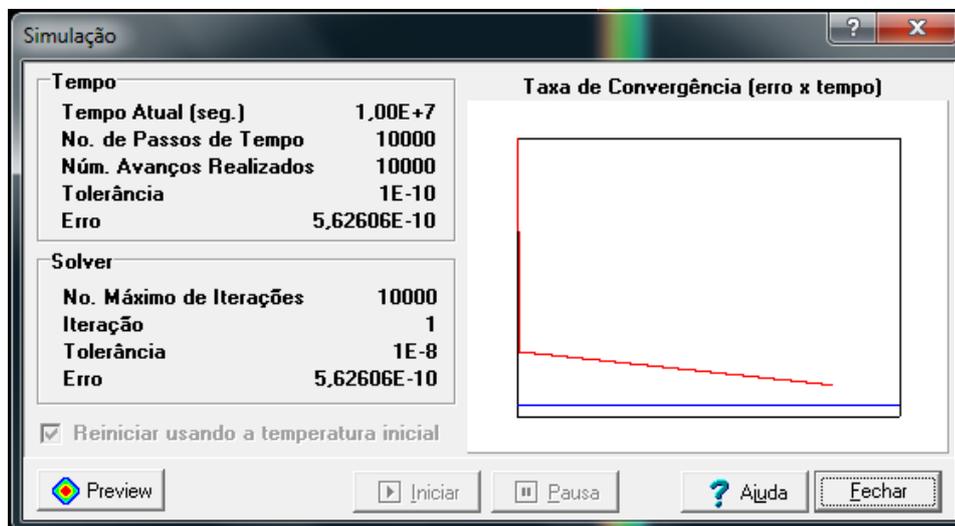
- Fluxo de transferência de calor no norte igual a 0;
- Fluxo de transferência de calor no norte igual a 0;
- Temperatura da face leste = 25°C;
- Temperatura da face oeste = 75°C.

Os parâmetros em relação ao tempo e à solução utilizados na simulação foram:

- Avanço no tempo igual a 1.000 segundos;
- Número de avanço igual a 10.000;
- Tolerância admitida foi de 10^{-10} ;
- Número de iterações igual a 10.000;
- Tolerância do solver igual a 10^{-8} .

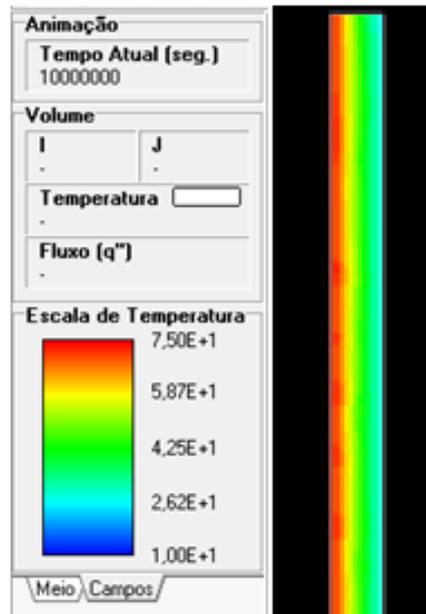
Os resultados obtidos através da simulação, a curva que apresenta a taxa de convergência e a distribuição térmica encontram-se nas figuras 26 e 27, respectivamente.

Figura 26 - Taxa de convergência para a parede construída com madeira e lã de vidro



Fonte: Simulação no software TransCal (Realizado pela autora)

Figura 27 - Distribuição térmica da parede construída utilizando madeira e lã de vidro



Fonte: Simulação no software TransCal (Realizado pela autora)

Analisando os resultados obtidos através da simulação foi identificado que a soma do fluxo por unidade de comprimento de Oeste para Leste é igual 49,12W/m

Assim o fluxo da transferência de calor pode ser obtido conforme a equação a seguir:

$$q_x'' = \frac{q'}{H} = \frac{49,12 \text{ W/m}}{1,1\text{m}} = 44,66 \text{ W/m}^2$$

O valor de fluxo de calor avaliado é uma boa estimativa sobre as perdas térmicas através das paredes do secador, para as condições de operação similares às simuladas numericamente.

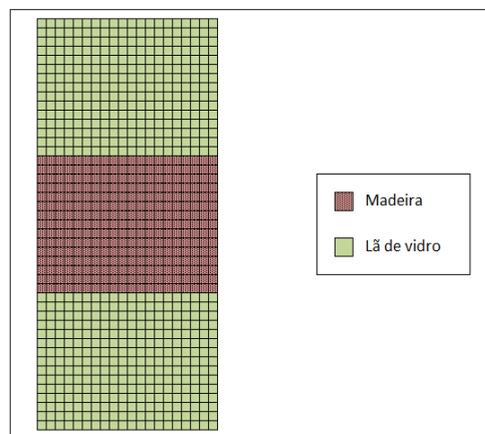
5.2 Análise comparativa das perdas térmicas através da porta

Uma das maneiras de melhorar a eficiência térmica dos secadores é reduzindo o fluxo de calor através das paredes e da porta do equipamento. A maioria de estufas e de secadores existentes possui estrutura (de paredes e da porta) confeccionada em perfis de metalon, enquanto que no secador estudado neste trabalho optou-se por desenvolver o projeto e a construção utilizando-se estrutura de madeira. Assim, torna-se interessante comparar as perdas térmicas através de uma seção parcial da porta construída com estrutura de madeira com as perdas térmicas na mesma seção parcial que utiliza estrutura em perfis de metalon. Como a análise é

comparativa, para os casos simulados considerou-se uma seção de testes de 150 mm de altura e 50 mm de espessura.

A figura 28 ilustra o esboço da malha utilizada na análise numérica da distribuição térmica ao longo da seção composta por lã de vidro nas extremidades e madeira no centro sendo que as seções possuem mesma espessura de 50mm. A malha apresenta 20 volumes horizontais e 45 volumes verticais. O valor de condutividade térmica da madeira é igual a 0,16 W/(m.K) e a condutividade térmica da lã de vidro vale 0,038 W/(m.K), dada pelo fabricante. As temperaturas externa e interna no secador são, respectivamente, 25°C e 75°C.

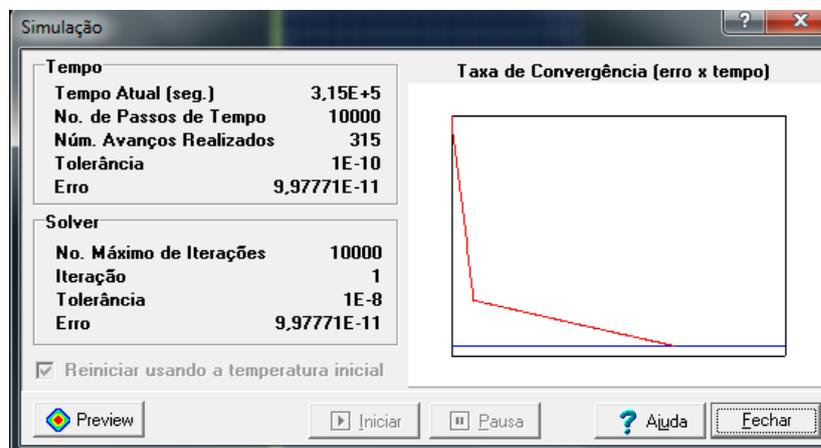
Figura 28 - Malha utilizada na análise numérica da seção construída com madeira



Fonte: Realizado pela autora

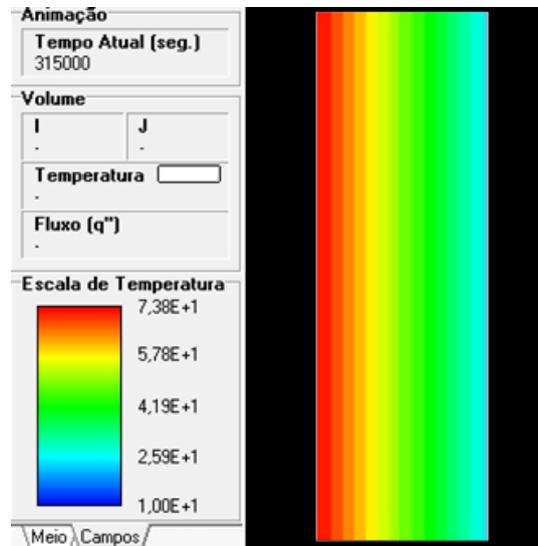
Os resultados obtidos através da simulação, a curva que apresenta a taxa de convergência e o resultado da distribuição térmica encontram-se nas figuras 29 e 30, respectivamente.

Figura 29 - Taxa de convergência térmica da seção contendo madeira como material construtivo



Fonte: Simulação no software TransCal (Realizado pela autora)

Figura 30 - Distribuição térmica do secador utilizando-se madeira como material construtivo



Fonte: Simulação no software TransCal (Realizado pela autora)

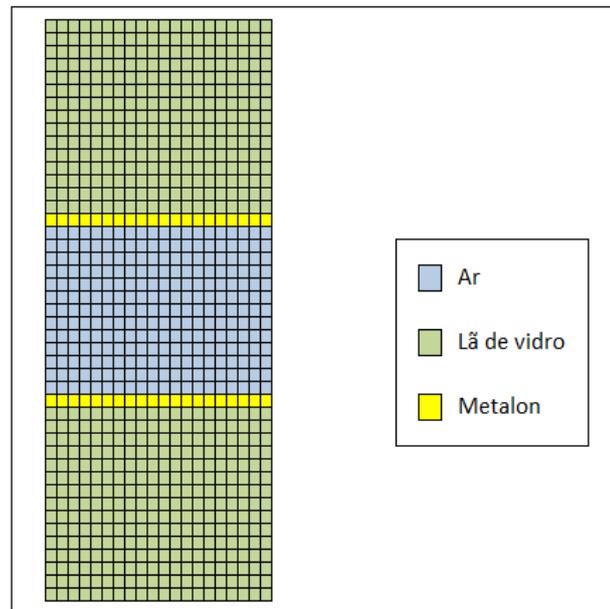
Analisando os resultados obtidos através da simulação observa-se que a soma do fluxo por unidade de comprimento de Oeste para Leste é igual 11,80 W/m.

Assim o fluxo da transferência de calor para a seção de análise foi de:

$$q_x'' = \frac{q'}{H} = \frac{11,80 \text{ W/m}}{0,15\text{m}} = 78,67 \text{ W/m}^2$$

A figura 31 ilustra o esboço da malha utilizada na análise numérica da distribuição térmica ao longo da seção composta por lã de vidro nas extremidades e metalon e ar no centro sendo que as seções de madeira possuem mesma espessura da seção formada pelo metalon e pelo ar e supondo que o metalon possua 3 mm de espessura. A malha apresenta 20 volumes horizontais e 45 volumes verticais. O valor de condutividade térmica do metalon é igual a 80W/(m.K), a do ar vale 0,0263 W/(m.K) e a condutividade térmica da lã de vidro vale 0,038 W/(m.K), dada pelo fabricante. As temperaturas externa e interna no secador são, respectivamente, 25°C e 75°C.

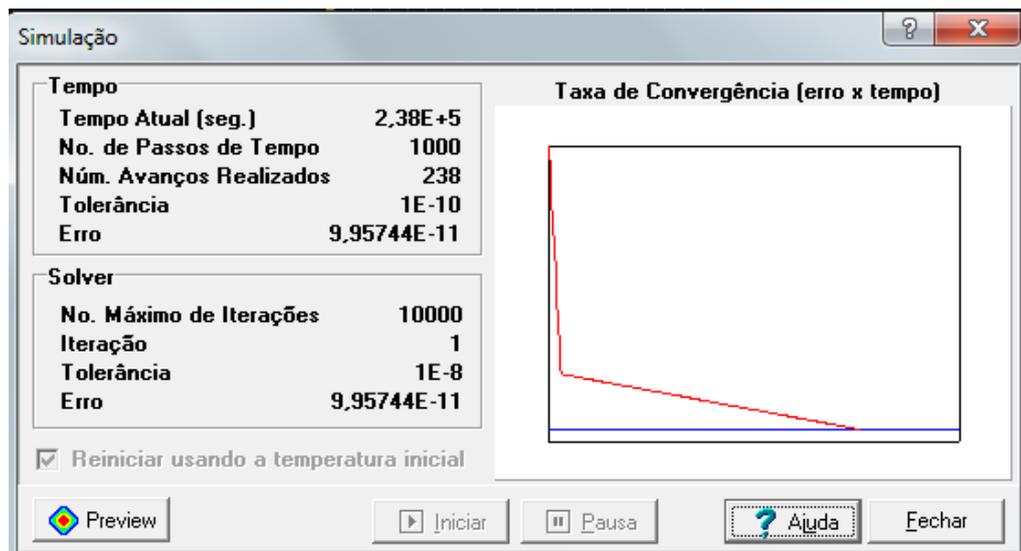
Figura 31 - Malha utilizada na análise numérica da seção construída com metalon



Fonte: Realizado pela autora

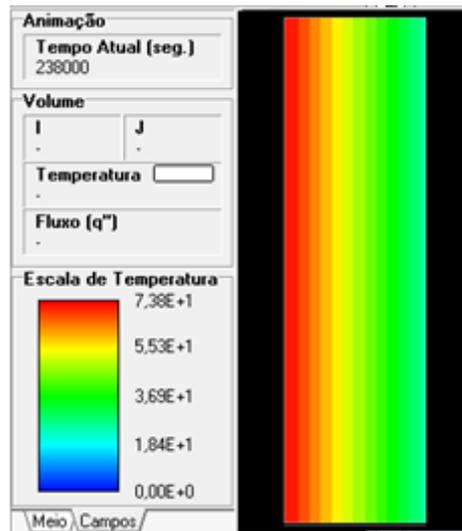
Os resultados obtidos através da simulação, a curva que apresenta a taxa de convergência e a distribuição térmica encontram-se nas figuras 32 e 33, respectivamente.

Figura 32 - Taxa de convergência utilizando metalon como material construtivo



Fonte: Simulação no software TransCal (Realizado pela autora)

Figura 33 - Distribuição térmica do secador utilizando-se metalon como material construtivo



Fonte: Simulação no software TransCal (Realizado pela autora)

Analisando os resultados obtidos através da simulação observa-se que a soma do fluxo por unidade de comprimento de Oeste para Leste é igual 539,61 W/m.

Assim o fluxo da transferência de calor pode ser obtido conforme a equação a seguir:

$$q_x'' = \frac{q'}{H} = \frac{539,61 \text{ W/m}}{0,15 \text{ m}} = 3.597,4 \text{ W/m}^2$$

Através dos resultados numéricos obtidos com a simulação da transferência de calor da seção de testes concebida em diferentes materiais, é possível perceber o fluxo de calor transferido por condução pela seção utilizando madeira como material construtivo é 45,7 vezes menor que o fluxo de calor por condução pela seção composta por metalon. Isso ocorre devido à elevada condutividade térmica do metalon se comparada à condutividade da madeira. Obviamente, se for introduzido um perfil de metalon menos espesso que o utilizado na simulação (3 mm) as perdas irão reduzir embora a rigidez do equipamento também reduza. Apesar de interessante para efeitos comparativos, não foi possível simular a transferência de calor com perfis de metalon menos espessos, pois a malha de simulação ficaria muito refinada impossibilitando determinar os materiais construtivos nos volumes de controle da malha (o que é uma deficiência observada do software TransCal).

A avaliação dos fluxos de calor permite verificar que construir o secador utilizando estrutura de madeira (ao invés de metalon) reduz as perdas térmicas por condução de calor através da

carcaça e, portanto, para conseguir o mesmo efeito de secagem em produtos de interesse pode-se utilizar menos energia para manter a temperatura de secagem no patamar adequado para a aplicação desejada.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo da influência dos materiais construtivos nas perdas térmicas de um secador. Os modelos matemáticos para determinação do fluxo de calor conduzido do interior para o exterior do secador foram estudados para a determinação das perdas térmicas do equipamento.

Foi realizada a validação do software TransCal para simular a transferência de calor dos sistemas de interesse para construção do secador comparando-se as soluções obtidas analítica e numericamente. Através dos dados obtidos com as simulações foi realizada uma análise comparativa entre os materiais estudados, verificando qual apresentava os maiores valores de perda térmica através do fluxo de calor para avaliar qual a configuração mais eficiente para construir um secador.

Resultados numéricos demonstraram que a melhor estrutura construtiva de secadores e de estufas é utilizando-se madeira ao invés de perfis de metalon. Essa configuração permite um fluxo de calor, para uma seção específica de testes, de aproximadamente 1,46% do observado para estrutura de metalon com espessura de 3mm. Foi observada nas simulações numéricas utilizando o software TransCal, uma limitação para as dimensões de volumes de controle, que impediram a simulação de menores espessuras para as paredes dos perfis de metalon.

Finalmente, conclui-se que construir estufas e secadores utilizando a estrutura de madeira ao invés de perfis de metalon permite a redução de perdas térmicas e um aumento da eficiência do dispositivo.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, J. M.; GASPARINO Filho, J. **Desidratação de Frutas e Hortaliças: Manual Técnico do Instituto de Tecnologia de Alimentos**. Campinas: ITAL. 1999.

AMER, B.M.A.; HOSSAIN, M. A.; GOTTSCHALK, K. **Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana**. *Energy Conversion and Management*, v. 51, p. 813–820, Abr. 2010.

BANOUT, J.; EHF, P.; HAVLIK, J.; LOJKA, B.; POLESNY, Z.; VERNER, V. **Design and performance evaluation of a Double-pass solar drier for drying of red chilli** (*Capsicum annum L.*). *Solar Energy*. V. 85, p. 506-515, Jan. 2011.

CHOU, S. K; CHUA, K. J. **New hybrid drying Technologies for heat sensitive foodstuffs**. *Trends in food science & technology*, V. 12, p. 359-369, Out. 2001.

CHUA, Kian Jon; CHOU, Siaw Kiang. **New hybrid drying technologies**. *Emerging technologies for food processing*. ISBN: 0-12-676757-2, p. 535-551, 2005.

COSTA, Ennio Cruz, **Secagem Industrial**. 1.ed : Edgard Blucher, SP, 2007. 196p.

CRAPISTE, Guillermo H.; ROTSTEIN, Enrique. Design and Performance Evaluation of Dryers. In VALENTAS, Kenneth J; ROTSTEIN, Enrique; SINGH, R. Paul. *Handbook of Food Engineering Practice*. Boca Raton, New York: CRC Press. 1997. Cap. 4, p. 132-173.

EKECHUKWU, O. V. and Norton, B. **Review of Solar-energy Drying Systems II: an Overview of Solar Drying Technology**. *Energy Conversion and Management*. v. 40, p. 615-655, 1999.

FERREIRA, A. G. **Projeto, Construção e Simulação de um Secador (Adaptável Como Secador Híbrido Solar-elétrico)**. Belo Horizonte, 2011.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; ANDERSEN, L. B., **Princípio das Operações Unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC. 1982.

GBAHA, P.; ANDOH, H. Yobouet; SARAKA, J. Kouassi; KOUA, B. Kaménan; TOURÉ, S. Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow. *Renewable*, v. 32, p. 1817-1829, Set. 2007.

GAVA, A. J. **Princípios de Tecnologia de Alimentos**. São Paulo: Nobel, 1984. 284p.

GOUVEIA, et al. **Cinética de Feijão Preto (*Phaseolus Vulgaris*, l.) em Secador de Bandeja**. *Holos*, ano 27, vol1. 2011.

Heart Transfer/ TransCal 1.1(s.d.). Acesso em 03 de nov de 2011. Disponível em: Laboratório de Simulação Numérica em Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor:<http://www.sinmec.ufsc.br/sinmec/software/transcal.html>

INCROPERA, F. P.; DEWIIT, D.P.; BERGMAN, T.L.,LAVINE, A.S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC.2011.

JANJAI, S.; LAMLERT, N.; INTAWEE, P.; MAHAYOTHEE, B.; BALA, B.K.; NAGLE, M.; MÜLLER, J. Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar Energy*, v. 83, p. 1550-1565, Set. 2009.

JESUS, S.C., MATSUURA. F.C.A.U.,FOLEGATTI, M.I.S., CARDOSO, R.L. **Avaliação de Banana-passa obtida de frutos de diferentes genótipos de bananeira**. *Pesq. Agropec. bras.*, Brasília, v 40. N 6, jun. 2005.

Lã de Vidro: Isolamento Térmico e Acústico. (s.d.). Acesso em 03 de nov de 2011. Disponível em *Met@lica*: <http://www.metlica.com.br/la-de-vidro-isolamento-termico-e-acustico/LEON>, M. A., KUMAR, S. and BHATTACHARYA, S. C. A Comprehensive Procedure for Performance Evaluation of Solar Food Dryers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, p. 367-393, 2002.

MARSTERS, K. Deposit-free spray drying: dream or reality. **Proceedings of the 10th International Drying Symposium (IDS'98)**. Halkidiki. Greece. Vol C. 1998.

Metalon.(s.d.). Acesso em 03 de nov de 2011. Disponível em *Tubonasa*: <http://www.tubonasa.com.br/tubos-de-aco/metalon>

MORAIS-DUZAT, Rejane; BARBOSA, Ana Paula; VETTER, Roland. O Secador Solar do INPA – Uma alternativa econômica para secar madeira. An. 3. Enc. Energ. Meio Rural 2003.

ONG, K. S. **Solar Dryers in the Asia-Pacific Region**. *Renewable Energy*, v. 16, p. 779-784, Jan. 1999.

SESHADRI, V., TAVARES, R.P., ANTONIO DA SILVA, C., ALVES DA SILVA, I., **Fenômenos de Transporte: Fundamentos e Aplicações nas Engenharias Metalúrgicas e de Materiais**. São Paulo: ABM.2010.

VALDUGA, A.T.,BATTESTIN,V.,FINZER, J.R.D. **Secagem de Extratos de Erva-mate em Secador por Atomização**. Cienc. Tecnol.Aliment, Campinas, 23(2):184-189, maio-ago.2003.

APÊNDICE A _ Distribuição térmica do Estudo de caso 1

Transcalv1.1 - Resultados da simulação

=====

*** Snapshot:

Tempo Atual:	338500	
Último tempo simulado:	338500	
No. de avanços executados:	677	
Avanços de Tempo (seg.):	500	
Número de volumes (OL/SN):	20	30

*** Estatísticas:

Temperatura:		
Global (mín/máx):	-9.1250003	24.125
Local (mín/máx):	-9.1250003	24.125

Fluxo SN:		
Global (mín/máx):	0	230.4
Local (mín/máx):	10.079997	10.080004

Fluxo LO:		
Global (mín/máx):	-2.761541e-15	2.0630446e-10
Local (mín/máx):	-2.761541e-15	2.0630446e-10

*** Resultados da Simulação

Temperatura:				
30:	24.125	22.374999	20.624999	18.874998
17.124998	15.374997	13.624997	11.874997	
10.124997	8.3749968	6.6249968	4.8749968	
3.124997	1.3749971	-0.37500259	-2.1250023	-
3.8750019	-5.6250014	-7.3750009	-9.1250003	
29:	24.125	22.374999	20.624999	18.874998
17.124998	15.374997	13.624997	11.874997	
10.124997	8.3749968	6.6249968	4.8749968	
3.124997	1.3749972	-0.37500259	-2.1250023	-
3.8750019	-5.6250014	-7.3750009	-9.1250003	
28:	24.125	22.374999	20.624999	18.874998
17.124998	15.374997	13.624997	11.874997	
10.124997	8.3749968	6.6249968	4.8749968	
3.124997	1.3749972	-0.37500259	-2.1250023	-
3.8750019	-5.6250014	-7.3750009	-9.1250003	
27:	24.125	22.374999	20.624999	18.874998
17.124998	15.374997	13.624997	11.874997	
10.124997	8.3749968	6.6249968	4.8749968	
3.124997	1.3749972	-0.37500259	-2.1250023	-
3.8750019	-5.6250014	-7.3750009	-9.1250003	
26:	24.125	22.374999	20.624999	18.874998
17.124998	15.374997	13.624997	11.874997	
10.124997	8.3749968	6.6249968	4.8749968	
3.124997	1.3749972	-0.37500259	-2.1250023	-
3.8750019	-5.6250014	-7.3750009	-9.1250003	
25:	24.125	22.374999	20.624999	18.874998
17.124998	15.374997	13.624997	11.874997	
10.124997	8.3749968	6.6249968	4.8749968	
3.124997	1.3749972	-0.37500259	-2.1250023	-

10.080003	10.080002	10.080002	10.080002	
10.080001	10.080001	10.08	10.08	
10.08	10.079999	10.079999	10.079999	10.079998
10.079998	10.079997	10.079997	10.079997	
5:	10.080004	10.080004	10.080003	10.080003
10.080003	10.080002	10.080002	10.080002	
10.080001	10.080001	10.08	10.08	
10.08	10.079999	10.079999	10.079999	10.079998
10.079998	10.079997	10.079997	10.079997	
4:	10.080004	10.080004	10.080003	10.080003
10.080003	10.080002	10.080002	10.080002	
10.080001	10.080001	10.08	10.08	
10.08	10.079999	10.079999	10.079999	10.079998
10.079998	10.079997	10.079997	10.079997	
3:	10.080004	10.080004	10.080003	10.080003
10.080003	10.080002	10.080002	10.080002	
10.080001	10.080001	10.08	10.08	
10.08	10.079999	10.079999	10.079999	10.079998
10.079998	10.079997	10.079997	10.079997	
2:	10.080004	10.080004	10.080003	10.080003
10.080003	10.080002	10.080002	10.080002	
10.080001	10.080001	10.08	10.08	
10.08	10.079999	10.079999	10.079999	10.079998
10.079998	10.079997	10.079997	10.079997	
1:	10.080004	10.080004	10.080003	10.080003
10.080003	10.080002	10.080002	10.080002	
10.080001	10.080001	10.08	10.08	
10.08	10.079999	10.079999	10.079999	10.079998
10.079998	10.079997	10.079997	10.079997	
Soma:	302.40011	302.40011	302.4001	302.40009
302.40008	302.40007	302.40006	302.40005	
302.40003	302.40002	302.40001	302.4	
302.39999	302.39998	302.39997	302.39996	
302.39994	302.39993	302.39992	302.39991	
302.3999				

Fluxo OL (fluxo de Sul para Norte):

31:	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0 Soma:	0			
30:	1.7344846e-11	5.112965e-11	8.3194891e-11	1.1277797e-10
1.3918946e-10	1.6182699e-10	1.8018759e-10	1.9387995e-10	
2.0263419e-10	2.0630446e-10	2.0487068e-10	1.9843919e-10	
1.8723651e-10	1.7160316e-10	1.5198361e-10	1.2891332e-10	
1.0300521e-10	7.493302e-11	4.5414465e-11	1.5192807e-11	Soma:
2.630062e-09				
29:	1.1278658e-11	3.3263301e-11	5.4145808e-11	7.3428645e-11
9.065964e-11	1.0544361e-10	1.1745105e-10	1.2642415e-10	
1.321827e-10	1.3462755e-10	1.3374206e-10	1.2959178e-10	
1.2232107e-10	1.1214914e-10	9.9363497e-11	8.4311318e-11	
6.73915e-11	4.904261e-11	2.9733088e-11	9.9491615e-12	Soma:
1.7165004e-09				
28:	6.6596328e-12	1.9655306e-11	3.2010554e-11	4.343152e-11
5.3649885e-11	6.2429538e-11	6.9572551e-11	7.4923427e-11	
7.8372785e-11	7.9859683e-11	7.9371869e-11	7.6945018e-11	
7.2662036e-11	6.6650717e-11	5.9079646e-11	5.0153162e-11	
4.0106606e-11	2.9199763e-11	1.7710865e-11	5.9282179e-12	Soma:
1.0183728e-09				
27:	3.58785e-12	1.0597592e-11	1.7270345e-11	2.3445907e-11

2.897778e-11	3.3737929e-11	3.7618272e-11	4.0533337e-11	
4.2422662e-11	4.3251206e-11	4.3010076e-11	4.1717437e-11	
3.941647e-11	3.6174856e-11	3.2082711e-11	2.7249683e-11	
2.1802607e-11	1.5881696e-11	9.6376432e-12	3.2271785e-12	Soma:
5.5164324e-10				
26:1.7780977e-12	5.2546658e-12	8.5681862e-12	1.1638712e-11	
1.4393606e-11	1.6767823e-11	1.8707479e-11	2.0168827e-11	
2.1120981e-11	2.1545849e-11	2.1437971e-11	2.0805845e-11	
1.9669426e-11	1.8062084e-11	1.6028059e-11	1.3621224e-11	
1.0904605e-11	7.9476425e-12	4.8253326e-12	1.616467e-12	Soma:
2.7486288e-10				
25:	8.17586e-132.4182147e-12	3.9453241e-12	5.3624524e-12	
6.6359718e-12	7.7353686e-12	8.635536e-12	9.3157482e-12	
9.7609483e-12	9.9634338e-12	9.9192654e-12	9.6322225e-12	
9.1112717e-12	8.3714161e-12	7.4329343e-12	6.3203043e-12	
5.0626378e-12	3.6917669e-12	2.2426785e-12	7.5139894e-13	Soma:
1.2712648e-10				
24:3.5299763e-13	1.043954e-12	1.7042368e-12	2.3178478e-12	
2.8687452e-12	3.3452803e-12	3.7365748e-12	4.0330939e-12	
4.2287336e-12	4.318829e-12	4.3022386e-12	4.1801837e-12	
3.9562353e-12	3.6368833e-12	3.2309255e-12	2.7487612e-12	
2.2030852e-12	1.6073542e-12	9.7657132e-13	3.2741809e-13	Soma:
5.511995e-11				
23:	1.438849e-134.2652788e-13	6.9704242e-13	9.4742401e-13	
1.1744206e-12	1.3710195e-12	1.5322581e-12	1.6548363e-12	
1.7356878e-12	1.7733452e-12	1.7672264e-12	1.7179133e-12	
1.6266988e-12	1.4961957e-12	1.3300111e-12	1.1322143e-12	
9.0792124e-13	6.6282979e-13	4.0318998e-13	1.3525181e-13	Soma:
2.2635899e-11				
22:	5.595524e-14	1.672153e-132.7306157e-13	3.7220414e-13	
4.6075144e-13	5.3760621e-13	6.0068325e-13	6.484413e-13	
6.8053188e-13	6.9580716e-13	6.9368511e-13	6.7474776e-13	
6.3916872e-13	5.8804212e-13	5.2295168e-13	4.4536375e-13	
3.5736164e-13	2.6083136e-13	1.5858564e-13	5.3077542e-14	Soma:
8.8860728e-12				
21:2.1422863e-14	6.2658941e-14	1.026379e-13	1.4006983e-13	
1.7330137e-13	2.0219451e-13	2.2610289e-13	2.4460434e-13	
2.5655103e-13	2.6255373e-13	2.6187053e-13	2.5484365e-13	
2.4148683e-13	2.2223473e-13	1.9778179e-13	1.6846524e-13	
1.3529927e-13	9.8880903e-14	6.0104421e-14	2.0303759e-14	Soma:
3.3533685e-12				
20:7.6738615e-15	2.2371167e-14	3.6450842e-14	4.9582213e-14	
6.1710637e-14	7.2378353e-14	8.1578494e-14	8.8249408e-14	
9.3001856e-14	9.5487368e-14	9.5203845e-14	9.2893193e-14	
8.7929664e-14	8.0967733e-14	7.2192252e-14	6.1590733e-14	
4.9607818e-14	3.6131098e-14	2.1735114e-14	7.3541173e-15	Soma:
1.2140898e-12				
19:2.2382096e-15	6.7037001e-15	1.1191048e-14	1.6009069e-14	
2.0783375e-14	2.4736463e-14	2.8660824e-14	3.1654679e-14	
3.3209685e-14	3.4096476e-14	3.4292569e-14	3.3500702e-14	
3.1774583e-14	2.9129199e-14	2.5954239e-14	2.2062352e-14	
1.7713331e-14	1.2949641e-14	7.9061757e-15	2.5579538e-15	Soma:
4.2712427e-13				
18:1.5987212e-15	4.4654905e-15	7.3541173e-15	8.974696e-15	
1.0231815e-14	1.1626949e-14	1.2193996e-14	1.2310153e-14	
1.2905926e-14	1.2993356e-14	1.2709833e-14	1.2317647e-14	
1.155076e-14	1.056405e-14	9.5123909e-15	8.1934459e-15	
6.6821548e-15	4.8760995e-15	2.8702041e-15	1.1191048e-15	Soma:
1.7505091e-13				
17:3.1974423e-16	1.5877924e-15	2.5579538e-15	3.8587883e-15	
4.4764192e-15	4.7524484e-15	5.1596227e-15	5.595524e-15	

5.3919369e-15	5.3194948e-15	5.2757798e-15	5.2033378e-15	
4.7561954e-15	4.2491011e-15	3.8019587e-15	3.1574743e-15	
2.5654478e-15	1.6786572e-15	9.5173872e-16	3.1974423e-16	Soma:
7.097916e-14				
16:	0	6.285597e-16	9.5923269e-16	9.8109021e-16
9.5923269e-16	1.0753898e-15	1.4825641e-15	1.438849e-15	
1.395134e-15	1.6424362e-15	1.5987212e-15	1.5262791e-15	
1.438849e-15	1.2315149e-15	1.1740608e-15	9.9920072e-16	
9.6672668e-16	6.3948846e-16	3.1225025e-16		0 Soma:
2.044958e-14				
15:	0	-6.5041722e-16	-9.5923269e-16	-9.3737517e-16 -
6.3948846e-16	-1.0029477e-15	-1.0753898e-15	-1.1191048e-15	-
6.832035e-16	-2.760292e-16	-2.3980817e-16	-7.2442057e-17	-
1.5987212e-16	-1.8735012e-16	-2.9976022e-17	3.9968029e-17	
1.673661e-16	2.3980817e-16	7.244208e-17	3.1974423e-16	Soma: -
7.1933084e-15				
14:	0	-1.0928761e-17	0	-2.9788671e-16 -
3.1974423e-16	4.3590131e-16	8.4307561e-16	9.5923269e-16	
5.9577343e-16	5.2333138e-16	3.1974423e-16	4.0717429e-16	
3.1974423e-16	1.9234615e-16	2.0483615e-16	7.9936058e-17	
8.7430042e-17	-1.5987212e-16	-2.4730215e-16	-3.1974423e-16	Soma:
3.6130474e-15				
13:	0	-1.0928761e-17	0	3.4160175e-16
3.1974423e-16	-5.2333139e-16	-7.5564554e-16	-9.5923269e-16	-
6.832035e-16	-4.3590131e-16	-3.1974423e-16	-1.5237811e-16	-
2.3980817e-16	-2.872702e-16	-1.2490009e-16	0	
1.673661e-16	1.5987212e-16	7.244208e-17	3.1974423e-16	Soma: -
3.1115735e-15				
12:	0	3.0881547e-16	0	3.4160175e-16
3.1974423e-16	5.9577342e-16	8.4307561e-16	9.5923269e-16	
5.9577343e-16	5.2333138e-16	3.9968029e-16	4.8711035e-16	
3.1974423e-16	1.3239411e-16	1.348921e-16	0	
7.4939842e-18	-1.5987212e-16	-2.4730215e-16	-3.1974423e-16	Soma:
5.2417446e-15				
11:	-3.1974423e-16	-1.9293941e-15	-2.2382096e-15	-2.5360963e-15 -
2.5579538e-15	-2.4417968e-15	-2.0346225e-15	-1.9184654e-15	-
1.6424362e-15	-1.395134e-15	-1.2789769e-15	-8.7180263e-16	-
7.9936058e-16	-7.4690253e-16	-6.2949645e-16	-5.595524e-16	-
4.3215433e-16	-3.1974423e-16	-4.0717427e-16	-1.5987212e-16	Soma: -
2.5218889e-14				
10:	0	-1.0928761e-17	0	2.1857521e-17
0	-4.3715039e-17	4.3715037e-17	0	-4.3715034e-17
4.3715032e-17	7.9936058e-17	7.4940006e-18	-1.1990409e-16	-
2.0733414e-16	-7.9936058e-17	-7.9936058e-17	7.4939842e-18	-
7.9936058e-17	-8.7430035e-17	0	Soma: -5.4862363e-16	
9:	3.1974423e-16	1.9075366e-15	2.2382096e-15	2.5798114e-15
2.5579538e-15	2.3543667e-15	1.8023083e-15	1.438849e-15	
1.2352619e-15	1.1628198e-15	8.7929664e-16	7.2691852e-16	
5.595524e-16	3.7220228e-16	4.2466031e-16	4.3964832e-16	
5.2707836e-16	3.1974423e-16	2.323142e-16	1.5987212e-16	Soma:
2.2238149e-14				
8:	-3.1974423e-16	-1.9293941e-15	-2.2382096e-15	-2.5360963e-15 -
2.5579538e-15	-2.761541e-15	-2.1944946e-15	-1.7585933e-15	-
1.6424362e-15	-1.395134e-15	-1.2789769e-15	-8.7180263e-16	-
7.9936058e-16	-7.069345e-16	-5.6454841e-16	-5.595524e-16	-
4.3215433e-16	-3.9968029e-16	-4.0717427e-16	-1.5987212e-16	Soma: -
2.5513654e-14				
7:	0	-1.0928761e-17	0	2.1857521e-17
0	-2.0358715e-16	-2.7602919e-16	-3.1974423e-16	-5.2333138e-16 -
4.3590131e-16	-5.595524e-16	-4.7212235e-16	-5.595524e-16	-
6.2699844e-16	-4.8960835e-16	-4.3964832e-16	-3.1225025e-16	-

```

3.1974423e-16  -3.2723821e-16          0  Soma: -5.8543795e-15
 6:          0-1.0928761e-17          0  2.1857521e-17
0  -4.3715039e-17  4.3715037e-17          0  -2.0358715e-16  -
2.760292e-16  -2.3980817e-16  -7.2442057e-17  -1.9984014e-16  -
2.872702e-16  -1.8485213e-16  -1.5987212e-16  -1.124101e-16  -
7.9936058e-17  -8.7430035e-17          0  Soma: -1.8925486e-15
 5:3.1974423e-16  6.285597e-16  3.1974423e-16  -6.1763094e-16  -
1.2789769e-15  -1.322692e-15  -1.2352619e-15  -1.7585933e-15  -
1.8023083e-15  -1.395134e-15  -1.1990409e-15  -1.0316748e-15  -
8.7929664e-16  -7.6688654e-16  -4.8461235e-16  -2.797762e-16
4.7462013e-17  7.9936058e-17  7.244208e-17  1.5987212e-16  Soma: -
1.2424124e-14
4:  -3.1974423e-16  -6.5041722e-16  -6.3948846e-16  2.1857521e-17
3.1974423e-16  1.1615708e-16  2.0358715e-16  4.7961635e-16
4.3590131e-16  5.2333138e-16  3.1974423e-16  4.0717429e-16
2.797762e-16  1.1241009e-16  1.448841e-16  3.9968029e-17
7.4939842e-18  -1.5987212e-16  -2.4730215e-16  -1.5987212e-16  Soma: -
1.2349497e-15
 3:          0  6.285597e-16  6.3948846e-16  3.4160175e-16
0  -4.3715039e-17  -4.3590131e-16  -9.5923269e-16  -6.832035e-16  -
5.9577343e-16  -4.7961635e-16  -3.9218629e-16  -3.9968029e-16  -
4.4714231e-16  -3.1474823e-16  -1.9984014e-16  -3.2474045e-17  -
1.5987212e-16  -2.4730215e-16          0  Soma: -3.781038e-15
 2:          0-6.5041722e-16  -1.2789769e-15  -1.5768636e-15  -
1.5987212e-15  -1.6424362e-15  -1.0753898e-15  -7.9936058e-16  -
1.0029477e-15  -7.5564555e-16  -7.9936058e-16  -4.7212235e-16  -
3.9968029e-16  -4.0717428e-16  -2.797762e-16  -2.3980817e-16  -
7.2442074e-17          0  -7.4939774e-18  1.5987212e-16  Soma: -
1.2898745e-14
 1:          0          0          0          0
0          0          0          0          0
0          0          0          0          0
0          0          0          0          0
0  Soma: 0

```

APÊNDICE B _ Distribuição térmica estrutura de madeira do Estudo de caso 2

Transcalv1.1 - Resultados da simulação

=====

*** Snapshot:

Tempo Atual:	128500	
Último tempo simulado:	128500	
No. de avanços executados:	257	
Avanços de Tempo (seg.):	500	
Número de volumes (OL/SN):	20	40

*** Estatísticas:

Temperatura:		
Global (min/máx):	10	73.625
Local (min/máx):	21.375	73.625

Fluxo SN:		
Global (mín/máx):	-32	208
Local (mín/máx):	4.3999991	4.4000008

Fluxo LO:		
Global (mín/máx):	-5.2543426e-11	4.4337867e-15
Local (mín/máx):	-5.2543426e-11	4.4337867e-15

*** Resultados da Simulação

Temperatura:				
40:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125003	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	
40.625003	37.875003	35.125002	32.375002	
29.625002	26.875001	24.125001	21.375	
39:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125002	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	
40.625003	37.875003	35.125002	32.375002	
29.625002	26.875001	24.125001	21.375	
38:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125002	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	
40.625003	37.875003	35.125002	32.375002	
29.625002	26.875001	24.125001	21.375	
37:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125002	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	
40.625003	37.875003	35.125002	32.375002	
29.625002	26.875001	24.125001	21.375	
36:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125002	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	
40.625003	37.875002	35.125002	32.375002	
29.625002	26.875001	24.125001	21.375	
35:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125002	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	

10:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125002	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	
40.625003	37.875002	35.125002	32.375002	
29.625002	26.875001	24.125001	21.375	
9:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125002	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	
40.625003	37.875002	35.125002	32.375002	
29.625002	26.875001	24.125001	21.375	
8:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125002	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	
40.625003	37.875002	35.125002	32.375002	
29.625002	26.875001	24.125001	21.375	
7:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125002	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	
40.625003	37.875002	35.125002	32.375002	
29.625002	26.875001	24.125001	21.375	
6:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125002	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	
40.625003	37.875002	35.125002	32.375002	
29.625002	26.875001	24.125001	21.375	
5:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125002	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	
40.625003	37.875002	35.125002	32.375002	
29.625002	26.875001	24.125001	21.375	
4:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125002	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	
40.625003	37.875002	35.125002	32.375002	
29.625002	26.875001	24.125001	21.375	
3:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125002	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	
40.625003	37.875002	35.125002	32.375002	
29.625002	26.875001	24.125001	21.375	
2:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125002	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	
40.625003	37.875002	35.125002	32.375002	
29.625002	26.875001	24.125001	21.375	
1:	73.625	70.875001	68.125001	65.375002
62.625002	59.875002	57.125002	54.375003	
51.625003	48.875003	46.125003	43.375003	
40.625003	37.875002	35.125002	32.375002	
29.625002	26.875001	24.125001	21.375	

Fluxo SN (fluxo de Oeste para Leste):

40:	4.3999991	4.3999991	4.3999992	4.3999993
4.3999994	4.3999995	4.3999995	4.3999996	
4.3999997	4.3999998	4.3999999	4.4	
4.4000001	4.4000002	4.4000003	4.4000004	
4.4000005	4.4000005	4.4000006	4.4000007	
4.4000008				
39:	4.3999991	4.3999991	4.3999992	4.3999993
4.3999994	4.3999995	4.3999995	4.3999996	
4.3999997	4.3999998	4.3999999	4.4	

8:	4.3999991	4.3999991	4.3999992	4.3999993
4.3999994	4.3999995	4.3999995	4.3999996	
4.3999997	4.3999998	4.3999999	4.4	
4.4000001	4.4000002	4.4000003	4.4000004	
4.4000004	4.4000005	4.4000006	4.4000007	
4.4000008				
7:	4.3999991	4.3999991	4.3999992	4.3999993
4.3999994	4.3999995	4.3999995	4.3999996	
4.3999997	4.3999998	4.3999999	4.4	
4.4000001	4.4000002	4.4000003	4.4000004	
4.4000004	4.4000005	4.4000006	4.4000007	
4.4000008				
6:	4.3999991	4.3999991	4.3999992	4.3999993
4.3999994	4.3999995	4.3999995	4.3999996	
4.3999997	4.3999998	4.3999999	4.4	
4.4000001	4.4000002	4.4000003	4.4000004	
4.4000004	4.4000005	4.4000006	4.4000007	
4.4000008				
5:	4.3999991	4.3999991	4.3999992	4.3999993
4.3999994	4.3999995	4.3999995	4.3999996	
4.3999997	4.3999998	4.3999999	4.4	
4.4000001	4.4000002	4.4000003	4.4000004	
4.4000004	4.4000005	4.4000006	4.4000007	
4.4000008				
4:	4.3999991	4.3999991	4.3999992	4.3999993
4.3999994	4.3999995	4.3999995	4.3999996	
4.3999997	4.3999998	4.3999999	4.4	
4.4000001	4.4000002	4.4000003	4.4000004	
4.4000004	4.4000005	4.4000006	4.4000007	
4.4000008				
3:	4.3999991	4.3999991	4.3999992	4.3999993
4.3999994	4.3999995	4.3999995	4.3999996	
4.3999997	4.3999998	4.3999999	4.4	
4.4000001	4.4000002	4.4000003	4.4000004	
4.4000004	4.4000005	4.4000006	4.4000007	
4.4000008				
2:	4.3999991	4.3999991	4.3999992	4.3999993
4.3999994	4.3999995	4.3999995	4.3999996	
4.3999997	4.3999998	4.3999999	4.4	
4.4000001	4.4000002	4.4000003	4.4000004	
4.4000004	4.4000005	4.4000006	4.4000007	
4.4000008				
1:	4.3999991	4.3999991	4.3999992	4.3999993
4.3999994	4.3999995	4.3999995	4.3999996	
4.3999997	4.3999998	4.3999999	4.4	
4.4000001	4.4000002	4.4000003	4.4000004	
4.4000004	4.4000005	4.4000006	4.4000007	
4.4000008				
Soma:	175.99996	175.99996	175.99997	175.99997
175.99997	175.99998	175.99998	175.99999	
175.99999	175.99999	176	176	
176	176.00001	176.00001	176.00001	176.00002
176.00002	176.00003	176.00003	176.00003	
Fluxo OL (fluxo de Sul para Norte):				
41:	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0 Soma: 0				
40:-4.5890829e-12	-1.3455061e-11	-2.1799224e-11	-2.9428755e-11	-

3.6172643e-11 -4.1885422e-11 -4.6449486e-11 -4.9778252e-11 -
 5.1816869e-11 -5.2543426e-11 -5.1969225e-11 -5.0136009e-11 -
 4.7116487e-11 -4.3009891e-11 -3.7940595e-11 -3.205358e-11 -
 2.551036e-11 -1.8485537e-11 -1.1161516e-11 -3.7238692e-12 Soma: -
 6.6902529e-10
 39:-2.6223006e-12 -7.6972772e-12 -1.2481223e-11 -1.6862949e-11 -
 2.0743293e-11 -2.4037384e-11 -2.6676616e-11 -2.8609649e-11 -
 2.9803459e-11 -3.024398e-11 -2.9935465e-11 -2.8900672e-11 -
 2.7179681e-11 -2.4828864e-11 -2.1918254e-11 -1.853053e-11 -
 1.4758371e-11 -1.070191e-11 -6.4661357e-12 -2.1584583e-12 Soma: -
 3.8515647e-10
 38:-1.3098997e-12 -3.8492051e-12 -6.2473191e-12 -8.4485313e-12 -
 1.0402338e-11 -1.2065364e-11 -1.3402428e-11 -1.4386516e-11 -
 1.5000523e-11 -1.5236181e-11 -1.5094444e-11 -1.4585794e-11 -
 1.3729732e-11 -1.2553414e-11 -1.1091629e-11 -9.3855611e-12 -
 7.4813897e-12 -5.4296834e-12 -3.2832453e-12 -1.0965664e-12 Soma: -
 1.9407977e-10
 37:-5.8003025e-13 -1.7064356e-12 -2.7730493e-12 -3.7537196e-12 -
 4.6262509e-12 -5.3713697e-12 -5.9724243e-12 -6.4175236e-12 -
 6.6980874e-12 -6.8095989e-12 -6.7526724e-12 -6.5315362e-12 -
 6.1540959e-12 -5.6321596e-12 -4.9809614e-12 -4.2189491e-12 -
 3.3663241e-12 -2.4454039e-12 -1.4799447e-12 -4.9459459e-13 Soma: -
 8.6765132e-11
 36:-2.314664e-13 -6.8234458e-13 -1.1093562e-12 -1.5036297e-12 -
 1.8551342e-12 -2.1560785e-12 -2.3999291e-12 -2.5815023e-12 -
 2.6967655e-12 -2.7442713e-12 -2.7240656e-12 -2.6374209e-12 -
 2.487468e-12 -2.278739e-12 -2.0173729e-12 -1.7103353e-12 -
 1.3659474e-12 -9.932819e-13 -6.0182759e-13 -2.0133939e-13 Soma: -
 3.4978276e-11
 35:-8.4810381e-14 -2.503346e-13 -4.07681e-13 -5.5275304e-13 -
 6.8268183e-13 -7.9411019e-13 -8.844836e-13 -9.5202884e-13 -
 9.9566932e-13 -1.0142987e-12 -1.0080765e-12 -9.7702468e-13 -
 9.2222763e-13 -8.4583007e-13 -7.4953732e-13 -6.3610839e-13 -
 5.0840754e-13 -3.6999381e-13 -2.2421676e-13 -7.4976469e-14 Soma: -
 1.2935251e-11
 34:-2.910383e-14 -8.5943433e-14 -1.4006218e-13 -1.9009203e-13 -
 2.3486937e-13 -2.7331079e-13 -3.049081e-13 -3.2857023e-13 -
 3.4367531e-13 -3.5036757e-13 -3.4835174e-13 -3.3764991e-13 -
 3.1889158e-13 -2.9251623e-13 -2.5954705e-13 -2.2046931e-13 -
 1.7644197e-13 -1.2857981e-13 -7.8072326e-14 -2.6147973e-14 Soma: -
 4.4675707e-12
 33:-9.5496944e-15 -2.7963146e-14 -4.5702109e-14 -6.2080646e-14 -
 7.6617296e-14 -8.9365487e-14 -9.958967e-14 -1.0756301e-13 -
 1.1266366e-13 -1.151495e-13 -1.1449791e-13 -1.1129941e-13 -
 1.053877e-13 -9.6747499e-14 -8.5719876e-14 -7.2903794e-14 -
 5.8264504e-14 -4.2348347e-14 -2.5605851e-14 -8.6401997e-15 Soma: -
 1.4676593e-12
 32:-2.9558578e-15 -8.6363833e-15 -1.4097168e-14 -1.9334395e-14 -
 2.4207664e-14 -2.8543029e-14 -3.2059688e-14 -3.4462377e-14 -
 3.6038728e-14 -3.6705583e-14 -3.650874e-14 -3.5356607e-14 -
 3.342393e-14 -3.0695446e-14 -2.7171154e-14 -2.3108959e-14 -
 1.8587798e-14 -1.3585577e-14 -8.2117646e-15 -2.7284841e-15 Soma: -
 4.6641933e-13
 31:-9.094947e-16 -2.7246677e-15 -4.5474735e-15 -6.146722e-15 -
 7.2683248e-15 -8.3067719e-15 -9.094947e-15 -9.9060204e-15 -
 1.0459189e-14 -1.055761e-14 -1.0701828e-14 -1.0459189e-14 -
 9.8907549e-15 -9.094947e-15 -8.1854523e-15 -6.9654282e-15 -
 5.4569682e-15 -4.0358827e-15 -2.4705793e-15 -8.5265128e-16 Soma: -
 1.380349e-13
 30:-2.2737368e-16 -6.7830464e-16 -1.1368684e-15 -1.3718748e-15 -
 1.9250435e-15 -2.1676827e-15 -2.5011104e-15 -2.7437497e-15 -

2.8421709e-15	-3.0542791e-15	-2.9711233e-15	-2.6147973e-15	-
2.5011104e-15	-2.3874236e-15	-2.0463631e-15	-1.7358337e-15	-
1.4210855e-15	-9.6633812e-16	-4.8105963e-16	-1.7053026e-16	Soma: -
3.5944123e-14				
29:	0	3.816391e-18	-2.2737368e-16	-4.6238013e-16 -
2.1974089e-16	-3.486933e-16	-3.4106051e-16	-3.5632608e-16	-
4.5474735e-16	-4.3948178e-16	-4.7001292e-16	-5.6843419e-16	-
4.5474735e-16	-3.4106051e-16	-5.6843419e-16	-5.9896533e-16	-
4.5474735e-16	-4.5474735e-16	-3.1052937e-16	-5.6843419e-17	Soma: -
7.1245093e-15				
28:	0	-2.2355728e-16	0	-2.3500646e-16 -
5.6080141e-16	-9.1712748e-16	-1.0231815e-15	-1.0384471e-15	-
9.094947e-16	-8.9422914e-16	-9.2476027e-16	-9.094947e-16	-
7.9580786e-16	-6.8212103e-16	-3.4106051e-16	-2.5790481e-16	-
1.1368684e-16	-5.6843419e-17	-2.631228e-17	-5.6843419e-17	Soma: -
9.9666803e-15				
27:-2.2737368e-16	-4.5093096e-16	-6.8212103e-16	-6.8975381e-16	-
6.7448824e-16	-4.6238013e-16	-3.4106051e-16	-3.5632608e-16	-
4.5474735e-16	-2.1210811e-16	-2.4263924e-16	-2.2737368e-16	-
3.4106051e-16	-3.4106051e-16	-3.4106051e-16	-2.5790481e-16	-
1.7053026e-16	-5.6843419e-17	3.0531139e-17	-5.6843419e-17	Soma: -
6.5560751e-15				
26:	0	3.816391e-18	0	-7.6327823e-18
7.6327824e-18	-7.6327826e-18		0	-1.5265566e-17
0	1.5265566e-17	-1.5265567e-17		0 -1.1368684e-16 -
2.2737368e-16	-2.2737368e-16	-2.5790481e-16	-2.8421709e-16	-
1.7053026e-16	-2.631228e-17	5.6843419e-17	Soma: -1.2696372e-15	
25:	02.3119007e-16	4.5474735e-16	6.7448824e-16	
6.8975381e-16	4.4711457e-16	3.4106051e-16	3.2579495e-16	
4.5474735e-16	2.4263924e-16	2.1210811e-16	2.2737368e-16	
4.5474735e-16	5.6843419e-16	5.6843419e-16	4.2421621e-16	
4.5474735e-16	2.2737368e-16	8.7374558e-17	-5.6843419e-17	Soma:
7.029502e-15				
24:2.2737368e-16	3.816391e-18		0	-2.3500646e-16 -
1.0605406e-16	2.1974089e-16	3.4106051e-16	3.2579495e-16	
2.2737368e-16	4.7001292e-16	3.2579495e-16	4.5474735e-16	
4.5474735e-16	3.4106051e-16	2.2737368e-16	1.9684254e-16	
1.1368684e-16	5.6843419e-17	8.7374558e-17	1.1368684e-16	Soma:
3.8462705e-15				
23:	02.3119007e-16	2.2737368e-16	2.1974089e-16	
1.2131962e-16	-2.3500646e-16	-3.4106051e-16	-3.5632608e-16	-
2.2737368e-16	-4.3948178e-16	-3.5632608e-16	-4.5474735e-16	-
4.5474735e-16	-3.4106051e-16	-2.2737368e-16	-2.5790481e-16	-
1.1368684e-16	-5.6843419e-17	-2.631228e-17	-5.6843419e-17	Soma: -
3.14547e-15				
22:-2.2737368e-16	-2.2355728e-16	-4.5474735e-16	-2.3500646e-16	-
3.3342773e-16	-1.2131962e-16	-1.1368684e-16	-2.4263924e-16	-
3.4106051e-16	-2.1210811e-16	-2.4263924e-16	-2.2737368e-16	-
2.2737368e-16	-2.2737368e-16	-2.2737368e-16	-2.5790481e-16	-
1.7053026e-16	-5.6843419e-17	3.0531139e-17	-5.6843419e-17	Soma: -
4.1686515e-15				
21:2.2737368e-16	2.3119007e-16	4.5474735e-16	4.4711457e-16	
6.8975381e-16	6.7448824e-16	7.9580786e-16	8.9422914e-16	
1.0231815e-15	9.2476027e-16	1.007916e-15	1.0231815e-15	
7.9580786e-16	6.8212103e-16	6.8212103e-16	5.3790305e-16	
3.9790393e-16	2.8421709e-16	2.010614e-16	5.6843419e-17	Soma:
1.2031723e-14				
20:6.8212103e-16	1.5954321e-15	2.5011104e-15	3.1755987e-15	
3.7592984e-15	4.1987802e-15	4.4337867e-15	4.4185211e-15	
4.4337867e-15	4.3353654e-15	3.8500869e-15	3.524292e-15	
3.1832315e-15	2.8421709e-15	2.2737368e-15	1.7884583e-15	

```

1.4779289e-15      1.080025e-15      5.4212191e-16      1.7053026e-16      Soma:
5.4266383e-14
19:-6.8212103e-16      -1.133052e-15      -1.8189894e-15      -2.2813695e-15      -
2.6071645e-15      -2.7361169e-15      -2.7284841e-15      -2.8574365e-15      -
2.7284841e-15      -2.5995317e-15      -2.2890023e-15      -2.0463631e-15      -
1.7053026e-15      -1.4779289e-15      -1.0231815e-15      -8.26339e-16      -
7.3896445e-16      -4.5474735e-16      -8.3155699e-17      0      Soma: -
3.2817735e-14
18:6.8212103e-16      1.1406848e-15      1.8189894e-15      2.266104e-15
2.6224301e-15      2.7208513e-15      2.7284841e-15      2.8269054e-15
2.7284841e-15      2.6300628e-15      2.2584712e-15      2.1600499e-15
1.9326762e-15      1.5916157e-15      1.0231815e-15      7.6527673e-16
7.3896445e-16      4.5474735e-16      1.4421798e-16      0      Soma:
3.3234318e-14
17:-6.8212103e-16      -1.3604257e-15      -2.2737368e-15      -2.7361169e-15      -
3.2892855e-15      -3.5319248e-15      -3.7516656e-15      -3.7669312e-15      -
3.7516656e-15      -3.6227132e-15      -3.3121839e-15      -3.1832315e-15      -
2.9558578e-15      -2.5011104e-15      -1.9326762e-15      -1.50846e-15      -
1.2505552e-15      -9.094947e-16      -3.6737279e-16      -5.6843419e-17      Soma: -
4.6744372e-14
16:
0      3.816391e-18      0-7.6327823e-18
7.6327824e-18      -7.6327826e-18      0      -1.5265566e-17
0      1.5265566e-17      -1.5265567e-17      0      0
0      0      -3.0531137e-17      0      0
8.7374558e-17      -5.6843419e-17      Soma: -1.9081956e-17
15:6.8212103e-16      1.3680584e-15      2.2737368e-15      2.7208513e-15
3.3045511e-15      3.5166592e-15      3.7516656e-15      3.7364001e-15
3.7516656e-15      3.6532444e-15      3.2816527e-15      3.1832315e-15
2.9558578e-15      2.5011104e-15      1.9326762e-15      1.4473978e-15
1.2505552e-15      9.094947e-16      3.7159165e-16      1.1368684e-16      Soma:
4.6706208e-14
14:-6.8212103e-16      -1.133052e-15      -1.8189894e-15      -2.2813695e-15      -
2.6071645e-15      -2.7361169e-15      -2.7284841e-15      -2.8574365e-15      -
2.7284841e-15      -2.5995317e-15      -2.2890023e-15      -2.1600499e-15      -
2.0463631e-15      -1.8189894e-15      -1.3642421e-15      -1.1673995e-15      -
9.6633812e-16      -7.3896445e-16      -2.5368596e-16      -5.6843419e-17      Soma: -
3.5034628e-14
13:6.8212103e-16      1.1406848e-15      1.8189894e-15      2.266104e-15
2.8498037e-15      2.8345382e-15      2.8421709e-15      2.8269054e-15
2.7284841e-15      2.6300628e-15      2.2584712e-15      2.1600499e-15
2.0463631e-15      1.8189894e-15      1.5916157e-15      1.2200241e-15
1.080025e-15      8.5265128e-16      4.2843507e-16      1.1368684e-16      Soma:
3.6190176e-14
12:-6.8212103e-16      -1.133052e-15      -1.8189894e-15      -2.2813695e-15      -
2.8345382e-15      -2.8498037e-15      -3.0695446e-15      -2.8574365e-15      -
2.9558578e-15      -2.8269054e-15      -2.516376e-15      -2.2737368e-15      -
2.1600499e-15      -1.9326762e-15      -1.5916157e-15      -1.2810864e-15      -
1.080025e-15      -8.5265128e-16      -3.6737279e-16      -1.1368684e-16      Soma: -
3.7478895e-14
11:2.2737368e-16      9.1331109e-16      1.5916157e-15      2.0387303e-15
2.3950564e-15      2.6071645e-15      2.8421709e-15      2.5995317e-15
2.6147973e-15      2.6300628e-15      2.2584712e-15      1.8189894e-15
1.5916157e-15      1.2505552e-15      9.094947e-16      7.6527673e-16
6.2527761e-16      3.9790393e-16      2.5790481e-16      5.6843419e-17      Soma:
3.0392147e-14
10:2.2737368e-16      2.3119007e-16      0      -7.6327823e-18
7.6327824e-18      -7.6327826e-18      0      -1.5265566e-17
0      1.5265566e-17      -1.5265567e-17      0      0
1.1368684e-16      0      -3.0531137e-17      0
0      3.0531139e-17      0      Soma: 5.4935223e-16
9: -4.5474735e-16      -1.133052e-15      -1.5916157e-15      -2.0539959e-15      -

```

```

2.4934776e-15  -2.7361169e-15  -2.8421709e-15  -2.7437497e-15  -
2.6147973e-15  -2.5995317e-15  -2.4026892e-15  -2.0463631e-15  -
1.7053026e-15  -1.3642421e-15  -1.1368684e-15  -9.4002584e-16  -
6.2527761e-16  -3.9790393e-16  -1.9684254e-16  -5.6843419e-17  Soma: -
3.2135614e-14
  8:2.2737368e-16  9.1331109e-16  1.5916157e-15  2.0387303e-15
2.6224301e-15  2.8345382e-15  3.0695446e-15  3.0542791e-15
2.8421709e-15  2.7437497e-15  2.5995317e-15  2.3874236e-15
2.1600499e-15  1.7053026e-15  1.4779289e-15  1.1063372e-15
7.9580786e-16  5.1159077e-16  2.5790481e-16  5.6843419e-17  Soma:
3.4996464e-14
  7:2.2737368e-16  2.3119007e-16  2.2737368e-16  2.1974089e-16
3.486933e-16  3.3342773e-16  4.5474735e-16  3.2579495e-16
4.5474735e-16  4.7001292e-16  4.3948178e-16  4.5474735e-16
4.5474735e-16  3.4106051e-16  2.2737368e-16  1.9684254e-16
2.2737368e-16  2.2737368e-16  2.010614e-16  5.6843419e-17  Soma:
6.1200073e-15
  6: 0 3.816391e-18 0-7.6327823e-18
7.6327824e-18 -7.6327826e-18 -1.1368684e-16 -1.5265566e-17
0 1.5265566e-17 -1.5265567e-17 0 0
0 0 -3.0531137e-17 0 0
3.0531139e-17 0 Soma: -1.3276879e-16
  5: -2.2737368e-16 -1.133052e-15 -1.8189894e-15 -2.0539959e-15 -
2.266104e-15 -2.3950564e-15 -2.2737368e-15 -1.834255e-15 -
1.4779289e-15 -7.805423e-16 -6.9738659e-16 -3.4106051e-16 -
2.2737368e-16 -1.1368684e-16 -1.1368684e-16 -1.4421797e-16 -
1.7053026e-16 -1.7053026e-16 -2.631228e-17 0 Soma: -
1.8265819e-14
  4: 09.1331109e-16 1.5916157e-15 1.8113566e-15
1.8266222e-15 1.9250435e-15 1.9326762e-15 1.4626633e-15
1.1368684e-15 5.8369976e-16 3.2579495e-16 -1.1368684e-16 -
2.2737368e-16 -2.2737368e-16 -1.1368684e-16 -1.4421797e-16 -
5.6843419e-17 -5.6843419e-17 -8.3155699e-17 -5.6843419e-17 Soma:
1.2429627e-14
  3:2.2737368e-16 -2.2355728e-16 -6.8212103e-16 -6.8975381e-16 -
1.0155488e-15 -1.3718748e-15 -1.4779289e-15 -1.2658208e-15 -
9.094947e-16 -5.5316862e-16 -2.4263924e-16 -1.1368684e-16 -
1.1368684e-16 -1.1368684e-16 -1.1368684e-16 -3.0531137e-17
0 5.6843419e-17 8.7374558e-17 0 Soma: -8.5455948e-15
  2: 0 3.816391e-18 2.2737368e-16 -7.6327823e-18
2.3500646e-16 3.3342773e-16 6.8212103e-16 6.6685546e-16
4.5474735e-16 2.4263924e-16 2.1210811e-16 3.4106051e-16
3.4106051e-16 3.4106051e-16 2.2737368e-16 1.9684254e-16 2.2737368e-
16 1.7053026e-16 2.010614e-16 1.1368684e-16 Soma: 5.2105126e-15
  1: 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 Soma: 0

```

APÊNDICE C_ Distribuição térmica da estrutura de metalon do Estudo de caso 2

Transcalv1.1 - Resultados da simulação

=====

*** Snapshot:

Tempo Atual:	25500	
Último tempo simulado:	25500	
No. de avanços executados:	51	
Avanços de Tempo (seg.):	500	
Número de volumes (OL/SN):	10	50

*** Estatísticas:

Temperatura:		
Global (min/máx):	10	74.998999
Local (min/máx):	20.001004	74.998999

Fluxo SN:		
Global (mín/máx):	-6416	41704
Local (mín/máx):	0.63148825	1769.6621

Fluxo LO:		
Global (mín/máx):	-52.067338	52.06749
Local (mín/máx):	-52.067338	52.06749

*** Resultados da Simulação

Temperatura:				
50:	72.323148	66.807139	61.290952	55.774647
50.258272	44.741869	39.225479	33.709146	
28.192922	22.676873			
49:	74.92003	71.17968	64.200529	57.504906
50.945947	44.412255	37.803892	31.012031	
23.897678	20.079999			
48:	74.996671	71.935927	65.481346	58.777689
51.916586	44.947981	37.897601	30.779425	
23.606466	20.00349			
47:	74.998518	74.995662	70.747378	62.56962
54.607255	46.792105	39.076049	31.423352	
23.805779	20.0013			
46:	74.998659	74.995995	70.956501	62.915285
54.942481	47.050711	39.240779	31.505283	
23.827806	20.001239			
45:	74.998538	74.995584	70.603151	62.166377
53.981162	45.99991	38.214549	30.658905	
23.420666	20.001127			
44:	74.998919	71.706587	64.725916	57.392516
49.756442	41.814857	33.512856	24.734038	
20.004958	20.00163			
43:	74.998868	71.500974	64.492363	57.461425
50.419893	43.396482	36.44023	29.629591	
23.089149	20.001022			
42:	74.998878	71.536796	64.616048	57.69985
50.793404	43.903559	37.03779	30.202021	
23.396462	20.001098			
41:	74.998883	71.553901	64.666926	57.782234

50.901306	44.025421	37.155368	30.291079	
23.43125	20.001111			
40:	74.998885	71.558868	64.681295	57.804393
50.928531	44.053958	37.180748	30.308762	
23.437635	20.001114			
39:	74.998886	71.56014	64.684938	57.809908
50.935139	44.060685	37.186551	30.312695	
23.439028	20.001114			
38:	74.998886	71.560451	64.685826	57.811243
50.936724	44.06228	37.187912	30.313609	
23.43935	20.001114			
37:	74.998886	71.560526	64.686039	57.811563
50.937102	44.062659	37.188234	30.313825	
23.439426	20.001114			
36:	74.998886	71.560544	64.68609	57.811639
50.937192	44.062749	37.188311	30.313876	
23.439444	20.001114			
35:	74.998886	71.560548	64.686103	57.811658
50.937214	44.062771	37.188329	30.313888	
23.439448	20.001114			
34:	74.998886	71.560549	64.686106	57.811662
50.937219	44.062776	37.188334	30.313891	
23.43945	20.001114			
33:	74.998886	71.56055	64.686106	57.811663
50.93722	44.062778	37.188335	30.313892	
23.43945	20.001114			
32:	74.998886	71.56055	64.686108	57.811665
50.937222	44.06278	37.188336	30.313893	
23.43945	20.001114			
31:	74.998886	71.560551	64.686111	57.811671
50.937229	44.062786	37.188342	30.313897	
23.439452	20.001114			
30:	74.998886	71.560557	64.686128	57.811695
50.937258	44.062815	37.188366	30.313913	
23.439457	20.001114			
29:	74.998886	71.560581	64.686195	57.811796
50.937377	44.062934	37.188468	30.313981	
23.439481	20.001114			
28:	74.998886	71.560681	64.686481	57.812223
50.937879	44.063435	37.188892	30.314264	
23.43958	20.001114			
27:	74.998886	71.561105	64.687685	57.814019
50.939989	44.065536	37.190665	30.315446	
23.439995	20.001115			
26:	74.998887	71.562922	64.692827	57.821638
50.94887	44.074312	37.19803	30.32033	
23.441704	20.001115			
25:	74.998889	71.571034	64.715462	57.854523
50.986403	44.110687	37.228069	30.340032	
23.448559	20.001117			
24:	74.998905	71.612487	64.823969	58.002318
51.145471	44.257481	37.344836	30.414702	
23.47421	20.001126			
23:	74.998989	71.939979	65.462625	58.713229
51.802844	44.798753	37.741421	30.655108	
23.554644	20.001152			
22:	74.998439	74.995247	70.453948	61.99997
53.959517	46.191883	38.601705	31.121948	
23.702517	20.001197			
21:	74.998985	71.930343	65.434449	58.670301
51.751101	44.745705	37.695273	30.623555	

23.543388	20.001148			
20:	74.998891	71.572076	64.707005	57.821477
50.921832	44.020098	37.129415	30.260349	
23.416529	20.001105			
19:	74.998844	71.432419	64.306853	57.198554
50.125973	43.117685	36.217682	29.493208	
23.046709	20.001004			
18:	74.998775	71.213227	63.630439	56.004142
48.301426	40.482707	32.497493	24.278454	
20.004328	20.001434			
17:	74.998778	71.22034	63.650174	56.032446
48.332919	40.511661	32.518502	24.28679	
20.004336	20.001437			
16:	74.998861	71.479301	64.430886	57.369545
50.312113	43.291043	36.356347	29.581854	
23.076578	20.001014			
15:	74.998986	71.92351	65.418419	58.644094
51.709506	44.688456	37.630948	30.569447	
23.520816	20.001139			
14:	74.998564	74.995664	70.713708	62.482863
54.490276	46.6692	38.969443	31.351124	
23.780122	20.001222			
13:	74.998567	74.995675	70.724312	62.509511
54.526875	46.708844	39.004916	31.375757	
23.788975	20.001225			
12:	74.998999	71.962014	65.532407	58.821531
51.929778	44.922866	37.844069	30.722365	
23.578021	20.00116			
11:	74.998907	71.618341	64.840791	58.027597
51.175225	44.287054	37.369727	30.431234	
23.479998	20.001128			
10:	74.99889	71.57244	64.719467	57.860516
50.993464	44.117734	37.234031	30.344008	
23.449954	20.001118			
9:	74.998887	71.563257	64.693779	57.823064
50.950551	44.075992	37.199452	30.32128	
23.442038	20.001115			
8:	74.998886	71.561185	64.687911	57.814358
50.940389	44.065936	37.191005	30.315673	
23.440075	20.001115			
7:	74.998886	71.560699	64.686531	57.8123
50.937973	44.063532	37.188976	30.314321	
23.439601	20.001114			
6:	74.998886	71.56057	64.686172	57.811779
50.937385	44.062972	37.188523	30.31403	
23.439501	20.001114			
5:	74.998884	71.560382	64.685718	57.811293
50.937096	44.062987	37.188777	30.31433	
23.439634	20.001116			
4:	74.998816	71.558457	64.681419	57.807171
50.935406	44.064612	37.192845	30.318591	
23.441547	20.001184			
3:	74.996556	71.533304	64.632486	57.763315
50.918182	44.081821	37.236688	30.367516	
23.466697	20.003444			
2:	74.920012	71.133077	64.077218	57.334831
50.760632	44.239369	37.66517	30.922783	
23.866923	20.079988			
1:	72.323138	66.807108	61.290903	55.774585
50.258204	44.741801	39.22542	33.709101	
28.192894	22.676863			

Fluxo SN (fluxo de Oeste para Leste):

50:	1717.4683	1769.5358	1769.5926	1769.6305
1769.6531	1769.6621	1769.6579	1769.6394	
1769.6045	1769.5487	1717.4815		
49:	51.308588	0.77774073	0.72583172	0.69634477
0.68213176	0.67950401	0.6872698	0.70635354	
0.73989273	0.79381992	51.327145		
48:	2.136028	0.63642839	0.67127644	0.69718032
0.71355476	0.72473495	0.73323952	0.74029031	
0.74598775	0.74917614	2.2392516		
47:	0.95065544	0.91644195	0.88335669	0.85048678
0.82808603	0.81277564	0.80246976	0.79588058	
0.79222759	0.79107522	0.83377411		
46:	0.86011456	0.8548585	0.83994247	0.8362864
0.82917165	0.82074409	0.81223292	0.80449166	
0.79845763	0.79566803	0.79466126		
45:	0.93776741	0.9478352	0.91332983	0.87742457
0.85126235	0.83005023	0.80967757	0.78578705	
0.75277686	0.71103345	0.72333189		
44:	0.69325107	0.68458317	0.72598978	0.7626737
0.79415169	0.82592479	0.86340818	0.91299709	
0.98332981	1.0678011	1.0455529		
43:	0.72610736	0.72732621	0.72889554	0.73121757
0.7323194	0.73043477	0.7234502	0.7083064	
0.68020608	0.64212212	0.65582935		
42:	0.71996043	0.71987955	0.71975788	0.71928463
0.71827035	0.71654388	0.71403997	0.71092006	
0.70777814	0.70600671	0.70473734		
41:	0.71640153	0.71632422	0.71624533	0.716008
0.71561652	0.7150921	0.71448547	0.71388616	
0.71342221	0.71323758	0.71302551		
40:	0.71531669	0.71529162	0.71526759	0.71519786
0.71508965	0.71495563	0.71481385	0.71468659	
0.7145972	0.71456474	0.71452776		
39:	0.71503395	0.71502729	0.71502105	0.71500313
0.71497595	0.71494328	0.71490991	0.71488102	
0.71486138	0.7148544	0.7148467		
38:	0.71496424	0.71496259	0.71496105	0.71495664
0.71495003	0.71494218	0.71493426	0.7149275	
0.71492294	0.71492133	0.71491958		
37:	0.71494741	0.71494701	0.71494664	0.71494557
0.71494397	0.71494208	0.71494019	0.71493857	
0.71493749	0.7149371	0.71493669		
36:	0.71494338	0.71494328	0.71494319	0.71494292
0.71494253	0.71494207	0.71494161	0.71494121	
0.71494095	0.71494084	0.71494074		
35:	0.71494242	0.71494239	0.71494237	0.7149423
0.71494219	0.71494207	0.71494195	0.71494184	
0.71494177	0.71494173	0.71494171		
34:	0.71494218	0.71494218	0.71494217	0.71494214
0.71494211	0.71494207	0.71494203	0.714942	
0.71494197	0.71494195	0.71494194		
33:	0.71494211	0.71494211	0.71494211	0.7149421
0.71494208	0.71494207	0.71494206	0.71494204	
0.71494203	0.71494202	0.71494201		
32:	0.71494203	0.71494203	0.71494204	0.71494204
0.71494205	0.71494207	0.71494209	0.7149421	
0.7149421	0.71494209	0.7149421		
31:	0.71494172	0.71494175	0.71494177	0.71494184
0.71494194	0.71494207	0.7149422	0.7149423	

0.71494237	0.71494238	0.71494241		
30:	0.71494044	0.71494057	0.71494069	0.71494101
0.71494149	0.71494207	0.71494265	0.71494313	
0.71494345	0.71494356	0.71494368		
29:	0.71493508	0.71493562	0.71493611	0.71493751
0.71493961	0.71494208	0.71494454	0.71494663	
0.71494802	0.71494849	0.71494902		
28:	0.71491249	0.71491478	0.71491688	0.71492284
0.71493173	0.71494216	0.71495254	0.7149613	
0.71496712	0.71496916	0.71497136		
27:	0.71481673	0.71482667	0.71483572	0.7148613
0.71489913	0.71494314	0.71498652	0.71502285	
0.7150469	0.7150553	0.71506432		
26:	0.714403	0.71444901	0.71448993	0.71460363
0.71476784	0.71495406	0.71513343	0.7152808	
0.7153771	0.71541054	0.71544597		
25:	0.71251697	0.7127628	0.7129795	0.71353765
0.71428454	0.71507451	0.71579222	0.71635593	
0.71671321	0.71683537	0.7169616		
24:	0.70276457	0.7041466	0.70600585	0.7094518
0.71311205	0.71635102	0.71891511	0.72073392	
0.72181119	0.72216727	0.72251672		
23:	0.64878708	0.63606791	0.67364483	0.70193716
0.71868004	0.72842547	0.73396253	0.73697655	
0.73844835	0.73888669	0.7392545		
22:	1.0018228	1.0238205	0.94428411	0.87921376
0.83620708	0.80783399	0.78937847	0.7778948	
0.77162077	0.76962523	0.76776227		
21:	0.6509321	0.63807088	0.67557299	0.70347134
0.71959681	0.72856125	0.73324495	0.73545867	
0.73633737	0.73654711	0.73665526		
20:	0.71160036	0.71254649	0.71396745	0.71609484
0.71756317	0.71778032	0.71663106	0.71438286	
0.71175727	0.710178	0.70900906		
19:	0.74199259	0.74157586	0.74105887	0.73926315
0.73554846	0.72886198	0.7176003	0.69934532	
0.67043583	0.6333015	0.6439567		
18:	0.78572037	0.78713894	0.78860993	0.79313488
0.80108252	0.81314676	0.8304623	0.85478007	
0.88873013	0.92843651	0.91987102		
17:	0.78405368	0.78566033	0.78729733	0.79224367
0.80075082	0.81341085	0.83128861	0.85609803	
0.89046175	0.9302197	0.92168832		
16:	0.7309743	0.73183109	0.7330352	0.73437952
0.73397294	0.73019122	0.72120841	0.7045473	
0.67654872	0.63951006	0.65050033		
15:	0.65047752	0.63949173	0.67652943	0.70452983
0.72119724	0.73018918	0.73398082	0.73439611	
0.73305764	0.73185556	0.73100111		
14:	0.92152594	0.93006872	0.89035833	0.85600787
0.83122907	0.81339194	0.80077477	0.79230511	
0.78738431	0.78575635	0.78415969		
13:	0.91920512	0.92779503	0.88815562	0.85433931
0.83019421	0.81307517	0.80120861	0.79343251	
0.78902534	0.78759658	0.78622526		
12:	0.64200705	0.63148825	0.66867919	0.69793105
0.71674234	0.72871886	0.73619492	0.74065718	
0.74301186	0.74374589	0.74440893		
11:	0.70141057	0.70292976	0.70486528	0.70857216
0.7126467	0.71636983	0.71940203	0.72160322	
0.72292858	0.72337043	0.72380993		

10:	0.71219991	0.71247058	0.71270924	0.71333087
0.71417343	0.71507592	0.71590516	0.7165624	
0.71698163	0.71712544	0.71727485		
9:	0.71432767	0.71437943	0.71442565	0.71455446
0.71474131	0.71495417	0.71516012	0.71532995	
0.71544122	0.71547991	0.715521		
8:	0.71479887	0.71481013	0.71482043	0.71484959
0.71489279	0.71494313	0.71499285	0.71503456	
0.71506221	0.71507187	0.71508229		
7:	0.71490974	0.71491111	0.71491343	0.71492005
0.71493003	0.71494189	0.71495386	0.71496409	
0.71497096	0.71497338	0.71497714		
6:	0.71497652	0.71493784	0.71493745	0.71493682
0.71493703	0.71493897	0.71494269	0.71494727	
0.71495109	0.71495259	0.7149925		
5:	0.71628113	0.71497646	0.71496516	0.71494015
0.7149165	0.71490737	0.71491782	0.7149426	
0.71496834	0.71497989	0.71628486		
4:	0.75933544	0.71536293	0.71521195	0.71492182
0.71466354	0.71456256	0.71466383	0.71492236	
0.71521265	0.71536368	0.75933626		
3:	2.2095098	0.72012304	0.71768505	0.71439386
0.71189376	0.71098163	0.71189382	0.71439396	
0.71768517	0.72012316	2.2095104		
2:	51.320061	0.78742726	0.73380936	0.70120823
0.68371673	0.67821134	0.68371675	0.70120828	
0.73380942	0.78742733	51.320078		
1:	1717.4749	1769.5422	1769.5985	1769.6348
1769.6551	1769.6617	1769.6552	1769.635	
1769.5989	1769.5427	1717.4755		
Soma:	3574.5981	3574.5981	3574.5983	3574.5984
3574.5985	3574.5986	3574.5988	3574.5989	
3574.599	3574.5992	3574.5993		

Fluxo OL (fluxo de Sul para Norte):

51:	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0 Soma:	0			
50:	52.06749	0.056824616	0.037812245	0.022486082
0.0089368832-	0.0042835892	-0.018474642	-0.035051134	-
0.055820083	-52.067322	Soma: 0.012597995		
49:	1.5366425	0.0049156058	0.0083253107	0.0082730889
0.006309151	0.0034822177	0.0006091107-	0.0015119369	-0.0018928759
-1.5339967	Soma: 0.031155494			
48:	0.037042893	0.039763658	0.034229205	0.024647552
0.017489348	0.011986804	0.007659914	0.0041855221	
0.0012955319	-0.043921173	Soma: 0.13437925		
47:	0.0028294025	0.0066783679	0.0013592992	0.002246823
0.0021789718	0.0016809436	0.0010707460.	0.00053255323	
0.00014317563	-0.0012222766	Soma: 0.017498006		
46:-	0.0024266517	-0.0082376954	-0.002296769	-0.0048679045
0.0062485733	-0.0068302068	-0.0066704975	-0.0055014591	-
0.0026464108	-0.0022290428	Soma: -0.047955211		
45:	0.0076411357	-0.042743098	-0.038202028	-0.031030099
-0.027460683	-0.027202843	-0.030561005	-0.038511633	-
0.044389806	0.010069405	Soma: -0.26239065		
44:-	0.0010267591	-0.0013364858	-0.0015180955	0.00044791275
0.0043124313	0.010280557	0.01902793	0.031821098	
0.040081481	-0.01217886	Soma: 0.089911211		
43:	0.00019209153	0.0002328457	0.00080394922	0.0015497579
0.002427823	0.0032960037	0.0038841436	0.0037207897	

0.0019975361 0.0015283745 Soma: 0.019633315
 42:0.00011121559 0.00011117636 0.00033071099 0.00053550027
 0.00070136521 0.0007921018 0.00076425776 0.00057887658
 0.0002261219 0.00025900557 Soma: 0.004410332
 41: 3.390133e-053.2290016e-05 9.3398256e-05 0.00014403215
 0.00017696095 0.00018549003 0.00016496625 0.00011493962
 4.1502618e-05 4.6945265e-05 Soma: 0.0010344265
 40: 8.835573e-068.2658449e-06 2.3675089e-05 3.5845485e-05
 4.2952131e-05 4.3724072e-05 3.7720425e-05 2.5568593e-05
 9.0578078e-06 9.9669182e-06 Soma: 0.00024561194
 39:2.1784761e-06 2.0234471e-06 5.7734918e-06 8.6788005e-06
 1.0298606e-05 1.036753e-05 8.8455573e-06 5.940818e-06
 2.0929886e-06 2.2774066e-06 Soma: 5.8477122e-05
 38:5.2588068e-07 4.8706375e-07 1.3876709e-06 2.0801608e-06
 2.4591996e-06 2.465324e-06 2.0949581e-06 1.4024864e-06
 4.9320949e-07 5.3459258e-07 Soma: 1.3930546e-05
 37:1.2592548e-07 1.1650048e-07 3.317264e-07 4.9673815e-07
 5.86422e-07 5.8696531e-07 4.980502e-07 3.3303911e-07
 1.170447e-07 1.2669559e-07 Soma: 3.3191074e-06
 36:3.0087219e-08 2.7823669e-08 7.9208608e-08 1.1856178e-07
 1.3989319e-07 1.3994136e-07 1.1867808e-07 7.9324944e-08
 2.787189e-08 3.0155839e-08 Soma: 7.9154658e-07
 35:7.2950023e-09 6.7446518e-09 1.9199136e-08 2.8733442e-08
 3.3896311e-08 3.3900578e-08 2.8743745e-08 1.9209441e-08
 6.7489225e-09 7.3005823e-09 Soma: 1.9177181e-07
 34:2.2463695e-09 2.0771391e-09 5.9125182e-09 8.8481037e-09
 1.0437055e-08 1.0437404e-08 8.8489457e-09 5.9133602e-09
 2.0774882e-09 2.2472482e-09 Soma: 5.9045632e-08
 33:2.6686322e-09 2.4671768e-09 7.022594e-09 1.0508907e-08
 1.2395447e-08 1.2395145e-08 1.050818e-08 7.0218664e-09
 2.4668753e-09 2.6683e-09 Soma: 7.0123123e-08
 32: 9.591519e-098.8669358e-09 2.5238335e-08 3.7766088e-08
 4.454329e-08 4.4539515e-08 3.7756975e-08 2.522922e-08
 8.8631576e-09 9.5861293e-09 Soma: 2.5198116e-07
 31:3.9892718e-08 3.6874818e-08 1.049524e-07 1.5703209e-07
 1.8518676e-07 1.8514415e-07 1.569292e-07 1.0484949e-07
 3.6832161e-08 3.9832551e-08 Soma: 1.0475263e-06
 30:1.6756566e-07 1.5483938e-07 4.4063283e-07 6.5909833e-07
 7.7698669e-07 7.7650612e-07 6.5793777e-07 4.3947165e-07
 1.5435797e-07 1.6688449e-07 Soma: 4.3942809e-06
 29:7.0582616e-07 6.5162533e-07 1.8535602e-06 2.770399e-06
 3.2626895e-06 3.2572726e-06 2.7573107e-06 1.8404548e-06
 6.4618864e-07 6.9811704e-07 Soma: 1.8443444e-05
 28:2.9925759e-06 2.7553867e-06 7.8280232e-06 1.1674472e-05
 1.371171e-05 1.3650761e-05 1.1526987e-05 7.6800021e-06
 2.6938563e-06 2.9050002e-06 Soma: 7.7418775e-05
 27: 1.292899e-051.1809724e-05 3.3421486e-05 4.9525923e-05
 5.7731731e-05 5.7049427e-05 4.7868058e-05 3.1746119e-05
 1.1108531e-05 1.1926548e-05 Soma: 0.00032511654
 26:5.8938498e-05 5.273048e-05 0.00014713212 0.00021375546
 0.00024396153 0.00023643314 0.00019525826 0.00012806262
 4.455915e-05 4.7363532e-05 Soma: 0.0013681916
 25:0.00030476266 0.0002694422 0.00070529556 0.00096066141
 0.0010339425 0.00095416095 0.00075898054 0.00048535611
 0.00016673208 0.00017359754 Soma: 0.0058129315
 24: 0.0016867965 0.0021286955 0.0041512591 0.004620924
 0.0042729246 0.0035182711 0.0025778074
 0.00156264310.00052282096 0.00052305557 Soma: 0.025565198
 23: -0.011032367 0.039705618 0.032443602 0.021363814
 0.014018374 0.0090553423 0.005591846 0.00303445580.00096117959
 0.00089086769 Soma: 0.11603273

```

22:      0.010965336      -0.039830847      -0.032626746      -0.021642845
-0.014354703-0.0094001571      -0.005891812      -0.0032395541      -
0.0010343415      -0.000972094      Soma: -0.11802776
21:-0.0018958833      -0.002328732      -0.0047283856      -0.0055173542      -
0.0053902516      -0.0047164438      -0.0036780761      -0.0023608382      -
0.00082458186      -0.00086394378      Soma: -0.03230449
20:-0.00094975721      -0.00090776977      -0.0026009838      -0.0040490035      -
0.0051730842      -0.0058656877      -0.0059262648      -0.0049864186      -
0.0024038287      -0.0020328861      Soma: -0.034895684
19:-0.0013664929      -0.001424751      -0.004396692      -0.0077636752      -
0.011859553      -0.017127352      -0.024181227      -0.033895899      -
0.039538143      0.0086223223      Soma: -0.13293146
18:5.2083919e-05      4.6238598e-05      0.00012827591      0.0001839766
0.00020470785      0.00018820241      0.00013655786      5.4185003e-05
0.0001682403      5.6790844e-05      Soma: 0.0012192593
17:      0.0016587307      0.0016832467      0.0050746299      0.0086911391
0.012864756      0.018065983      0.024945996      0.034417916
0.039926202-0.0084746249      Soma: 0.13885397
16:      0.0025155245      0.0028873562      0.0064189666      0.0082845724
0.0090830537      0.0090831815      0.0082849058      0.0064193552
0.0028875481      0.0025156495Soma: 0.058380114
15:-0.0084702632      0.039925065      0.034419375      0.024951997
0.018075008      0.012874836      0.0087002138      0.0050809011
0.0016854844      0.0016612056      Soma: 0.13890382
14:7.2525515e-05      0.0002146312      6.892638e-05      0.00017321179
0.0002378907      0.00025768845      0.00023057367      0.00016011118
5.7546553e-05      6.454908e-05      Soma: 0.0015376545
13:      0.0086624398      -0.039424815      -0.033747385      -0.02397187
-0.016881128      -0.011608859      -0.007545503-0.0042470446      -
0.0013712017      -0.0013067604      Soma: -0.13144213
12:-0.0018563601      -0.002233873      -0.0044955036      -0.0051605728      -
0.0049045953      -0.0041327814      -0.0030832256      -0.0018923529      -
0.00063714833      -0.00064371896      Soma: -0.029040132
11:-0.00033716679      -0.00029835654      -0.00078860441      -0.0010860233      -
0.0011814442      -0.0011005749      -0.00088202079      -0.00056697014      -
0.00019528542      -0.00020422109      Soma: -0.0066406676
10:-6.6492408e-05      -5.9692459e-05      -0.00016696809      -0.00024344309      -
0.00027893531      -0.00027132575      -0.00022476071      -0.00014773257      -
5.1457362e-05      -5.4807772e-05      Soma: -0.0015656155
9:      -1.4724999e-05      -1.3468289e-05      -3.8141972e-05      -5.6587237e-05      -
6.6054815e-05      -6.5364428e-05      -5.4910208e-05      -3.6448011e-05      -
1.2759601e-05      -1.3709604e-05      Soma: -0.00037216916
8:      -3.4647161e-06      -3.1580307e-06      -8.9705283e-06      -1.3374388e-05      -
1.570175e-05      -1.5624436e-05      -1.3187352e-05      -8.7828742e-06      -
3.0800251e-06      -3.2860171e-06      Soma: -8.8630117e-05
7:      -2.0870297e-06      -8.3610881e-07      -2.3372946e-06      -3.3854924e-06      -
3.823487e-06      -3.6407826e-06      -2.9427822e-06      -1.8916856e-06      -
6.4964622e-07      4.7980513e-07      Soma: -2.1114504e-05
6:      -4.0769135e-05      -1.2203781e-06      -2.9518625e-06      -3.1598428e-06      -
1.8764031e-06      9.8139039e-08      1.6522493e-06      1.94442e-06
8.6644472e-07      4.038631e-05      Soma: -5.0300588e-06
5:      -0.0013454469      -1.2517525e-05      -2.7942483e-05      -2.6796901e-05      -
1.0986945e-05      1.0563982e-05      2.643832e-05      2.7702864e-05
1.2433343e-05      0.0013453563      Soma: -1.1959544e-06
4:      -0.045317949      -0.00016349306      -0.00031806169      -0.00028506393
-0.000111953      0.00011185528      0.0002849811      0.00031800636
0.00016347364      0.045317943      Soma: -2.6113332e-07
3:      -1.5347047      -0.002601474      -0.0036092431      -0.0027851415      -
0.0010240769      0.0010240662      0.0027851328      0.0036092378
0.0026014726      1.5347052      Soma: 4.8750929e-07
2:      -52.067338      -0.056219371      -0.036210355      -0.020276629      -

```

0.0065294556	0.0065294994	0.020276671	0.036210392	
0.0562194	52.067355	Soma: 1.7677187e-05		
1:	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0 Soma: 0				