

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

DESIGN CONSTRUTAL E MODELAGEM COMPUTACIONAL APLICADOS À AVALIAÇÃO
GEOMÉTRICA DE CANAIS ABERTOS EM UM PROCESSO DE INFUSÃO DE RESINA

por

Glauciléia Maria Cardoso Magalhães

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Modelagem Computacional

Rio Grande, julho de 2016

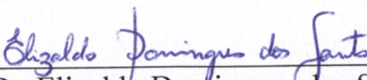
Glauciléia Maria Cardoso Magalhães

“Design Construtal e Modelagem Computacional Aplicados a Avaliação Geométrica de Canais Abertos em um Processo de Infusão de Resina”


Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área concentração: Modelagem Computacional.

Aprovada em

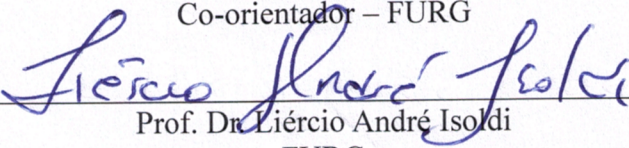
BANCA EXAMINADORA



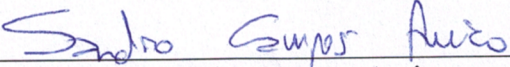
Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Orientador – FURG



Prof. Dr. Jeferson Avila Souza
Co-orientador – FURG



Prof. Dr. Liércio André Isoldi
FURG



Prof. Dr. Sandro Campos Amico
UFRGS

Rio Grande - RS
2016

Dedico este trabalho aos meus pais, Antônio Celso Luiz Magalhães e Maria Nazira Cardoso Magalhães, que tenho como exemplo de luta, persistência e muita coragem. Sem eles nenhum sonho valeria à pena.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pois tudo que tenho e tudo que sou devo a ELE.

Ao meu admirável orientador, Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos, pelo excelente trabalho. Agradeço pela dedicação, amizade, compreensão, colaboração e apoio.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Jeferson Avila Souza, pelos seus ensinamentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, pela oportunidade de realizar esta Dissertação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro concedido.

À Universidade Federal do Rio Grande (FURG), por toda a estrutura disponibilizada e principalmente pela assistência estudantil.

Ao prof. Dr. Liércio André Isoldi, pela presteza e disponibilidade em ajudar.

Ao prof. Dr. Sandro Campos Amico, pelas suas contribuições que foram fundamental para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Celso e Nazira, e aos meus irmãos, Grêisse, Celso e Wglesio, pelo amor, apoio e por tudo que fizeram e fazem por mim.

Aos meus sobrinhos, Juliana, Walisson e Rebeca, pela alegria e inspiração para continuar.

À Rogério, pelo companheirismo, encorajamento e apoio.

À Vanessa, pela amizade e pela disposição para ajudar em todos os momentos.

Aos meus amigos da CEU/FURG, Natália, Leidiane, Kamilla, Lucas, João Paulo e Cleiton, pelos bons momentos e por terem ajudado a suportar momentos difíceis.

À Fabiane Harter e Jaque Scotton, pela amizade e parceria.

À Pastoral Universitária da FURG, pelo conforto nos momentos de angústia.

Enfim, agradeço a todos que acreditaram no meu potencial, contribuindo assim por mais essa conquista.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma investigação numérica de um processo de infusão de resina líquida, que consiste na injeção de uma resina polimérica em um molde fechado composto por um meio fibroso e um canal aberto que facilita o escoamento da resina ao longo do domínio. No âmbito industrial, o método da tentativa e erro tem sido normalmente empregado para a definição geométrica dos canais, o que pode levar a elevado tempo de injeção e falha durante as fases iniciais da produção de um novo componente em material compósito. O principal objetivo do trabalho é aplicar o Design Construtal para orientar o projeto neste tipo de processo. Mais precisamente, é investigada a influência da geometria de canais abertos em forma de “I” e “T” inseridos em uma placa retangular bidimensional com um meio poroso, sobre o tempo de infusão da resina. O canal em forma de “I” tem como grau de liberdade a relação L_0/H_0 (relação entre a espessura e o comprimento do canal), enquanto que o canal em forma de “T” tem três graus de liberdade: L_0/H_0 (relação entre a espessura e o comprimento do ramo simples), L_1/H_1 (relação entre o comprimento e a espessura do ramo bifurcado) e H_0/H_1 (relação entre o comprimento do ramo simples e a espessura do ramo bifurcado). A avaliação numérica do efeito da geometria sobre o tempo de infusão foi realizada através do Design Construtal e a otimização geométrica através da Busca Exaustiva (BE). As equações de conservação de massa e quantidade de movimento para a mistura de resina e ar e uma equação para o transporte da resina foram resolvidas com o Método dos Volumes Finitos (MVF). A interação entre as fases foi tratada com o método *Volume of Fluid* (VOF). A resistência do meio poroso foi considerada através da lei de Darcy. Os resultados mostraram a importância do emprego do Design Construtal na minimização do tempo de injeção de resina no meio poroso. As melhores geometrias com o canal em forma de “I” foram as com uma maior penetração na placa porosa para a região de saída. Para o canal em forma de “T” as geometrias de pior desempenho são restritas na região inferior da placa e o desempenho é melhorado quando o ramo principal tem elevada inserção no meio poroso para a região da saída e a razão entre as espessuras do ramo simples e bifurcados não seja muito elevada ou pequena. Quando comparado o desempenho dos canais em forma de “I” e em forma de “T” sobre o tempo de infusão, os resultados mostraram que a geometria três vezes otimizada para o canal em forma de “T” é cerca de 192,0 % melhor que a geometria ótima para o canal em forma de “I”. Neste sentido, os resultados mostraram a importância da avaliação geométrica para o processo de infusão de resina líquida e a aplicação do Design Construtal para racionalizar o projeto desse tipo de processo.

Palavras-chaves: Infusão de resina líquida, Avaliação geométrica, Design Construtal, Simulação numérica.

ABSTRACT

This work presents the numerical investigation of a liquid resin infusion process, which consists of injecting a polymeric resin in a closed mold comprise of a fibrous medium and an open channel which facilitates the spread of the resin throughout the domain. In the industrial field, the method of trial and error has been often employed for the geometrical definition of the channels, which can lead to high injection time and degree of failure during the initial stages of the production of a new component made of composite material. The main objective is to apply the Constructal Design to guide the project in this type of process. More specifically, the influence of the geometry of open channels in the shape of "I" and "T" inserted into a two-dimensional rectangular plate with a porous medium on resin infusion time is investigated. The channel in the form of "I" has as degree of freedom the relation L_0/H_0 (relation between the thickness and the length of the channel), while the channel in the form of "T" has three degrees of freedom: L_0/H_0 (relation between thickness and length of the single branch), L_1/H_1 (relationship between length and thickness of the forked branch) and H_0/H_1 (relationship between length of the branch simple and thickness of the forked branch). The numerical evaluation of the effect of the geometry on the infusion time was performed using the Constructal Design and geometric optimization by Exhaustive Search (BE). The mass conservation equations and amount of movement to the mixture of resin and air, and an equation for the transport of the resin were resolved with the Finite Volume Method (MVF). The interaction between the phases was treated with the Volume of Fluid method (VOF). The resistance to flow in the porous medium is addressed by Darcy law. The results showed the importance of the Constructal Design for minimising resin injection time. The best geometries with the channel in the form of "I" were those with greater penetration into the porous plate to the outlet region. For the "T" channel, the worst performance geometries are restricted in the lower region of the plate and performance is improved when the main branch has high insertion into the porous medium towards the outlet region and the ratio between the thicknesses of the simple branch and bifurcated is not too high or low. When compared the performance of the channels regarding infusion times, the results showed that the geometry three times optimized for the channel in the form of "T" is approximately 192.0 % better than the geometry for the channel in the form of "I". In this sense, the results showed the importance of evaluating the injection strategy in liquid molding and the application of Constructal Design to rationalize the design of this type of process.

Keywords: Liquid resin infusion, Geometric evaluation, Constructal Design, Numerical Simulation.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Estado da Arte	17
1.2	Objetivos.....	21
1.2.1	Objetivo Geral.....	21
1.2.2	Objetivos Específicos.....	21
1.3	Delineamento do Texto	22
2	FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE INFUSÃO	24
2.1	Materiais Compósitos	24
2.2	Processos de fabricação	25
2.2.1	Moldagem por Transferência de Resina (RTM).....	26
2.2.2	Moldagem por Transferência de Resina <i>Light</i> (LRTM).....	26
2.2.3	Infusão de Resina Líquida (LRI)	27
3	FUNDAMENTOS DA TEORIA CONSTRUTAL.....	31
4	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	36
4.1	Modelo Volume of Fluid (VOF)	36
4.2	Descrição e Aplicação do Design Construtal ao Problema	38
5	MODELAGEM NUMÉRICA BASEADA NO FLUENT.....	43
5.1	Método dos Volumes Finitos (MVF)	44
5.1.1	Discretização Temporal das Equações de Conservação	45
5.1.2	Tratamento dos Termos Advectivos das Equações de Conservação	45
5.1.3	Acoplamento Pressão-Velocidade	46
5.1.4	Método <i>Geo-Reconstruction</i>	47
5.2	Procedimentos Numéricos.....	47
5.2.1	Verificação do Modelo Numérico.....	48
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
6.1	Resultados da Avaliação Geométrica para um Canal em Forma de “I”	52
6.2	Resultados da Avaliação Geométrica para um Canal em Forma de “T”	58
6.3	Resultados da Avaliação Geométrica para Diferentes Configurações de Canais Abertos.....	74
7	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	77
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Ilustração da estratégia de injeção e a posição dos canais de injeção (BROUWER et al., 2003)	17
Figura 1.2 - Ilustração da da estratégia de injeção composta por duas linhas de vácuo e uma linha de resina (GOMES et al., 2012).....	19
Figura 2.1 - Ilustração do processo de RTM	26
Figura 2.2 - Ilustração do processo de RTM <i>Light</i> (Adaptado de AOC: World Leader in Resin Technology, 2016)	27
Figura 2.3 - Ilustração do processo de LRI (Adaptado de Kuentzer et al., 2007)	28
Figura 2.4 - Exemplo de aplicações industriais do processo de LRI nos setores: a) de energia eólica, b) náutico (Brouwer et al. 2003)	28
Figura 2.5 - Tipos de arranjo das linhas de alimentação da matriz: a) sequencial simples, b) sequencial duplo, c) sequencial alternado, d) composto, e) central, f) espinha de peixe (MARINUCCI 2011) .	30
Figura 3.1 - Exemplos de formas e estruturas de sistemas de fluxo e comparação entre padrões presentes na natureza (BEJAN e ZANE, 2012).....	32
Figura 3.2 - Cavidade em Y para um corpo condutor bidimensional com geração de calor uniforme (Lorenzini et al., 2014).....	34
Figura 4.1 - Ilustração do domínio computacional do processo de LRI a ser simulado com o canal aberto em forma de “I”	38
Figura 4.2 - Ilustração do domínio computacional do processo de LRI a ser simulado com o canal aberto em forma de “T”	39
Figura 4.3 - Fluxograma ilustrando o processo de otimização do canal em forma de “T” no processo de Infusão de Resina Líquida.....	42
Figura 5.1 - (a) Interface Real e (b) Interface <i>Geo-Reconstruction</i> (Adaptado de FLUENT 6.3, 2007)	47
Figura 5.2 - Comparação entra a posição da linha de frente da resina em função do tempo obtida no presente trabalho e a solução analítica.....	51
Figura 6.1 - Efeito da razão L_0/H_0 sobre o tempo de preenchimento no molde poroso para diferentes frações de área do canal aberto em forma de “I”	54
Figura 6.2 - Influência da razão entre a área do canal e a área da placa (ϕ) sobre o tempo de injeção mínimo no molde poroso com o canal aberto em forma de “I”	56
Figura 6.3 - Influência da razão entre a área do canal e a área da placa (ϕ) sobre a razão L_0/H_0 ótima	

$(L_0/H_0)_o$	56
Figura 6.4 - Fração volumétrica da resina em função do tempo para $\phi = 0,010$ e três diferentes razões de L_0/H_0 : $(L_0/H_0)_o = 0,015$ (ótima global), $L_0/H_0 = 1,0$ (pior caso), $L_0/H_0 = 90,0$ (ótima local).....	58
Figura 6.5 - Fração volumétrica da resina em função do tempo para $\phi = 0,100$ e duas diferentes razões de L_0/H_0 : $(L_0/H_0)_o = 0,11$ (ótima), $L_0/H_0 = 7,0$ (pior caso).....	59
Figura 6.6 - Efeito da razão L_1/H_1 no tempo de preenchimento do molde para vários valores da razão L_0/H_0 e $H_0/H_1 = 10,00$	61
Figura 6.7 - Efeito da razão L_1/H_1 no tempo de preenchimento do molde para vários valores da razão L_0/H_0 e $H_0/H_1 = 20,00$	61
Figura 6.8 - Efeito da razão L_1/H_1 no tempo de preenchimento do molde para vários valores da razão L_0/H_0 e $H_0/H_1 = 30,00$	62
Figura 6.9 - Efeito da razão L_1/H_1 no tempo de preenchimento do molde para vários valores da razão L_0/H_0 e $H_0/H_1 = 40,00$	62
Figura 6.10 - escoamento de resina com formação de vazios permanentes para $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$, $H_0/H_1 = 10,0$, $L_1/H_1 = 8,0$ e duas diferentes razões de L_0/H_0	63
Figura 6.11 - Fração volumétrica da resina em função do tempo para $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$, $H_0/H_1 = 40,0$, $L_0/H_0 = 0,1$ e duas diferentes razões de L_1/H_1	65
Figura 6.12 - Efeito da razão L_0/H_0 no tempo de infusão uma vez minimizado, t_m , para diferentes razões de H_0/H_1	66
Figura 6.13 - Efeito da razão L_0/H_0 sobre a razão L_1/H_1 uma vez otimizada, $(L_1/H_1)_o$, para diferentes razões de H_0/H_1	67
Figura 6.14 - Efeito da razão H_0/H_1 ao longo do tempo de infusão duas vezes minimizado, t_{mm} , e as respectivas formas ótimas, $(L_0/H_0)_o$, $(L_1/H_1)_{oo}$	68
Figura 6.15 - Ilustração das melhores formas geométricas para o canal aberto em forma de “T” no domínio analisado para $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$, para as diferentes razões de H_0/H_1 estudadas: $H_0/H_1 = 10,0$, $H_0/H_1 = 20,0$, $(H_0/H_1)_o = 30,0$ e $H_0/H_1 = 40,0$	70
Figura 6.16 - Fração volumétrica da resina em função do tempo para $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$, $H_0/H_1 = 10,0$, para três diferentes razões de L_0/H_0	71
Figura 6.17 - Fração volumétrica da resina em função do tempo para $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$, $(H_0/H_1)_o = 30,0$, para duas diferentes razões de L_0/H_0	72
Figura 6.18 - Ilustração do domínio computacional do processo de LRI a ser simulado com o canal aberto em forma de “duplo-T” (a) e “Y” (b).....	74
Figura 6.19 - Efeito da geometria dos canais abertos no tempo de preenchimento da resina no molde.....	75

Figura 6.20 - Efeito da razão L_1/H_0 no tempo de preenchimento do molde poroso com o canal aberto em forma de "T" 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Teste de independência de passo de tempo para uma canal aberto em forma de “T” com $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$ e $L_0/H_0 = 4,0$	49
Tabela 5.2 - Teste de independência de malha para uma canal aberto em forma de “T” com $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$ e $L_0/H_0 = 4,0$	49
Tabela 6.1 - Dimensões H_0 e L_0 para a simulação do processo de LRI para um canal aberto em forma de “T” com $\phi = 0,005$	53
Tabela 6.2 - Dimensões H_0 e L_0 para a simulação do processo de LRI para um canal aberto em forma de “T” com $\phi = 0,100$	53
Tabela 6.3 - Relação das razões ótimas e o tempo de injeção duas vezes minimizado para diferentes razões de H_0/H_1 , $\phi = 0,05$ e $H/L = 1$	69

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área do meio poroso [m ²]
A_0	Área do canal [m ²]
A_T	Área do canal em forma de "T" [m ²]
\vec{F}	Forças externas por unidade de volume [N/m ³]
f	Fração volumétrica
g	Aceleração do campo gravitacional [m/s ²]
H	Altura do molde [m]
H_0	Comprimento do canal simples [m]
H_1	Espessura do canal bifurcado [m]
K	Permeabilidade [m ²]
L	Largura do molde [m]
L_0	Espessura do canal simples [m]
L_1	Comprimento do canal bifurcado [m]
P	Pressão [Pa]
P_{in}	Pressão de injeção [Pa]
P_{out}	Pressão de saída [Pa]
t	Tempo [s]
\vec{v}	Vetor velocidade [m/s]
X_f	Posição da linha de frente da resina

Símbolos gregos

ρ	Massa específica [kg/m ³]
μ	Viscosidade dinâmica [Pa s]
ε	Porosidade
ϕ	Relação entre área da seção transversal do canal e área da placa

τ Tensor de cisalhamento [Pa]

Δ Variação da componente em relação ao tempo ou ao espaço

Sub índices

o Uma vez otimizado

oo Duas vezes otimizado

ooo Três vezes otimizado

oooo Quatro vezes otimizado

m Uma vez minimizado

mm Duas vezes minimizado

mmm Três vezes minimizado

mmmm Quatro vezes minimizado

T Transposto

LISTA DE ABREVIATURAS

BE	Busca Exaustiva
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
EDP	Equação Diferencial Parcial
FE/CV	<i>Finite Element /Control Volume</i>
LCM	Moldagem Líquida de Compósitos
LRI	Infusão de Resina Líquida (<i>Liquid Resin Infusion</i>)
LRTM	Moldagem por Transferência de Resina Light (<i>Light Resin Transfer Molding</i>)
MVC	Método do Volume de Controle (<i>Control Volume Method</i>)
MDF	Método de Diferenças Finitas (<i>Finite Difference Method</i>)
MEF	Método de Elementos Finitos (<i>Finite Element Method</i>)
MVF	Método dos Volumes Finitos (<i>Finite Volume Method</i>)
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
RTM	Moldagem por Transferência de Resina (<i>Resin Transfer Molding</i>)
SCRIMP	Processo de Seemann para a Moldagem de Compósitos por Infusão de Resina (<i>Seeman Composites Resin Infusion Molding Process</i>)
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
VARTM	<i>Vacuum Assisted Resin Transfer Molding</i>
VIP	<i>Vacuum Infusion Process</i>
VOF	<i>Volume of Fluid</i>

1 INTRODUÇÃO

Com o mercado cada vez mais exigente e com o rápido crescimento da indústria dos materiais compósitos, a competição entre as empresas se torna cada dia mais acirrada, buscando continuamente componentes fortes, leves e de rápida fabricação. Com isso há a necessidade de novas técnicas de fabricação e da racionalização dos processos já utilizados para melhorar as propriedades mecânicas dos materiais empregados nas mais diversas aplicações.

Desde a década de 40, os materiais compósitos vêm conquistando seu lugar nas indústrias automotiva, aeronáutica e naval devido as suas diversas vantagens. Por exemplo, pode-se citar a baixa massa específica, excelente resistência à corrosão, facilidade na produção de geometrias complexas como carcaças, carenagens, capacetes, entre outros (PARDINI e GONÇALVES, 2009; POODTS et al., 2013).

Neste sentido, diversas técnicas industriais foram desenvolvidas para a fabricação de materiais compósitos. É possível destacar os processos de Moldagem Líquida de Compósitos (LCM – do inglês: *Liquid Composite Molding*), tais como Moldagem por Transferência de Resina (RTM – do inglês: *Resin Transfer Molding*), Moldagem por Transferência de Resina *Light* (LRTM – do inglês: *Light - Resin Transfer Molding*) e Infusão de Resina Líquida (LRI – do inglês: *Liquid Resin Infusion*) que têm sido amplamente aplicados para produzir vários componentes tais como: painéis para veículos, cascos de barcos, pavimentos, pás de turbinas eólicas, entre outros (BROUWER et al., 2003; YENILMEZ e SOZER, 2009; POODTS et al., 2013).

Os processos de Infusão de Resina Líquida (LRI) estão possibilitando a produção de peças estruturais grandes, espessas e complexas e consiste na injeção de uma resina polimérica através de canais abertos, inseridos em um domínio com meio fibroso, o que torna mais fácil o escoamento da resina ao longo do domínio do molde (WANG et al., 2012).

Uma das maiores dificuldades em aplicar o processo de infusão está relacionada com o preenchimento do molde, ou seja, garantir que o reforço fibroso seja impregnado completamente pela resina no interior do molde. Como consequência, vários estudos têm sido realizados no âmbito analítico, experimental e numérico a fim de melhorar a compreensão acerca do escoamento de resina no processo de infusão (GONCHAROVA et al., 2015).

Para fabricar com qualidade um componente de material compósito polimérico por infusão, é necessário que se evite a formação de vazios em seu interior. A presença de vazios provoca efeitos prejudiciais nas propriedades mecânicas da peça, como baixa resistência ao cisalhamento, à compressão, ao impacto e à fadiga. A formação de vazios está relacionada com a pressão de injeção,

com a pressão de saída, com as propriedades da resina e com as características do reforço fibroso como, por exemplo, tipo e orientação das fibras (JINLIAN et al., 2004).

Com o aumento do domínio das técnicas de projeto, entre elas a evolução dos softwares de simulação numérica, o mercado se volta para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas de produção que tragam maior competitividade através do efeito de escala e maior produtividade. Vale destacar que, no âmbito industrial, o método da tentativa e erro é usualmente empregado para a definição da geometria e posicionamento dos canais, gerando, assim, um elevado risco de falha durante as fases iniciais da produção de um novo componente (POODTS et al., 2013).

O presente trabalho propõe a aplicação da Modelagem Computacional, do Design Construtal e da Busca Exaustiva (BE) para a racionalização do projeto em processos de infusão de resina, o que ainda não foi explorado na literatura. Por outro lado é possível observar na literatura que, de uma forma geral, o uso do Design Construtal associado à modelagem computacional tem sido bem sucedido para a recomendação da forma e estrutura em diversos problemas de engenharia, tais como: projetos de eletrônica, conversores de energia das ondas, refrigeração, problemas de transferência de calor e até mesmo em problemas de análise estrutural (ROCHA et al., 2005; KUNDU & BHANJA, 2010; XIE et al., 2010; LORENZINI et al., 2014; RODRIGUES et al., 2015).

Mais precisamente, no presente trabalho é apresentado um estudo idealizado do processo de infusão (simulação do princípio de funcionamento) investigando a influência da geometria de canais abertos em forma de “I” e “T” inseridos em uma placa retangular bidimensional com um meio poroso (que simula o reforço fibroso) sobre o tempo de infusão da resina. Acredita-se que o trabalho apresente contribuição para o estado-da-arte na área do processo de Infusão de Resina Líquida (LRI) devido à aplicação de uma metodologia científica para a definição das geometrias a serem empregadas nos canais abertos, bem como no âmbito do Design Construtal, visto que é uma aplicação pouco explorada.

No presente estudo, o avanço da resina é modelado através das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte de fração volumétrica. A discretização destas equações é realizada através do Método dos Volumes Finitos (MVF) (SCHLICHTING, 1979; PATANKAR, 1980; VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995). Para lidar com o escoamento de ar e resina é empregado o método *Volume of Fluid* (VOF) (HIRT e NICHOLS, 1981). Na região do meio poroso também é considerada uma força de campo resistente ao escoamento da resina modelada através da Lei de Darcy.

Para a realização do estudo da geometria dos canais, o uso da modelagem computacional é de fundamental importância. No presente estudo são empregados os softwares GAMBIT® (para a realização do pré-processamento como desenho do domínio, imposição das condições de contorno e

definição das diferentes regiões do escoamento) e FLUENT® (para o processamento e pós-processamento da solução).

1.1 Estado da Arte

Brouwer et al. (2003) descreveram formas para melhorar a confiabilidade e previsibilidade da tecnologia de VARTM (do inglês: *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*), a fim de diminuir o custo do desenvolvimento e tornar o risco de falhas durante o processo de produção o menor possível. Primeiramente os autores apresentaram métodos apropriados para conseguir o processamento do material compósito livre de vazios. Além disso, os autores salientaram que a viabilidade do processo VARTM para a fabricação de estruturas muito grandes e complexas é determinada principalmente pelos seguintes aspectos: geometria do produto, materiais utilizados no produto e estratégia de injeção, sendo que os dois primeiros não podem ter grandes variações porque já são prescritos no projeto estrutural. Contudo, a estratégia de injeção pode ser avaliada no sentido de otimizar o processo. Neste caso os autores estudaram a posição dos canais de injeção, utilizando como ferramenta o software RTM-Worx® para simular numericamente o escoamento de resina num casco de barco. A estratégia de injeção adotada pelos autores consiste em um canal de injeção principal deslocando da popa para a proa (através da quilha) e canais ramificados do canal principal, conforme ilustra a Fig. 1.1.

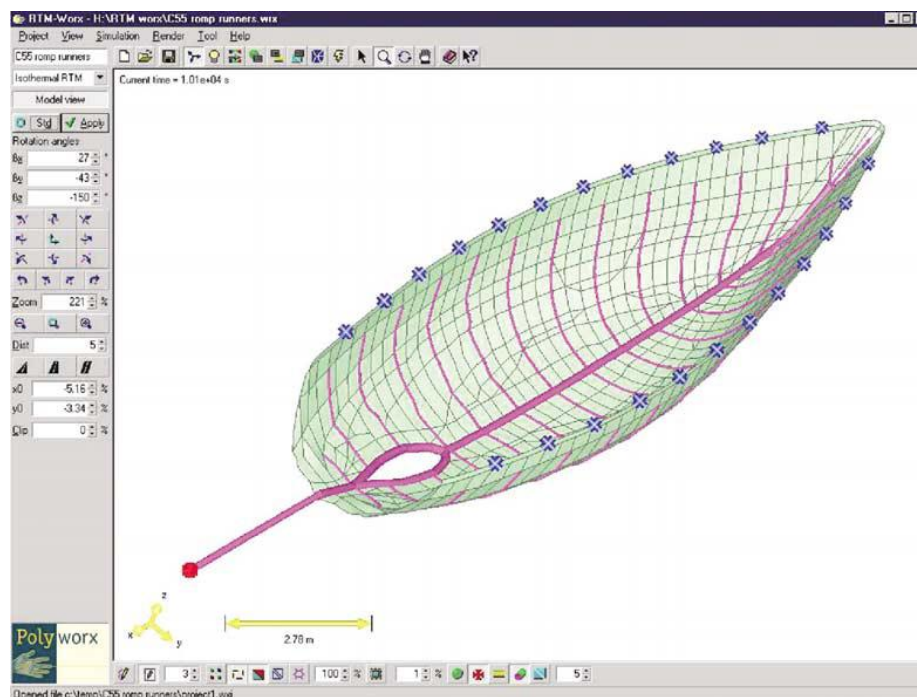


Figura 1.1 - Ilustração da estratégia de injeção e a posição dos canais de injeção (BROUWER et al., 2003).

Posteriormente, Ribeiro et al. (2007) mostraram que é possível modelar e simular numericamente o processo RTM de fabricação de compósitos através do Método dos Volumes Finitos (MVF), utilizando o aplicativo FLUENT[®]. Eles estudaram o avanço linear e o avanço radial da linha de frente do fluxo de resina. Os resultados numéricos tiveram boa concordância com os analíticos.

Celle et al. (2008) desenvolveram um modelo numérico a fim de otimizar os parâmetros dos processos de fabricação e monitorar o processo de infusão. Tal modelo representa um escoamento transiente de resina no meio poroso considerando a interação mecânica entre as deformações do meio poroso e o escoamento da resina durante a infusão. A implementação deste modelo foi realizada, computacionalmente, utilizando um código de elementos finitos por meio das bibliotecas Pro-Flot e o software PAM - RTM.

Oliveira et al. (2011) apresentaram e discutiram resultados para o tempo de injeção em um processo de RTM com os métodos numéricos MVF/VOF (do inglês: *Finite Volume Method /Volume of Fluid*) e FE/CV (do inglês: *Finite Element /Control Volume*). Para comparação entre os métodos, foram utilizadas as soluções numéricas apresentadas pelos softwares comerciais: FLUENT[®] e PAM-RTM. As soluções numéricas foram validadas por comparação com resultados experimentais. Verificou-se que os modelos numéricos desenvolvidos foram capazes de resolver os problemas de RTM estudados. Os autores salientaram ainda a importância dos resultados do modelo numérico obtido com o FLUENT[®], pois o mesmo é um aplicativo genérico para dinâmica dos fluidos computacional, o que demonstra a eficácia dos métodos numéricos MVF e VOF.

Gomes et al. (2012) realizaram um estudo numérico e experimental para a caracterização do processo VARTM para a obtenção de compósitos de carbono e epóxi. Os autores utilizaram o software RTM-Worx[®], baseado no FE/CV, para simular o processo VARTM através de um molde poroso, que consistiu em uma longarina em forma de “C”. A fim de executar as simulações, foram determinados previamente a viscosidade da resina, a permeabilidade do meio e a fração de volume das fibras através de ensaios experimentais. Com o intuito de avaliar a melhor estratégia de infusão, foram estudadas três configurações para o posicionamento das linhas de entrada de resina e saída de vácuo. Foram considerados os seguintes casos: duas linhas de vácuo e uma linha de resina, uma linha de vácuo e uma linha de resina e uma linha de vácuo e uma linha de resina nas bordas da longarina. A melhor proposta de infusão para fabricar a longarina em “C” foi o primeiro caso supracitado, ilustrado na Fig. 1.2, devido à não formação de vazios e ao menor tempo de preenchimento do molde.

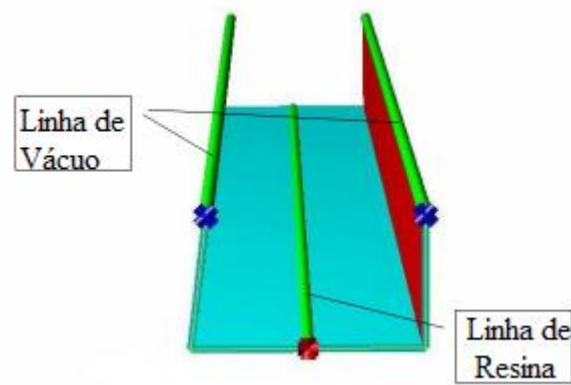


Figura 1.2 - Ilustração da estratégia de injeção composta por duas linhas de vácuo e uma linha de resina (GOMES et al., 2012).

Isoldi et al. (2012) realizaram um estudo numérico de um escoamento de resina simulando o princípio de funcionamento dos processos RTM e LRTM. Neste estudo, diversas aplicações de RTM foram consideradas. No que tange à abordagem matemática e numérica, a solução baseou-se no método VOF (do inglês: *Modelo Volume of Fluid*) e utilizou-se o software comercial FLUENT® para a solução aproximada das equações de conservação do problema. Neste estudo, vários casos foram resolvidos numericamente e comparados com resultados analíticos, experimentais e numéricos da literatura. A diferença máxima entre estas soluções foi cerca de 8,0%. Além disso, uma nova metodologia computacional foi desenvolvida para simular um processo por Moldagem por Transferência de Resina *Light* (LRTM), que consiste na injeção de resina num molde através de uma borda, sem substrato poroso, que circunda todo o perímetro do molde, o que torna o preenchimento mais homogêneo e rápido.

Porto et al. (2012) avaliaram numericamente o processo de RTM e LRTM em geometrias complexas. Mais precisamente, os autores propuseram uma solução desenvolvida no software FLUENT® para estudar o comportamento do escoamento da resina no processo LRTM. Além disso, duas geometrias tridimensionais foram simuladas numericamente, considerando os processos de RTM e LRTM. Foi mensurado o tempo total de injeção da resina no molde para os processos RTM e LRTM, sendo observado que o tempo necessário para o preenchimento do molde é significativamente mais elevado para o processo RTM tradicional do que para o processo LRTM. Os resultados numéricos obtidos mostraram que tal diferença está relacionada com o aumento do gradiente de pressão no processo LRTM em comparação com o processo RTM. Isso ocorre devido à maior magnitude da pressão ser distribuída ao longo de uma borda e não em alguns pontos discretos de injeção.

Wang et al. (2012) realizaram um estudo numérico e experimental do processo de infusão de resina em condições industriais. Para tal estudo, foi utilizado o modelo proposto por Celle et al. (2008) e uma comparação entre os resultados das simulações numéricas e os experimentais foi realizada. Os autores verificaram que, a partir da predição numérica, pode ser determinado o tempo e a qualidade de preenchimento do molde e salientaram que a abordagem numérica e experimental conjunta é a melhor maneira de aprimorar o conhecimento sobre os processos de infusão de resina e, assim, desenvolver ferramentas de simulação para a concepção de peças complexas.

Poodts et al. (2013) realizaram um estudo numérico de um processo VARI em componentes estruturais do tipo sanduíche. Estes desenvolveram uma estrutura sanduíche e validaram uma abordagem para modelar estruturas deste tipo, utilizando um código de elementos finitos por meio do software PAM-RTM e através de um experimento padronizado para a caracterização dos laminados e obtenção de dados confiáveis de permeabilidade. Os testes foram realizados com resina epóxi, fibras de carbono e o núcleo de PVC. Os dados obtidos foram aplicados para a validação da simulação das fases de produção da estrutura sanduíche. Os autores ressaltaram que a tentativa e erro é o método mais utilizado para a definição de estratégias de injeção. Dessa forma, o interesse para a aplicação de metodologias numéricas, como a empregada neste estudo, para a otimização de processos de infusão de resina é de crescente atenção.

Grössing et al. (2015) realizaram um estudo com o propósito de comparar soluções numéricas e experimentais para o avanço da resina durante um processo de LCM. Mais especificamente, os autores compararam a viabilidade técnica de empregar dois softwares (PAM-RTM[®] e OpenFOAM) para a obtenção das soluções numéricas do escoamento da resina. Primeiramente, foi verificado que as soluções numéricas conduziram a soluções validadas em comparação com resultados experimentais. Verificou-se que ambos os softwares apresentaram resultados muito semelhantes para simulações de meios porosos. Além disso, foi salientado que para casos onde há meios que contêm muito pouco ou nenhum material poroso, o software PAM-RTM[®] requer a definição da porosidade como sendo igual a 1, bem como é necessário impor um valor de permeabilidade, ao passo que no software OpenFOAM se consegue calcular o escoamento da resina em meios não porosos sem nenhuma configuração específica, ou seja, sem fornecer dados “fictícios” de permeabilidade e porosidade.

Como pode ser visto nos trabalhos mencionados, apesar da realização de vários estudos experimentais e numéricos, poucos trabalhos focam na avaliação da influência da geometria de canais de escoamento de resina em processos de Moldagem Líquida de Compósitos. Vale destacar que, muitos dos trabalhos indicaram que a racionalização da geometria e o emprego de metodologias numéricas representam uma contribuição para a área. No âmbito do Design Construtal, ao

conhecimento dos autores, somente o trabalho de Isoldi et al. (2013) empregaram esta metodologia para o efeito da geometria no tempo de injeção durante um processo de Moldagem de Transferência de Resina *Light* (LRTM). Mais precisamente, foi avaliado o efeito da razão entre largura e espessura da borda sem reforço fibroso no tempo final de injeção de resina no molde fibroso. Os resultados indicaram uma possibilidade de reduzir substancialmente o tempo injeção no processo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

No presente trabalho, tem-se o objetivo de investigar numericamente a influência da geometria de canais abertos em forma de “I” e “T” inseridos em uma placa retangular bidimensional com um meio poroso sobre o tempo de infusão da resina. A avaliação do efeito da geometria sobre o tempo de infusão é realizada através da Modelagem Computacional, do *Design Constructal* e da Busca Exaustiva (BE). O problema é submetido a duas restrições geométricas, que são a área da placa com meio fibroso e a área dos canais abertos em forma de “I” e “T”.

1.2.2 Objetivos Específicos

O estudo desenvolvido aqui tem como objetivos específicos:

- ✓ Verificar o modelo numérico adotado pela comparação do avanço da resina em função do tempo de infusão e a solução analítica;
- ✓ Avaliar o efeito da razão L_0/H_0 (relação entre a espessura e o comprimento do canal) para um canal em forma de “I” sobre o tempo de infusão e a distribuição da resina ao longo do material com meio poroso;
- ✓ Estudar o efeito da razão entre a área do canal e a área da placa (ϕ), para um canal em forma de “I”, sobre o tempo de infusão mínimo (t_m) e sobre a razão L_0/H_0 ótima ($(L_0/H_0)_o$);
- ✓ Avaliar o efeito das razões geométricas L_0/H_0 (relação entre a espessura e o comprimento do ramo simples), L_1/H_1 (relação entre o comprimento e a espessura do ramo bifurcado) e H_0/H_1 (relação entre a comprimento do ramo simples e a espessura do ramo bifurcado) para um canal em forma de “T”, para $\phi = 0,05$, sobre o tempo de infusão de resina no domínio analisado e avaliar a distribuição da resina ao longo do material com meio poroso;
- ✓ Comparar o desempenho dos canais em forma de “I” e em forma de “T”, para $\phi = 0,05$, em relação tempo de infusão;

- ✓ Realizar um estudo simplificado baseado na comparação do tempo de infusão da resina com quatro diferentes configurações de canais abertos: em forma de “I”, em forma de “T”, “duplo-T” e em forma de “Y”;
- ✓ Avaliar a influência da geometria sobre a formação de vazios no interior do molde;
- ✓ Gerar, através da modelagem computacional e do Design Construtal, uma recomendação teórica sobre a definição da geometria dos canais abertos inseridos em um meio poroso.

1.3 Delineamento do Texto

O texto deste estudo apresenta em seu Capítulo 1 uma introdução ao problema de infusão de resina a ser pesquisado. É realizada uma breve discussão sobre os materiais compósitos e apresentada a proposta deste trabalho. Este capítulo ainda apresenta um estado da arte envolvendo processos de Moldagem Líquida de Compósitos, o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa e a estrutura de texto deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre materiais compósitos e comentários sobre alguns tipos de processos de fabricação destacando o processo de infusão e aspectos abordados na literatura a respeito das variáveis envolvidas no referido processo, bem como o funcionamento do mesmo, as vantagens e desvantagens.

O Capítulo 3 aborda aspectos básicos encontrados na bibliografia sobre conceitos relacionados com a Teoria Construtal e o método Design Construtal. Aborda também conceitos sobre Busca Exaustiva (BE).

O Capítulo 4 trata da modelagem matemática empregada para a simulação de um processo de infusão, bem como o modelo Multifásico *Volume of Fluid* (VOF) utilizado para a abordagem do escoamento bifásico de resina e ar. Além disso, também é apresentada a descrição e aplicação do Design Construtal ao problema.

O Capítulo 5 apresenta aspectos relacionados à modelagem numérica dos escoamentos, o Método de Volumes Finitos (MVF) a ser utilizado para as simulações e os procedimentos numéricos. Também é apresentado o modelo numérico empregado, o estudo de independência de passo de tempo e independência de malha.

O Capítulo 6 apresenta e discute os resultados referentes à avaliação da influência geométrica dos canais abertos em forma de “I” e em forma de “T” inseridos em uma placa retangular bidimensional com um meio poroso sobre o tempo de infusão da resina. Também é discutida a influência da geometria sobre a formação de vazios no interior do molde e é feita uma comparação de desempenho dos canais, para $\phi = 0,05$, sobre o tempo de infusão. Além disso, é apresentado um

estudo simplificado, onde a espessura e a soma de todos os comprimentos dos canais são consideradas iguais, para a avaliação geométrica de quatro diferentes configurações de canais abertos: em forma de “I”, em forma de “T”, “duplo-T” e em forma de “Y”.

O Capítulo 7 traz as conclusões referentes ao estudo da influência geométrica dos canais em um processo de infusão. Além disso, são apresentadas sugestões de continuidade do trabalho.

Finalmente o Capítulo 8 apresenta as referências que orientaram esta pesquisa.

2 FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE INFUSÃO

2.1 Materiais Compósitos

A manufatura dos materiais compósitos baseia-se na combinação de dois ou mais materiais constituintes distintos que, geralmente, diferem em composição química e/ou física, com o objetivo de obter propriedades específicas, diferentes daquelas que cada constituinte apresenta separadamente. Cada um dos constituintes mantém suas propriedades físicas e químicas, embora o material resultante dessa combinação normalmente apresente propriedades superiores às dos constituintes individuais (RUDD et al., 1997; MARINUCCI, 2011; REZENDE et al., 2011).

É importante salientar que pelo menos um constituinte do material compósito apresenta característica filamentar, fibrosa ou particulada, dispersa e envolta em fase contínua denominada matriz (ligante). Existem na natureza vários exemplos destes materiais. É o caso da madeira (fibras de celulose envolvidas por resina natural chamada lignina) (ABMACO, 2009).

Nas mais antigas civilizações, intuitivamente, já se tinha a ideia de combinar materiais para obter outros materiais diferenciados, como tijolos de argila com fibras de madeira e outras fibras naturais. Em 1940, ocorreu a primeira grande utilização em uma aplicação moderna de reforço plástico utilizando fibra de vidro. Esta foi baseada na estrutura natural do bambu para a fabricação de varas de pesca (REZENDE et al., 2011).

As propriedades dos compósitos estão diretamente associadas às propriedades dos elementos constituintes do material, tais como propriedades da fibra e da matriz, concentração ou frações volumétricas, interface e adesão fibra/matriz, disposição das camadas e orientação, bem como pela geometria do filamento, tal como forma e tamanho (RUDD et al., 1997; MARINUCCI, 2011).

Para fabricação de compósitos a escolha da matriz a ser empregada depende da aplicação final do compósito. As matrizes mais comumente utilizadas para a fabricação de compósitos estruturais são as poliméricas termofixas, como as resinas epóxi, poliéster, fenólica e viniléster. Componentes que necessitam de grande escala de produção e requisitos de resistência inferiores utilizam, em geral, os polímeros termoplásticos. Para matrizes metálicas utiliza-se o alumínio, o níquel e o titânio, enquanto que, para matrizes cerâmicas, o carbetto de silício, o nitreto de silício e a alumina (RUDD et al., 1997; MARINUCCI, 2011).

Compósitos de matriz polimérica utilizam como elemento de reforço a fibra de carbono, a fibra de vidro e a fibra aramida, sendo que, em muitas aplicações não estruturais, são empregadas as fibras naturais, tais como fibras de coco, juta, sisal e abacaxi (MARINUCCI, 2011).

O desenvolvimento da tecnologia dos compósitos poliméricos avançados tem como uma de suas finalidades formar um conjunto de materiais que combine elevadas resistência e rigidez e baixa massa específica. Essa combinação é resultante da união de reforços de fibras com polímeros, o que torna os compósitos particularmente atrativos como substituintes das ligas metálicas em aplicações aeroespaciais, náuticas e terrestres. Como exemplo de aplicações civis, entre outras, são fabricadas estruturas de satélites, tanques de armazenagem, barcos, tubos, artigos esportivos, chassi e carenagem de automóveis de competição, componentes de aviões e veículos de transporte, piscinas e banheiras, telhas, estações compactas de tratamento de água e equipamentos para o aproveitamento da energia eólica (RUDD et al., 1997; MARINUCCI, 2011; REZENDE et al., 2011).

2.2 Processos de fabricação

Na elaboração de um componente estrutural utilizando materiais compósitos, procura-se otimizar as propriedades mecânicas associadas aos reforços e ao material polimérico. A seleção desses elementos deve levar em conta não só aspectos relacionados ao custo das matérias-primas para que possam atender ao desempenho esperado, mas também à técnica de fabricação utilizada (MARINUCCI, 2011).

A qualidade de um produto empregando-se material compósito é fortemente influenciada pelo processo de fabricação. A escolha inadequada do processo pode elevar o custo de produção contribuindo para a perda de competitividade do produto. Em indústrias como a nuclear, a naval e a aeroespacial, por exemplo, em que a confiabilidade é um dos fatores mais importantes para aceitação de um produto, há a necessidade de se ter na fabricação a menor dispersão possível dos parâmetros de processo. Nesse contexto, a escolha correta do processo contribui significativamente para o sucesso de um empreendimento (MARINUCCI, 2011).

Processos cada vez mais inovadores permitem também o aumento da produtividade, reduzindo custos e aumentando a competitividade. Alguns destes processos de produção se enquadram em um grupo conhecido como Moldagem Líquida de Compósitos (LCM), destaca-se a Moldagem por Transferência de Resina (RTM), Moldagem por Transferência de Resina *Light* (LRTM) e Infusão de Resina Líquida (LRI) que são exemplos de processos que conduzem a um aumento da capacidade produtiva das empresas (MARINUCCI, 2011).

Na sequência, serão apresentados esses processos de fabricação com uma descrição dos mesmos. Maior destaque será dado ao processo de infusão, foco deste trabalho.

2.2.1 Moldagem por Transferência de Resina (RTM)

A moldagem por transferência de resina (RTM) tem como princípio básico a injeção sob pressão da resina líquida pré-catalisada e do agente de cura em uma cavidade onde o material de reforço está devidamente posicionado. O espaço para colocação do reforço é delimitado por um par de moldes tipo macho-fêmea, conforme ilustra a Fig. 2.1. As principais etapas do processo são: a colocação do reforço no molde (por exemplo fibras, mantas e tecidos de vidro, carbono ou aramida), o enchimento do molde e a polimerização da resina. Esse processo apresenta vantagens, como possibilidade de fabricação de peças com geometrias complexas, sendo bastante utilizado pelas indústrias aeronáutica e automotiva (ABMACO, 2008; MARINUCCI, 2011).

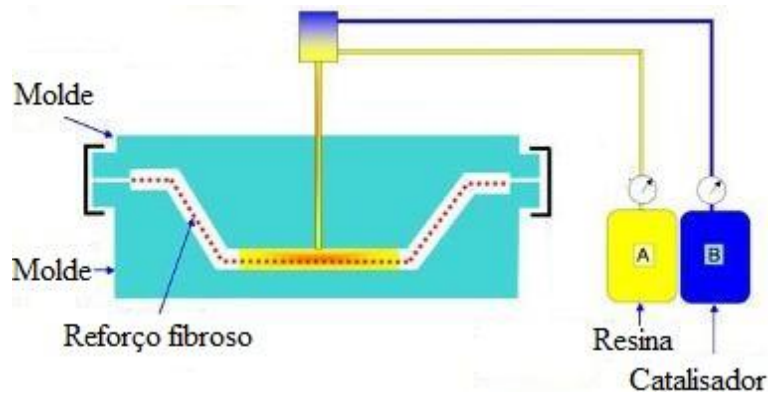


Figura 2.1 - Ilustração do processo de RTM (Adaptado de Oliveira et al., 2011).

2.2.2 Moldagem por Transferência de Resina *Light* (LRTM)

Esse processo, surgiu da combinação da moldagem por transferência de resina (RTM) com as vantagens da moldagem à vácuo, ou seja, o processo tem semelhança com o RTM, porém utiliza vácuo para fechamento dos moldes (Fig. 2.2). A transferência da resina para impregnação do reforço é feita empregando-se baixas pressões e temperatura ambiente, o que possibilita moldes mais simples e baratos que os do processo RTM. Isso permite fabricar moldes de material compósito que aliam resistência e baixo peso e oferecem grande versatilidade ao projeto. Os processos supracitados também se diferem com relação à injeção, no processo de RTM, a mesma é feita através de pontos discretos, enquanto que no processo de LRTM a resina é injetada pelas bordas (canaleta na Fig. 2.2) (MARINUCCI, 2011; PORTO, 2012).

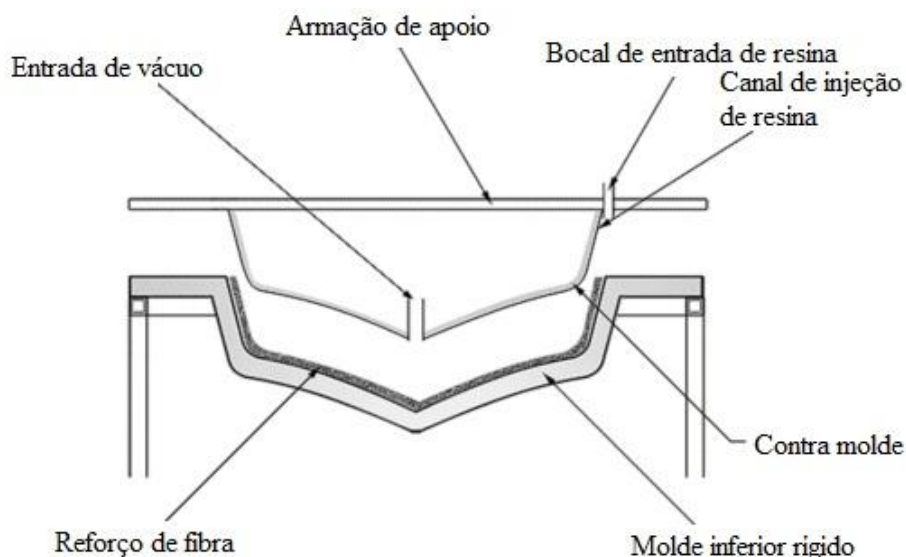


Figura 2.2 - Ilustração do processo de LRTM (Adaptado de AOC: World Leader in Resin Technology, 2016).

2.2.3 Infusão de Resina Líquida (LRI)

O processo de laminação por Infusão de Resina Líquida (LRI), também conhecido por VARTM, SCRIMP, VIP e uma variedade de outras abreviaturas, é usado para a laminação de peças estruturais grandes, com alto grau de qualidade mecânica (ABMACO, 2009). O processo é indicado para fabricação, por exemplo, de peças de ônibus, partes de veículos ferroviários e rodoviários de transporte de carga, iates, veleiros e pás eólicas (MARINUCCI, 2011).

O processo de infusão é uma técnica que pode ser considerada como sendo de moldagem fechada, embora não tenha um par de moldes tradicionais como nos processos vistos anteriormente. Isso porque utiliza apenas o molde que dará a forma geométrica à peça e um saco de vácuo. A Fig. 2.3 ilustra o processo. Essa técnica consiste nas seguintes etapas: 1) o reforço seco é colocado no molde na quantidade necessária para obter a espessura desejada para a estrutura; 2) sobre o reforço é colocado um filme plástico que deve ser devidamente selado por um adesivo que envolve toda a parte periférica do molde, formando o que se denomina de saco de vácuo; 3) utilizando uma bomba de vácuo, o ar que eventualmente esteja aprisionado no reforço é retirado e ocorre simultaneamente uma compactação do reforço contra o molde e 4) a resina é introduzida no interior do molde, através de canais abertos, e flui para o molde impregnando o reforço fibroso. A força motriz para o escoamento da resina é a imposição de uma diferença de pressão. Após a impregnação ser completada ocorre a cura da resina e a peça é desmoldada (BROUWER et al., 2003; MARINUCCI, 2011; WANG et al., 2012).

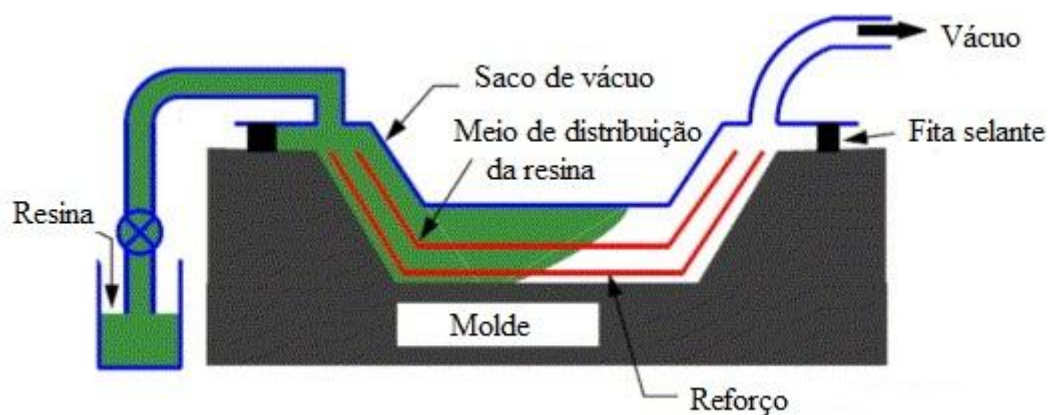


Figura 2.3 - Ilustração do processo de LRI (Adaptado de Kuentzer et al., 2007).

Os processos de infusão oferecem um grande número de benefícios frente às tradicionais tecnologias existentes. Componentes fabricados por infusão têm boa qualidade, boas propriedades mecânicas, sendo resistentes e leves, visto que os teores de fibra alcançados chegam a 70% e apresentam baixo teor de vazios. Possibilitam também economia de resina e reduzem quase que totalmente a emissão de produtos orgânicos voláteis, tal como o estireno, no ambiente de trabalho. Além disso o processo caracteriza-se pela rapidez e facilidade de preparação e manuseio dos materiais (BROUWER et al., 2003; LOPES, 2009; MARINUCCI, 2011).

Os maiores mercados para o processo de infusão são os setores náutico e o de energia eólica, principalmente para a manufatura de estruturas de grandes dimensões, como por exemplo cascos de embarcações e as pás de turbinas eólicas que têm, entre outras dimensões, comprimentos que podem alcançar mais de 20 m e 50 m, respectivamente. Uma ilustração dos exemplos supracitados é apresentada na Fig. 2.4 (BROUWER et al., 2003; MARINUCCI, 2011).



a)

b)

Figura 2.4 – Exemplo de aplicações industriais do processo de LRI nos setores: a) de energia eólica, b) náutico (Brouwer et al. 2003).

Apesar de se caracterizar como um processo simples, a LRI requer a definição de um projeto específico e detalhado em cada produto diferente, com o principal objetivo de reduzir o tempo de produção, sem a criação de vazios no interior de componente, que representam pontos fracos e contribuem para a fragilidade do laminado (JINLIAN et al., 2004; LOPES, 2009). Neste sentido, a principal dificuldade encontrada durante o planejamento do processo de infusão remete para o tamanho, a forma e o tipo de laminado que se pretende fabricar. Isso leva à requisição de diferentes disposições dos canais para cada formato de peça, para permitir o escoamento completo por todo o laminado, sem que ocorra defasagem da progressão do escoamento nem solidificação da resina injetada antes da infusão estar completa (LOPES, 2009).

O projeto de infusão necessita de estudos preliminares para dimensionamento de pontos de injeção no molde para que todo o reforço seja impregnado adequadamente. A estratégia de injeção que define a localização dos canais de entrada e saída de resina tem elevada importância, uma vez que influencia significativamente o tempo de preenchimento do molde. Entende-se que o tempo de infusão para a fabricação de uma determinada estrutura pode ser reduzido se forem inseridos mais pontos de injeção no molde. No entanto, a principal preocupação durante a definição da estratégia de injeção é o preenchimento de todos os espaços livres existentes no material de reforço, para não originar um laminado com pontos secos que são pontos fracos do material e levarão à falha estrutural (LOPES, 2009; MARINUCCI, 2011).

A definição da melhor estratégia para atingir o menor tempo de preenchimento e sem espaços vazios no molde pode ser desenvolvida através da modelagem computacional do escoamento de resina no meio fibroso. As simulações numéricas podem otimizar o processo, reduzindo o tempo de trabalho e o desperdício de material. Dependendo da extensão do laminado (área), há estratégias estabelecidas do arranjo das linhas de injeção (LOPES, 2009; MARINUCCI, 2011). A Fig. 2.5 ilustra alguns exemplos desses arranjos para o processo de infusão, onde estão representados o sequencial simples, o sequencial duplo, o sequencial alternado, o composto, o central e o espinha de peixe.

Na Figura 2.5, a linha tracejada indica a formação de vácuo no processo e a linha contínua representa a entrada da resina no meio fibroso. No caso sequencial simples, por exemplo, Fig. 2.5(a), a resina entra no domínio na linha contínua e se desloca linearmente até a região da linha tracejada. Na Fig. 2.5(f) mostra-se uma geometria complexa por onde a resina entra no domínio. O intuito é trabalhar com o arranjo que distribui mais homoganeamente a resina ao longo do domínio. No presente trabalho, a forma geométrica do canal em forma de “T” representa um módulo elementar de uma matriz em forma de espinha de peixe.

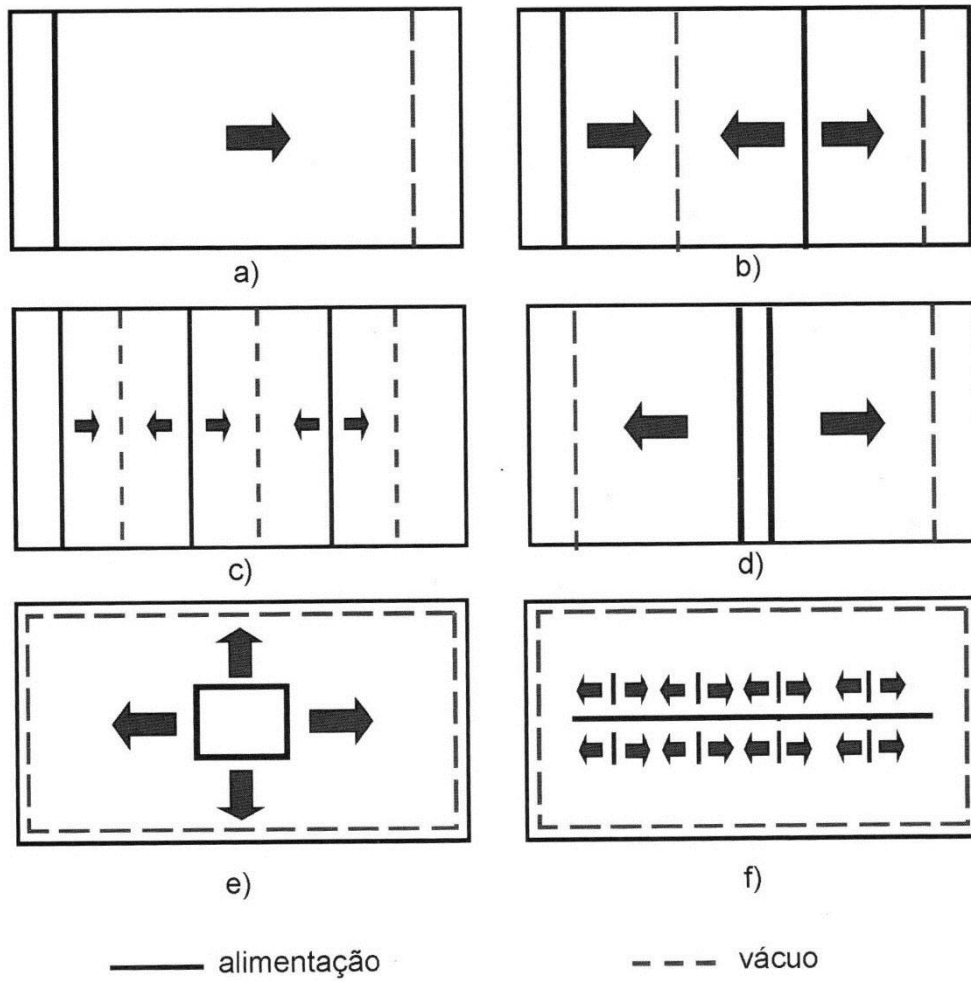


Figura 2.5 – Tipos de arranjo das linhas de alimentação da matriz: a) sequencial simples, b) sequencial duplo, c) sequencial alternado, d) composto, e) central, f) espinha de peixe (MARINUCCI 2011).

3 FUNDAMENTOS DA TEORIA CONSTRUTAL

A Teoria Construtal explica como ocorre a organização, a complexidade e a diversidade dos sistemas abertos onde existe escoamento na natureza e engenharia. A descoberta de tal teoria se deu na França em 1995 por Adrian Bejan. A visão predominante na comunidade acadêmica até então era de que a forma de árvore das estruturas existentes na natureza, incluindo as bacias hidrográficas e deltas, as passagens de ar nos pulmões, os relâmpagos, seria aleatória, ou seja, de que não existiria uma lei governante para o projeto similar de tais estruturas. Historicamente a origem da forma geométrica dos sistemas se deu por Demócrito aproximadamente 460 – 370 A.C., este atribuía a forma geométrica natural à “chance e necessidade”. Analisando a natureza, Bejan é contra essa visão e defende que a doutrina da chance (não-determinística) não tem sido usada como uma forma de explicar a geração geométrica das formas naturais, mas como uma maneira de admitir a falha humana em racionalizar a ocorrência da auto-organização da natureza (BEJAN, 2000).

Neste sentido a teoria proposta por Bejan defende que as formas geométricas de sistemas de fluxo presentes na natureza não são aleatórias, ao acaso, e sim determinísticas e orientadas por um princípio físico (BEJAN e ZANE, 2012). Este princípio físico que a Teoria Construtal relaciona aos padrões, formas e estruturas semelhantes, encontrados em sistemas de fluxo animados e inanimados é a Lei Construtal (BEJAN e LORENTE, 2011). O princípio físico afirma que para um sistema de dimensões finitas, onde existe fluxo, persistir no tempo (sobreviver), a sua configuração deve evoluir de tal forma que propicie o mais fácil acesso às correntes que escoam através dele (BEJAN, 2000; BEJAN e LORENTE, 2008; BEJAN e LORENTE, 2011; BEJAN e ZANE, 2012).

Um sistema de escoamento possui duas propriedades básicas, o escoamento (por exemplo, fluido, calor, massa ou informação) e a estrutura por onde ele flui. Um raio, por exemplo, é um sistema de escoamento de uma descarga elétrica. Em um pequeno instante de tempo são criados braços luminosos revelando a estrutura mais eficiente para dispersar a corrente elétrica de um volume (nuvem) a um ponto (chão, árvore, pára-raios ou outra nuvem). Assim como em raios, vários outros sistemas apresentam o padrão de estrutura em forma de árvore (*treelike form*). Este padrão é o formato que facilita de maneira mais eficaz o fluxo de um ponto para uma área ou de uma área para um ponto (BEJAN e ZANE, 2012).

Mesmo sendo uma forma muito comum na natureza, o padrão *treelike* é apenas uma das várias manifestações da Lei Construtal. Outras formas mais complexas e variadas podem ser observadas, como formas de animais que evoluíram para mover a sua massa cada vez melhor em seu ambiente, conseguindo percorrer maiores distâncias com menos energia (BEJAN e ZANE, 2012). A Figura 3.1 ilustra alguns exemplos onde a forma e a estrutura dos sistemas de fluxo são gerados pela Lei

Construtal, bem como, a semelhança entre alguns padrões encontrados na natureza. Por exemplo, as imagens do topo da Fig. 3.1 ilustram uma comparação no padrão geométrico e sugerem que a forma das seções transversais dos rios, a maneira como as veias se interligam para atingir o pulmão e a forma redonda dos tubos, são determinadas por um princípio, isto é, existe uma direção para onde os sistemas abertos (vivos) caminham para “melhorar o seu desempenho”. Na linha do meio da Fig. 3.1, as imagens sugerem uma semelhança entre as rachaduras do solo, a solidificação de um floco de neve e os respingos quando uma gota de um líquido atinge uma parede.

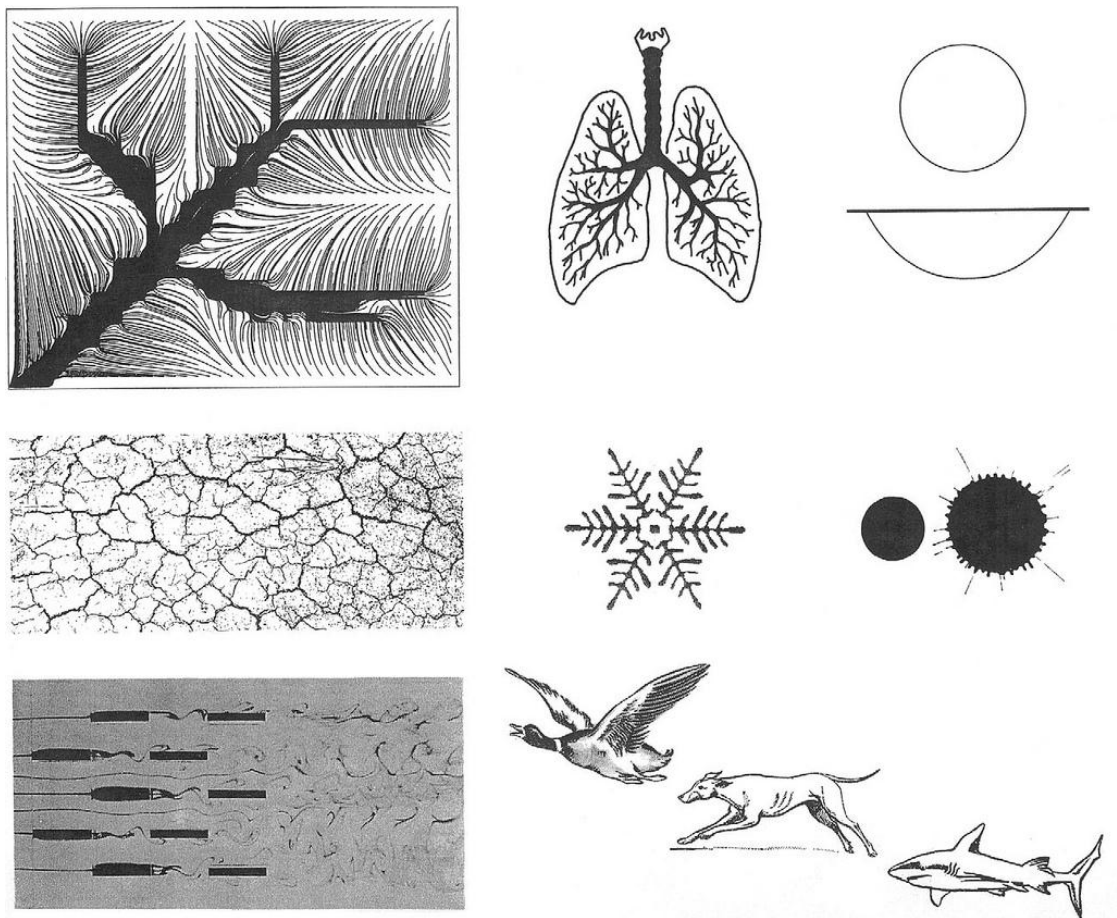


Figura 3.1 – Exemplos de formas e estruturas de sistemas de fluxo e comparação entre padrões presentes na natureza (BEJAN e ZANE, 2012).

O futuro aponta na direção de caminhos mais curtos, rotas mais baratas, elementos estruturais mais leves e fortes e etc. É também uma tendência natural para as configurações evoluir nesta direção, e suceder outras evoluções ao longo do tempo para que o sistema com a configuração “sobreviva”, i.e., persista no tempo. É natural moldar-se para seguir com o fluxo ou o escoamento (BEJAN, 2000; BEJAN e LORENTE, 2011).

Na Lei Construtal esse comportamento natural é visto como um fenômeno de geração da configuração com o tempo. A configuração é o desenho de como e onde os canais são distribuídos na área ou volume disponível. Ao longo do tempo, a imperfeição é reduzida distribuindo os canais para elementos de área de modo que o sistema escoar mais facilmente. Essa tendência natural de escoar com melhores configurações é o princípio da Ótima Distribuição das Imperfeições, que é a essência da Lei Construtal (BEJAN, 2000; BEJAN e ZANE, 2012).

Dessa forma, o futuro não pertence ao perfeito ou ideal. Ele pertence ao projeto imperfeito que for menos imperfeito possível. Esta tem sido a flecha do tempo da evolução de projetos em tecnologia, biologia, geomorfologia e organização social. O objetivo sempre é distribuir estas imperfeições tal que o sistema global é o menos imperfeito possível (BEJAN e ZANE, 2012).

A aplicação da Lei Construtal é feita com o método Construtal. Este método é denominado Design Construtal e tem sido usado para prever e explicar muitos fenômenos da natureza (*Design in Nature*). Além disso, tem sido aplicado em problemas de engenharia para melhoria do seu desempenho. O método Design Construtal trata sobre a Ótima Distribuição das Imperfeições. O referido método é baseado no princípio de objetivos e restrições (locais e globais) (BEJAN e LORENTE, 2008). O Design Construtal ainda pode ser usado como uma ferramenta poderosa para a avaliação da evolução de padrões em projeto urbano, tráfego, transporte, dinâmica social e economia (BEJAN e MERKX, 2007).

O Design Construtal guia o projetista (no tempo) na direção de arquiteturas do escoamento que têm maiores desempenhos globais para condições de acesso especificadas no escoamento (fluidos, calor, tensões). Vale ressaltar que, a arquitetura descoberta para cada conjunto de condições geram diferentes configurações “Construtais”. Em outras palavras, a configuração ótima desenvolvida para um conjunto de condições não é, necessariamente, a configuração recomendada para outro conjunto de soluções, ou seja, universal é a Lei Construtal, não um de seus “designs” (LORENZINI et al., 2014).

De uma forma resumida as ideias chave da Lei Construtal são as seguintes: todos os sistemas (naturais ou fabricados) têm um propósito (objetivo, função), a sua forma e estrutura é livre para sofrer alterações dentro de determinadas restrições (físicas, geométricas, construtivas e outras) e estas resultam do balanço ótimo entre duas tendências opostas (por exemplo, lento - rápido, resistente – não resistente, etc.). A forma e a estrutura resultante (a que persiste no tempo) é aquela que melhor faz uma distribuição das imperfeições no sistema (BEJAN et al., 2006; MIGUEL, 2007).

As pesquisas têm associado o uso do Design Construtal com o auxílio da modelagem computacional, usando como técnica de otimização a Busca Exaustiva (BE) ou outras técnicas metaheurísticas como Algoritmos Genéticos (GA – do inglês: *Genetic Algorithm*) e Recozimento

Simulado (AS – do inglês: *Simulated Annealing*). Alguns importantes exemplos podem ser vistos nos estudos de Biserni et al. (2004); Xie et al. (2010); Lorenzini et al. (2011); Lorenzini et al. (2012); Hajmohammadi et al. (2013); Lorenzini et al. (2013); Gonzales et al. (2015). A BE se caracteriza por explorar todo o espaço de soluções factíveis durante o processo de otimização, isto é, simula todas as configurações possíveis para cada grau de liberdade.

Exemplos da aplicação do Design Construtal para a avaliação de sistemas de geometrias complexas têm sido vistos na literatura, principalmente em problemas de cavidades, onde a principal contribuição está relacionada à geometria e não à fenomenologia física. Um exemplo é apresentado em Lorenzini et al. (2014) para a otimização geométrica de uma cavidade em forma de Y, Fig. 3.2.

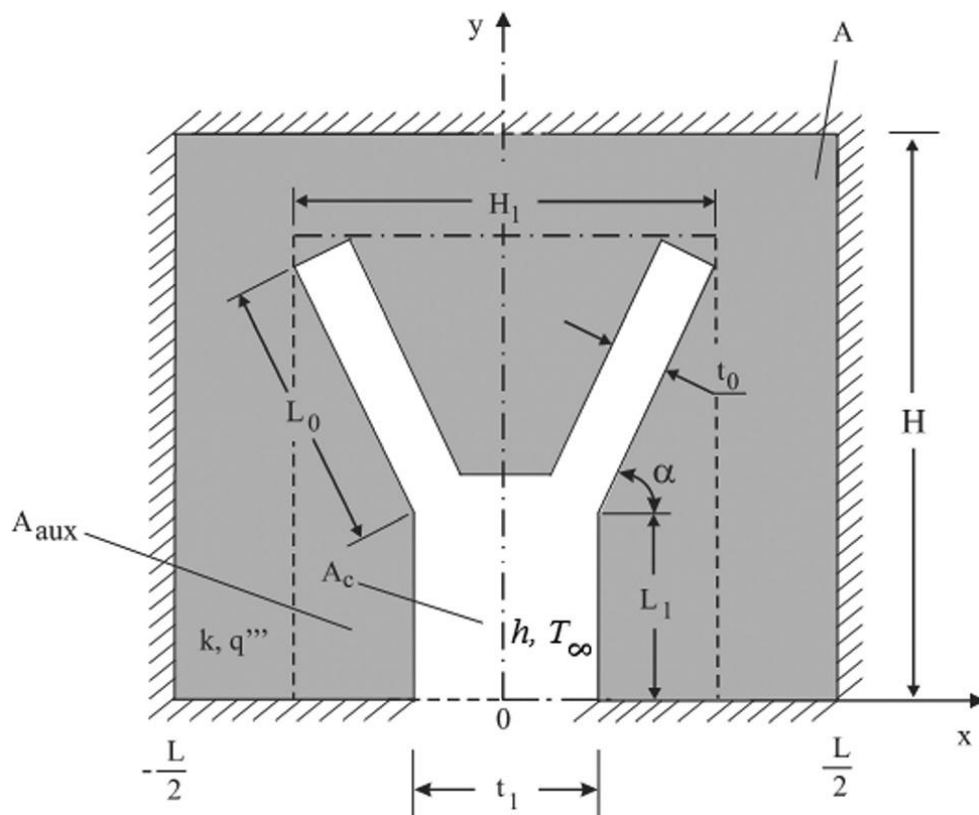


Figura 3.2 – Cavidade em Y para um corpo condutor bidimensional com geração de calor uniforme (Lorenzini et al., 2014).

O objetivo do problema era distribuir a cavidade de forma a minimizar a máxima temperatura em excesso no domínio sólido com geração de calor. Para o problema abordado, a cavidade possui 5 incógnitas (L_1 , L_0 , t_1 , t_0 e α) que devem ser variadas para uma completa avaliação geométrica da cavidade, mais duas incógnitas para o domínio sólido (H e L). O problema é submetido a 3 restrições: área total do domínio sólido, área da cavidade e uma área auxiliar (que foi empregada apenas com o

intuito de se avaliar menos um grau de liberdade e restringir o espaço de busca). Em função de se ter um problema não fechado, por ter-se 3 equações (para as restrições) e 7 incógnitas, são requeridos 4 graus de liberdade, que neste caso foram: H/L , t_1/t_0 , L_1/L_0 e α . No primeiro nível de otimização, o valor de α é variado e as demais razões geométricas são mantidas constantes. A menor temperatura máxima em excesso (θ_{\max}) encontrada será a temperatura máxima em excesso uma vez minimizada ($(\theta_{\max})_m$) e a respectiva geometria ótima é denominada uma vez minimizada, neste caso α_o . Em um segundo nível de otimização, o valor de α é variado novamente para diferentes razões de L_1/L_0 . A menor temperatura encontrada será a temperatura máxima em excesso duas vezes minimizada ($(\theta_{\max})_{mm}$) e as respectivas geometrias ótimas serão a razão L_1/L_0 uma vez otimizada, $(L_1/L_0)_o$, e o ângulo α será duas vezes otimizado, α_{oo} . Posteriormente, se permite a variação de um terceiro grau de liberdade e assim por diante. No estudo em questão, a máxima temperatura em excesso foi minimizada 4 vezes, $(\theta_{\max})_{mmmm}$, obtendo-se geometrias quatro vezes otimizadas, $(H/L)_o$, $(t_1/t_0)_{oo}$, $(L_1/L_0)_{ooo}$ e α_{oooo} .

Ressalta-se que, no presente trabalho, utilizou-se a mesma metodologia empregada em problemas de cavidade.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA

No processo de infusão a resina flui através de um reforço fibroso, que pode ser modelado como um meio poroso. Na região do meio poroso é considerada uma força de campo resistente ao escoamento da resina modelada através da Lei de Darcy, que indica que a velocidade do escoamento de fluido por unidade de área é proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à viscosidade do fluido (MORREN et al., 2009). Esta lei foi proposta em 1856, pelo físico francês Henry Philibert Gaspard Darcy, enquanto estudava o escoamento de água através de uma camada porosa de areia (ALVES, 2006). A equação matemática para o comportamento do campo de velocidades nos meios porosos é dada por (RUDD et al., 1997):

$$\vec{V} = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad (4.1)$$

onde \vec{V} é a velocidade do fluido [m/s], μ é a viscosidade do fluido [Pa s], K é o tensor de permeabilidade do meio poroso [m²], ∇P é o gradiente de pressão no escoamento [Pa]. Como já foi dito, no presente estudo o fluido em escoamento é a resina e o meio poroso é o reforço fibroso.

Considerando que a resina tem propriedades termo-físicas constantes e o escoamento é incompressível, a equação de conservação da massa pode ser escrita como:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (4.2)$$

Para a solução do processo de LRI com o software FLUENT[®], foi utilizado o método VOF (*Volume of Fluid*). Considerando os problemas de LRI bifásicos envolvendo ar e resina, o avanço da resina é modelado através de três equações diferenciais para a conservação de massa, conservação da quantidade de movimento e uma equação de transporte para a fração volumétrica de uma das fases (resina ou ar). Estas equações foram apresentadas em trabalhos anteriores do grupo para aplicação em problemas de moldagem por transferência de resina (ISOLDI et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; PORTO, 2012).

4.1 Modelo Volume of Fluid (VOF)

O modelo *Volume of Fluid* (VOF) proposto por Hirt e Nichols (1981), é um modelo multifásico usado para escoamentos de fluido com duas ou mais fases. Neste modelo, as fases são imiscíveis, ou seja, o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra fase. Através do VOF, é possível identificar a posição da interface entre os fluidos (LING et al., 2001; LV et al., 2011).

Considerando os problemas de LRI como bifásicos (resina/ar), para representação das fases dentro de uma célula (elemento), aplica-se o conceito de fração volumétrica f . Desta forma, para o caso com apenas duas fases (resina e ar), o valor de f é igual a zero quando a célula estiver totalmente preenchida com ar e igual a um, quando estiver totalmente preenchida com resina. Quando for determinado um valor entre zero e um, a mesma conterá as duas fases (LING et al., 2001; LV et al., 2011).

Apenas um conjunto de equações de conservação da massa e quantidade de movimento é resolvido para a mistura resina/ar. Desta forma, a equação da continuidade para a mistura é dada por (SCHLICHTING, 1979, CHUNG, 2002):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (4.3)$$

onde ρ é a massa específica da mistura [kg/m^3], t é o tempo [s] e \vec{V} é a velocidade [m/s].

Da mesma forma, somente uma equação da quantidade de movimento é resolvida em todo domínio computacional. Esta é dada por (SCHLICHTING, 1979, CHUNG, 2002):

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu \bar{\bar{\tau}}] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.4)$$

sendo P a pressão [Pa], \vec{g} é o vetor de aceleração gravitacional, \vec{F} é um vetor de força externa e $\bar{\bar{\tau}}$ é o tensor de cisalhamento no fluido, dado por:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) \quad (4.5)$$

Na presente formulação, o efeito do meio poroso é incluído no modelo matemático pela inserção de uma força resistiva ao escoamento na equação da quantidade de movimento. A inclusão deste termo possibilita simular o efeito da porosidade, que é a Lei de Darcy dada pela Eq. (4.1), reescrita como:

$$\vec{F} = \nabla P = -\frac{\mu}{K} \vec{V} \quad (4.6)$$

O transporte advectivo da fração volumétrica f , em cada célula do domínio computacional, é descrito por:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (f \vec{V}) = 0 \quad (4.7)$$

Com a definição da fração volumétrica, a massa específica e a viscosidade dinâmica em cada célula do domínio computacional podem ser calculadas, respectivamente, por (SRINIVASAN et al., 2011):

$$\rho = f\rho + (1-f)\rho \quad (4.8)$$

$$\mu = f\mu + (1-f)\mu \quad (4.9)$$

4.2 Descrição e Aplicação do Design Construtal ao Problema

O problema consiste em um escoamento de resina considerado incompressível, transiente e no regime laminar em uma placa bidimensional composta de meio poroso, conforme ilustram as Figs. 4.1 e 4.2. Para simular um processo de Infusão de Resina Líquida (LRI), canais abertos são inseridos ao longo do domínio com meio poroso para facilitar a impregnação da resina ao longo de todo o molde. Nas Figuras 4.1 e 4.2, estes canais (em forma de “I” e em forma de “T”, respectivamente) estão representados pela região com cinza-escuro, enquanto a região porosa é representada com cinza-claro.

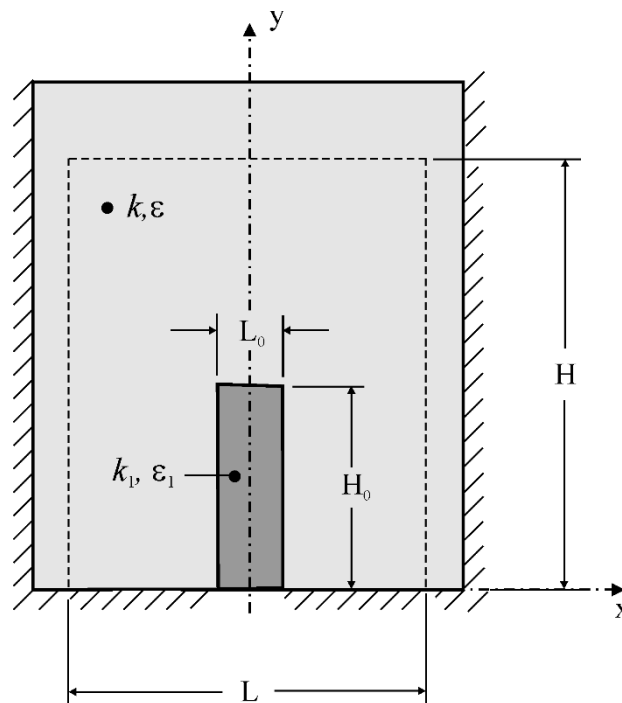


Figura 4.1 – Ilustração do domínio computacional do processo de LRI a ser simulado com o canal aberto em forma de “I”.

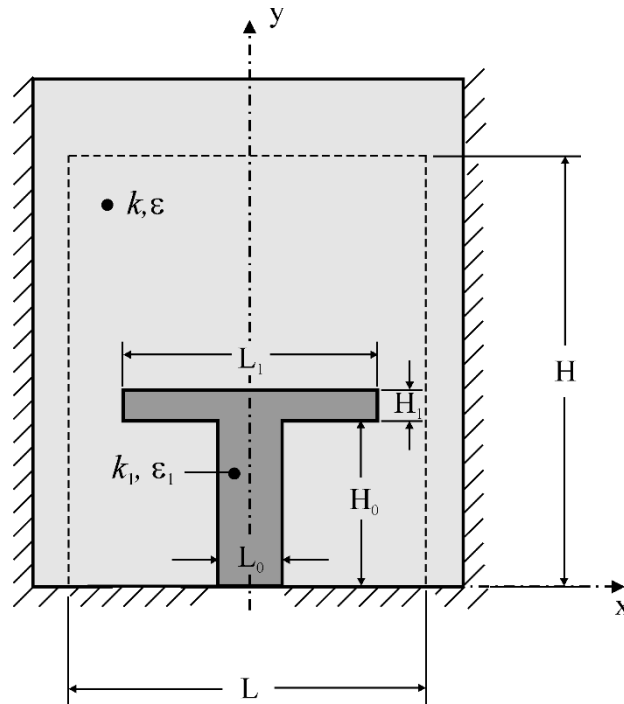


Figura 4.2 – Ilustração do domínio computacional do processo de LRI a ser simulado com o canal aberto em forma de “T”.

Em ambos os casos, o escoamento entra no domínio através de uma diferença de pressão entre a entrada da resina (região inferior do canal) e a região de saída (superfície superior do meio poroso). Considera-se uma pressão de entrada de $P_{in} = 1,0 \times 10^5$ Pa e na saída é imposta uma pressão de $P_{out} = 0$ Pa. As demais superfícies laterais e inferior possuem condição de contorno de não-deslizamento e impermeabilidade ($u = v = 0$ m/s). No que diz respeito às propriedades físicas da resina, é considerada uma massa específica de $\rho = 916$ kg/m³ e uma viscosidade dinâmica de $\mu = 0,06$ Pa s. Para o meio poroso, considera-se uma permeabilidade de $K = 3,0 \times 10^{-10}$ m² e porosidade de $\varepsilon = 0,88$. As propriedades supracitadas foram adaptadas de Isoldi et al. (2012) e Porto et al. (2012).

Para o meio vazio (canais abertos), considera-se uma permeabilidade suficientemente grande de $K_1 = 9,99 \times 10^9$ m² e uma porosidade de $\varepsilon_1 = 1,0$. Da Eq. (4.4) observa-se que especificar estes valores para a permeabilidade e a porosidade implica em termos práticos zerar o vetor de força externa, ou seja, considerar o canal vazio (sem meio poroso). Vale ressaltar que o software FLUENT[®] resolve o problema mesmo sem especificar tais propriedades para meios sem porosidade, porém a estratégia adotada estabiliza e uniformiza o modelo matemático e não modifica o comportamento do escoamento da resina nos canais abertos. A verificação desta estratégia para solução é apresentada no capítulo 5.

No âmbito do Design Construtal, primeiramente define-se os objetivos, que neste caso consiste na minimização do tempo de injeção, e restrições do problema. O problema em análise é submetido a duas restrições, a área total do domínio:

$$A = HL \quad (4.10)$$

e a área do canal de injeção (A_0), para o caso do canal em forma de “I” e em forma de “T”, respectivamente, representadas pelas equações abaixo:

$$A_I = H_0 L_0 \quad (4.11)$$

$$A_T = H_0 L_0 + H_1 L_1 \quad (4.12)$$

As dimensões do domínio externo com meio poroso são: $H = L = 0,5$ m para todas as simulações, ou seja, a área externa é uma restrição geométrica do problema e considera-se $H/L = 1,0$. Ressalta-se que foi considerado um espaçamento de 0,05 m nas laterais do molde de reforço fibroso e uma altura adicional de 0,25 m para evitar vazios na região definida pela linha tracejada mostrada nas Fig. 4.1 e 4.2, que é a região de análise do presente problema.

As dimensões H_0 e L_0 para um canal em forma de “I” (Fig. 4.1) são definidas considerando-se uma restrição de área do material sem porosidade. Assim, tem-se uma equação e duas variáveis, sendo necessário definir um grau de liberdade adicional (L_0/H_0). Para o canal em forma de “T” (Fig. 4.2) mantém-se a restrição de área ocupada pelo material sem porosidade, sendo necessários definir quatro variáveis da geometria em forma de “T”: H_0, L_0, H_1, L_1 . Para o fechamento desse sistema com uma equação e quatro incógnitas (variáveis geométricas) é necessário adicionar três graus de liberdade ao problema: $L_1/H_1, L_0/H_0$ e H_0/H_1 .

Para o caso do canal em forma de “I” as variáveis geométricas são definidas a partir das seguintes equações:

$$H_0 = \left[\frac{A\phi}{(L_0/H_0)} \right]^{1/2} \quad (4.13)$$

$$L_0 = \left(\frac{L_0}{H_0} \right) H_0 \quad (4.14)$$

onde A é a área do material com meio poroso, ou seja, $H \cdot L = 0,25$ m² e ϕ é a razão entre a área do canal e área da placa, dado por:

$$\phi = \frac{A_0}{A} \quad (4.15)$$

Já as variáveis geométricas do caso “T” são dadas por:

$$H_1 = \left[\frac{A\phi}{\left(\frac{L_0}{H_0} \cdot \left(\frac{H_0}{H_1} \right)^2 + \frac{L_1}{H_1} \right)} \right]^{1/2} \quad (4.16)$$

$$L_1 = H_1 \frac{L_1}{H_1} \quad (4.17)$$

$$H_0 = H_1 \frac{H_0}{H_1} \quad (4.18)$$

$$L_0 = H_0 \frac{L_0}{H_0} \quad (4.19)$$

Com as restrições e objetivos determinados, a busca pela geometria ótima se deu através da aplicação da Busca Exaustiva (BE), método que testa todas as possibilidades dentro do espaço de busca delimitado para os graus de liberdade estudados. Conforme destacado acima, o canal em forma de “T” tem a razão L_0/H_0 como grau de liberdade, enquanto que o canal em forma de “T” tem três graus de liberdade: L_0/H_0 , H_0/H_1 e L_1/H_1 , sendo que estas razões variam durante o processo de avaliação geométrica.

Para a otimização da geometria dos canais em forma de “T” foram realizadas um conjunto de 60 simulações com diferentes razões de L_0/H_0 e diferentes valores de ϕ , sendo $\phi = 0,005; 0,010; 0,030; 0,050$ e $0,100$. Para o caso dos canais em forma de “T” foi avaliado apenas o $\phi = 0,050$, devido ao elevado número de simulações. Neste caso específico foi realizado um total de 189 simulações. Para este caso o processo de otimização é dividido em três etapas conforme ilustrado na Fig. 4.3.

No primeiro passo, varia-se a razão L_1/H_1 e mantem-se fixos os parâmetros remanescentes (L_0/H_0 e H_0/H_1). O valor mínimo encontrado para o tempo de infusão da resina no molde será denominado o tempo de infusão uma vez minimizado (t_m) e a correspondente razão L_1/H_1 será denominada a razão uma vez otimizada, $(L_1/H_1)_o$. Em um segundo momento, o mesmo processo é repetido variando L_1/H_1 para as outras razões de L_0/H_0 e mantém-se constante H_0/H_1 . Nessa etapa do processo, dois graus de liberdade são otimizados (L_1/H_1 e L_0/H_0). Nesse caso, o tempo de infusão

mínimo obtido é duas vezes minimizado (t_{mm}), a razão L_1/H_1 é duas vezes otimizada $(L_1/H_1)_{oo}$ e a razão L_0/H_0 é uma vez otimizada $(L_0/H_0)_o$. Por fim, repete-se o processo da segunda etapa para as diferentes razões de H_0/H_1 avaliadas. Assim, é obtido o tempo mínimo de infusão três vezes minimizado (t_{mmm}), a razão L_1/H_1 três vezes otimizada $(L_1/H_1)_{ooo}$, a razão L_0/H_0 duas vezes otimizada $(L_0/H_0)_{oo}$ e a razão H_0/H_1 uma vez otimizada $(H_0/H_1)_o$, concluindo a otimização completa da geometria.

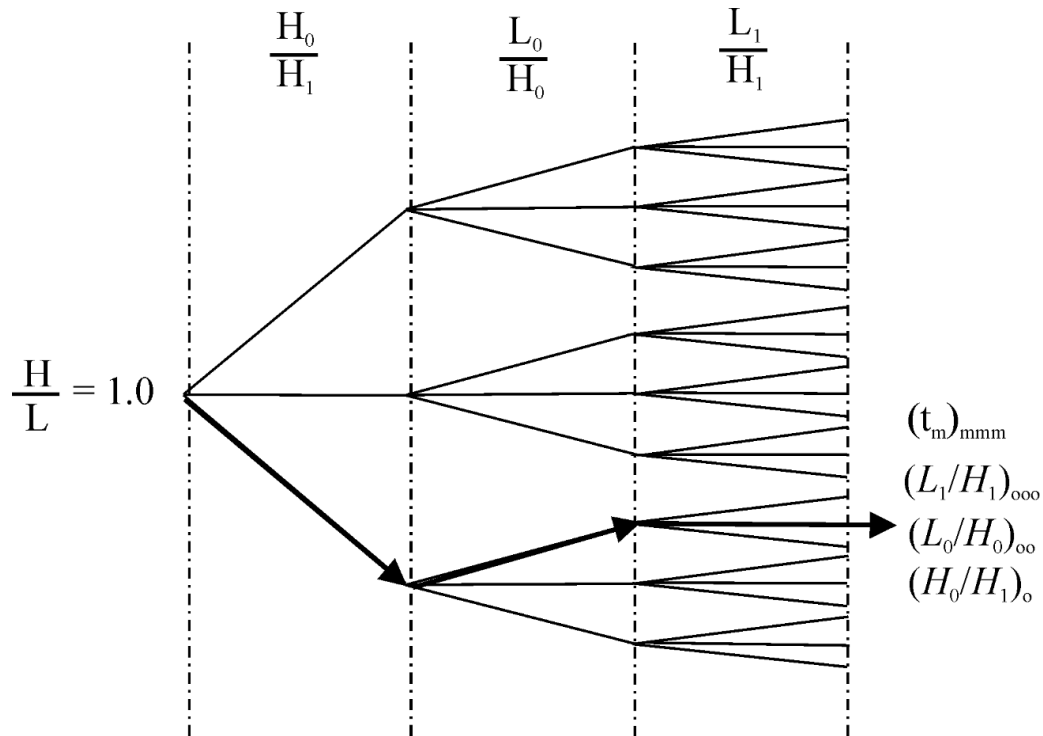


Figura 4.3 – Fluxograma ilustrando o processo de otimização do canal em forma de “T” no processo de Infusão de Resina Líquida (LRI).

Vale ressaltar que a metodologia para obtenção da formulação das restrições do problema aqui analisado e a metodologia de otimização das geometrias estudadas foram baseadas em pesquisas anteriores na área do Design Construtal. Destaca-se os trabalhos de Ledezma et al. (1997); Biserni et al. (2004); Biserni et al. (2007); Lorenzini et al. (2012); Lorenzini et al. (2013); Lorenzini et al. (2014); Estrada et al. (2015); Lorenzini et al. (2016). Estes trabalhos apesar de se concentrarem em problemas de transfêrencia de calor subsidiam a aplicação do Design Construtal em outras áreas da engenharia.

5 MODELAGEM NUMÉRICA BASEADA NO FLUENT

De acordo com Maliska (2004) o uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos da engenharia e da física é hoje uma realidade, graças ao vertiginoso desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento. Em função dessa disponibilidade computacional, que cresce exponencialmente, o desenvolvimento de algoritmos para a solução dos mais diversos problemas tem recebido enorme atenção dos analistas numéricos e engenheiros, fazendo aumentar, também em taxas acentuadas, o número de pesquisadores e usuários da simulação numérica. A versatilidade e generalidade dos métodos numéricos para simulação de problemas de engenharia e a relativa simplicidade de aplicação dessas técnicas são outros fatores motivadores para seu uso.

Ainda segundo Maliska (2004), a tarefa do método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvam a função incógnita. Uma vez que se está resolvendo um sistema algébrico de equações, ao invés de um conjunto de equações diferenciais, a solução passa a ser obtida para um número discreto de pontos ao longo do domínio e não mais em um nível infinitesimal.

Vale destacar que, quanto maior a discretização, mais próxima da solução exata será a solução numérica obtida. Assim como resultados experimentais dependem da qualidade dos equipamentos utilizados, a precisão da solução numérica é dependente da qualidade da discretização usada. Contudo, quanto maior a discretização maior será o sistema de equações a ser resolvido conduzindo ao aumento no esforço computacional (FERZIGER e PERIC, 1997; DOS SANTOS, 2011).

Ressalta-se que, do ponto de vista da engenharia, não basta ter um excelente método numérico se o modelo matemático (isto é, as equações diferenciais escolhidas) não representa o fenômeno que se quer modelar. Também não interessa ter um bom modelo matemático se o modelo numérico não consegue entregar ao usuário uma solução precisa do sistema de equações (MALISKA, 2004).

Segundo Versteeg e Malalasekera (1995), a análise de sistemas através de simulações computacionais e técnicas matemáticas envolvendo escoamento de fluidos é conhecida como Dinâmica de Fluidos Computacional – *Computational Fluid Dynamics* – ou simplesmente CFD, e apresenta as seguintes vantagens: redução substancial de tempo e custo em novos projetos, capacidade em estudar sistemas onde análises experimentais são complexas ou impossíveis e nível praticamente ilimitado de detalhamento de resultados.

Os códigos de CFD estão estruturados em torno de algoritmos numéricos que podem resolver problemas de escoamentos de fluidos e normalmente possuem sofisticadas interfaces de maneira a facilitar a definição do problema e a análise dos resultados. Estes pacotes estão divididos em três

etapas principais: pré-processamento, processamento (solução) e pós-processamento (VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995).

A primeira etapa consiste na introdução do problema no programa de CFD, onde as informações são colocadas em uma forma adequada para a solução do problema. Então, no pré-processamento é definida a região de interesse (domínio computacional), esse domínio é dividido em uma quantidade determinada de subdomínios (geração de malha), é selecionado o fenômeno físico que será modelado e as propriedades que envolvem o fluido e, finalmente, as condições de contorno e condições iniciais do problema são especificadas.

A etapa de processamento consiste na solução numérica das equações diferenciais que modelam o problema físico. Existem três principais métodos para a solução numérica de equações diferenciais parciais em problemas de CFD: o Método de Diferenças Finitas (MDF), o Método de Volumes Finitos (MVF) e o Método de Elementos Finitos (MEF). A diferença entre eles está relacionada com a maneira como as variáveis do escoamento são aproximadas e com o processo de discretização empregado em cada método. Já na etapa de pós-processamento, os pacotes de CFD estão equipados com versáteis ferramentas para a visualização dos resultados (MALISKA, 2004; VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995).

No contexto dos softwares comerciais, o MVF tem sido a metodologia mais empregada para a construção dos códigos CFD disponíveis, principalmente naqueles com maior penetração industrial (MALISKA, 2004). Entre eles é possível citar o código comercial FLUENT[®] empregado neste estudo.

Neste trabalho, as simulações numéricas do processo de infusão são realizadas através de dois softwares. O GAMBIT[®] para geração e discretização dos domínios computacionais (pré-processamento) e o FLUENT[®] para a solução numérica e pós-processamento de modo a descrever o comportamento do escoamento de resina no interior do molde.

5.1 Método dos Volumes Finitos (MVF)

O Método dos Volumes Finitos (MVF) é uma forma de se obter uma versão discreta de uma Equação Diferencial Parcial (EDP) a partir da integração dessa EDP em uma região, ou volume, do espaço. Este método está intrinsecamente ligado ao conceito de fluxo entre regiões, ou volumes adjacentes, onde o fluxo de uma determinada grandeza, como massa ou energia, é a quantidade dessa grandeza que atravessa a área de uma fronteira. A quantidade líquida desta grandeza que atravessa o volume de controle por unidade de tempo é calculada pela integração, sobre essas fronteiras, da

diferença entre os fluxos que entram e os que saem deste volume, o que é conseguido de forma mais geral pela integração das EDPs (BORTOLI, 2000; FORTUNA, 2000).

O MVF faz uma aproximação discreta de uma equação de conservação, tendo como objetivo dividir o domínio computacional de cálculo num certo número de subdomínios, nos quais a lei de conservação seja válida, dentro de um determinado grau de aproximação. Existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas no MVF. A primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes elementares, ou volumes finitos, e a segunda é a integração sobre o volume elementar, no espaço e no tempo, da equação diferencial na sua forma conservativa. Ambos os processos são equivalentes, pois para deduzir as equações diferenciais é necessário primeiro realizar um balanço em um volume infinitesimal, fazendo-se, em seguida, o processo de limites para obter a equação diferencial (MALISKA, 2004).

5.1.1 Discretização Temporal das Equações de Conservação

Para a análise de problemas transientes é necessário empregar algum esquema de integração no tempo, que podem ser classificados em implícitos, totalmente implícitos e explícitos (MALISKA, 2004). Os esquemas implícitos são incondicionalmente estáveis e permitem um maior passo de tempo em relação aos demais. No entanto, para domínios de grande dimensão há uma grande dificuldade para o armazenamento na memória principal das matrizes completas do sistema, gerando um maior tempo de processamento para obtenção dos resultados da simulação (REDDY e GARTLING, 1994; DOS SANTOS, 2011). Por outro lado, os esquemas explícitos ocupam pouco espaço na memória central. Contudo, estes esquemas apresentam fortes restrições de estabilidade numérica, limitando o passo de tempo a ser adotado (GRESHO e SANI, 1999; DOS SANTOS, 2011). No presente estudo é usado o esquema de avanço temporal implícito. Para as equações da quantidade de movimento e massa, foi utilizada uma formulação implícita, já para a fração volumétrica, utilizou-se a formulação explícita. O passo de tempo utilizado foi mantido fixo e determinado através de um teste de independência.

5.1.2 Tratamento dos Termos Advectivos das Equações de Conservação

De acordo com Maliska (2004), os escoamentos advectivos-dominantes possuem grandes instabilidades numéricas em regiões de grandes gradientes quando utilizadas discretizações por diferenças finitas centrais no tratamento dos termos advectivos. As soluções frequentemente apresentam oscilações espúrias nos campos de velocidades, pressão e temperaturas. Tais oscilações ocorrem pois o tamanho da malha é desproporcional à complexidade do problema. Conforme Maliska

(2004) e Dos Santos (2011), o uso de diferenças centrais na aproximação dos termos advectivos gera coeficientes negativos, pois é praticamente impossível refinar a malha até forçar sua positividade devido ao elevado esforço computacional. Assim, foram desenvolvidas técnicas para abordagem deste problema.

Ressalta-se que a existência de coeficientes negativos não significa a impossibilidade total de obter a solução. No âmbito do MVF, uma forma de evitar o coeficiente negativo é usar uma outra aproximação para os termos advectivos nas faces dos volumes de controle. Por exemplo, uma aproximação de um lado só, também conhecida por *upwind*, resolve o problema (PATANKAR, 1980; MALISKA, 2004).

Neste trabalho, foi utilizado o esquema de advecção *upwind* de primeira ordem para os termos advectivos. No esquema supracitado, a direção do escoamento é levada em consideração para a realização do cálculo do valor de uma determinada variável (velocidade, temperatura) na face do volume finito. As vantagens da função de interpolação *upwind* são que a positividade dos coeficientes dos termos advectivos é sempre garantida, sendo geradas soluções numéricas ausentes de oscilações numéricas e a outra é a simplicidade de sua aplicação em programas CFD (MALISKA, 2004; VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995; DOS SANTOS, 2011).

5.1.3 Acoplamento Pressão-Velocidade

Para o MVF, métodos de acoplamento pressão-velocidade têm sido empregados para o tratamento dos escoamentos incompressíveis. Nestes métodos, a equação da conservação de massa é transformada de forma a ter um termo de pressão presente (MALISKA, 2004). Um dos métodos de acoplamento pressão-velocidade mais conhecidos é o SIMPLE (do inglês: *Semi Implicit Linked Equations*), que foi desenvolvido por Patankar e Spalding (1972). Posteriormente, foram criados métodos derivados do SIMPLE como o SIMPLER (SIMPLE-Revisado), SIMPLEC (SIMPLE-Consistente) e o PISO (PATANKAR, 1980; VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995).

No presente estudo, é empregado o algoritmo de acoplamento pressão-velocidade PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*). Esse algoritmo é análogo ao SIMPLE que relaciona a correção do campo de velocidades com a correção do campo de pressões a partir da equação da conservação da quantidade de movimento, mas sem um passo a mais de correção das variáveis (VERSTEEG e MALALASEKERA, 1995).

5.1.4 Método *Geo-Reconstruction*

No método de reconstrução geométrica (*Geo-Reconstruction*), os esquemas de interpolação padrão do FLUENT[®] são usados para obter o fluxo nas faces sempre que um volume está completamente preenchido com uma fase ou outra, cuja interface real é representada na Fig. 5.1(a) e a interface *Geo-Reconstruction* é representada na Fig. 5.1(b). Quando o volume está perto da interface entre as duas fases o esquema de reconstrução geométrica é utilizado. O esquema de reconstrução geométrica representa a interface entre os fluidos utilizando a aproximação linear (FLUENT, 2007).

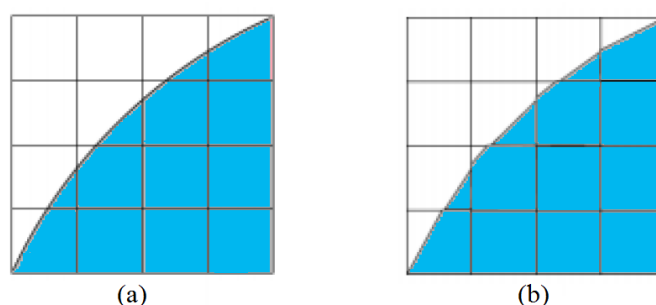


Figura 5.1 – (a) Interface Real e (b) Interface *Geo-Reconstruction* (Adaptado de FLUENT 6.3, 2007).

Esse método considera que a interface entre dois fluidos tem uma inclinação linear na célula, gerada a partir de uma interpolação linear, dentro de cada volume. Essa inclinação é usada para o cálculo da advecção do fluido através das faces do volume de controle. No método *Geo-Reconstruction* destacam-se três etapas: na primeira etapa, é calculada a posição da interface linear relativa ao centro do volume de controle parcialmente preenchido, tendo como base informações sobre a fração volumétrica e suas derivadas; na segunda etapa, é calculado o montante de advecção do fluido de cada uma das faces, utilizando a representação da interface linear e as informações sobre a distribuição de velocidades (normal e tangencial) nas faces; e na terceira etapa ocorre o cálculo da fração volumétrica em cada volume de controle através do balanço dos fluxos calculados na etapa anterior (FLUENT, 2007).

5.2 Procedimentos Numéricos

Primeiramente, vale lembrar que para a simulação do processo de infusão, as equações de conservação de massa e quantidade de movimento foram resolvidas usando um código comercial de

CFD baseado MVF (FLUENT, 2007). As simulações numéricas foram realizadas utilizando computadores com 8 processadores Intel Xeon de 3,30 GHz de *clock* e 8,0 Gb de memória RAM.

Em todas as simulações foi utilizado o esquema de discretização *upwind* de primeira ordem para o tratamento dos termos advectivos. Para a interpolação da pressão foi utilizado o esquema PRESTO (*PREssure STaggering Option*). Tal esquema realiza o balanço discreto da continuidade para um volume na face em que será computada a pressão. O acoplamento pressão-velocidade foi realizado com o método PISO, enquanto o método de *Geo-Reconstruction* é empregado para a reconstrução da interface entre os dois fluidos. Além disso, fatores de sub-relaxação de 0,3 e 0,7 são impostos para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, respectivamente.

5.2.1 Verificação do Modelo Numérico

Para a discretização temporal, foi realizado um estudo de independência do passo de tempo uma vez que se está abordando um problema transiente. Para este estudo foram realizadas cinco simulações variando apenas o passo de tempo e foi investigada a influência desse passo de tempo sobre a quantidade do molde preenchida pela resina. Em todas as simulações o tempo de infusão no qual foi avaliado o preenchimento do molde é $t = 7,0$ s. A Tabela 5.1 mostra para o instante de tempo analisado, a porcentagem do volume do domínio preenchido com resina em relação ao domínio total analisado e o tempo de processamento necessário para realizar as simulações. O caso analisado consiste em um canal aberto em forma de “T” com $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$ e $L_0/H_0 = 4,0$. Foi possível observar que para valores de $\Delta t \leq 1,0 \times 10^{-3}$ s todos os passos de tempo empregados conduziram a resultados idênticos. Para os valores de $\Delta t = 1,0 \times 10^{-2}$ s e $\Delta t = 1,0 \times 10^{-1}$ s não há convergência nas simulações. Consequentemente, foi adotado nas simulações posteriores de avaliação geométrica o passo de tempo de $\Delta t = 1,0 \times 10^{-3}$ s, visto que o mesmo conduz a um menor esforço computacional comparado com passos de tempo menores e conduz a soluções concordantes.

No que diz respeito à discretização espacial, o domínio foi dividido em volumes finitos retangulares e um teste de independência de malha foi realizado para definir o número de volumes empregado para todas as simulações. Cabe destacar que para o estudo de independência de malha foi mantido fixo o passo de tempo. O passo de tempo empregado foi o independente obtido na Tab. 5.1. A Tabela 5.2 mostra o número de volumes, o tempo de injeção para o preenchimento do molde e o tempo de processamento necessário para realizar as simulações para cada malha avaliada para um canal aberto em forma de “T” com $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$ e $L_0/H_0 = 4,0$. A equação a seguir apresenta o critério de refinamento de malha:

$$\text{Diferença Relativa} = \frac{100(t^j - t^{j+1})}{t^j} < 1,0\% \quad (5.1)$$

onde t^j representa o valor mínimo do tempo de injeção calculado com a malha mais grosseira e t^{j+1} corresponde ao valor calculado com a malha refinada. O tamanho apropriado da malha é determinado através de refinamentos sucessivos até que o valor da diferença entre os resultados obtidos com duas malhas sucessivas seja inferior a 1,0%. Neste sentido, é empregada uma malha com 18.271 volumes finitos retangulares.

Tabela 5.1 - Teste de independência de passo de tempo para um canal aberto em forma de “T” com $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$ e $L_0/H_0 = 4,0$.

Passo de Tempo (s)	Preenchimento do molde (%)	Tempo de Simulação (s)
$1,0 \times 10^{-5}$	27,1596	171.0
$1,0 \times 10^{-4}$	27,1596	8.9
$1,0 \times 10^{-3}$	27,1596	1.2
$1,0 \times 10^{-2}$	-----	-----
$1,0 \times 10^{-1}$	-----	-----

Tabela 5.2 - Teste de independência de malha para um canal aberto em forma de “T” com $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$ e $L_0/H_0 = 4,0$.

Número de volumes	Tempo de Injeção (s)	Diferença (%)	Tempo de Simulação (s)
1.209	188,3	1,69	43.0
4.636	185,1	1,18	78.4
18.271	182,9	0,87	126.5
72.451	181,3	-----	184.9

Posteriormente ao estudo das discretizações temporal e espacial, foi realizado um estudo a respeito das propriedades do canal aberto, com o propósito de obter uma solução considerando a porosidade e a permeabilidade na região do canal aberto para uniformizar o modelo matemático e facilitar a convergência da solução numérica desse tipo de problema. Foi analisada a situação onde não foi imposto valores de permeabilidade e porosidade para o canal aberto e a situação considerando um valor de permeabilidade (K_1) suficientemente grande e uma porosidade de $\varepsilon_1 = 1,0$.

A estratégia de utilizar um valor de permeabilidade que tenda para o infinito e uma porosidade como sendo $\varepsilon_1 = 1,0$ não modifica o comportamento do escoamento da resina nos canais abertos, pois dessa forma a força resistiva ao escoamento que possibilita simular o efeito da porosidade, dada pela Lei de Darcy, Eq. (4.6), tende a zero. Assim, o modelo matemático será o mesmo para meio poroso e para o canal aberto (livre de porosidade).

Para determinar o valor de permeabilidade a ser adotado foram avaliados os seguintes casos:

$K_1 = 9,99 \times 10^3 \text{ m}^2$, $K_1 = 9,99 \times 10^5 \text{ m}^2$, $K_1 = 9,99 \times 10^7 \text{ m}^2$ e $K_1 = 9,99 \times 10^9 \text{ m}^2$. Posteriormente, foi realizada uma comparação entre o tempo de infusão impondo estes valores de permeabilidade e porosidade ($\varepsilon_1 = 1,0$) e tempo de infusão no caso simulado sem a imposição de tais valores. Foi possível observar que todos valores de K_1 empregados conduziram a resultados absolutamente concordantes. Neste sentido, foi adotado o valor de permeabilidade para o canal aberto de $K_1 = 9,99 \times 10^9 \text{ m}^2$, que conduz a um menor esforço computacional comparado com o caso sem imposição de valores para a permeabilidade e porosidade, reduzindo cerca de 45,0% o tempo de simulação.

Em um segundo momento foi realizada uma verificação do modelo numérico empregado aqui com a solução analítica do caso retilíneo. Para isso, foi realizada uma comparação entre o avanço da resina em função do tempo de infusão e a solução analítica descrita em Jinlian (2004). Essa comparação é possível através de casos onde o escoamento da resina no interior do molde acontece com comportamentos retilíneos. O caso estudado consiste em um escoamento de resina em um canal aberto em forma de “I” com $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$ e $L_0/H_0 = 19,0$, onde L_0 é praticamente igual a L .

Uma solução analítica para a posição da linha de frente da resina em função do tempo é dada por (JINLIAN et al., 2004):

$$X_f = \sqrt{\frac{2kP_0t}{\mu\varepsilon}} \quad (5.2)$$

onde X_f é a posição da linha de frente da resina [m], t é o tempo decorrido [s], μ é a viscosidade da resina [Pa s], ε é a porosidade, K é a permeabilidade [m^2] e P_0 é a pressão de injeção [Pa]. Ressalta-se que a presente formulação só é aplicável para P_0 constante. A solução analítica foi então comparada com a solução numérica obtida através do software FLUENT®.

Para obtenção dos resultados numéricos, foi criada uma linha de monitoramento no centro de domínio, mais precisamente, uma linha que se sobrepõe ao eixo y . A linha foi definida pelos seguintes pontos: $P_1 (x_1 = 0,300 \text{ m}, y_1 = 0,0256 \text{ m})$ e $P_2 (x_2 = 0,300 \text{ m}, y_2 = 0,7500 \text{ m})$. A coordenada $x_1 = x_2$ representa o centro do domínio na direção x , enquanto o símbolo y_1 representa a colocação de

interface entre o canal aberto e o meio poroso e y_2 representa a saída da resina. A Figura 5.2 mostra o avanço da linha de frente da resina em função do tempo de injeção obtido numericamente com modelo empregado no presente trabalho e com o previsto analiticamente na literatura. Analisando os resultados analítico e numérico observa-se uma diferença máxima entre eles de 0,66%, apresentando assim uma excelente concordância. Com isso verifica-se o modelo numérico adotado aqui.

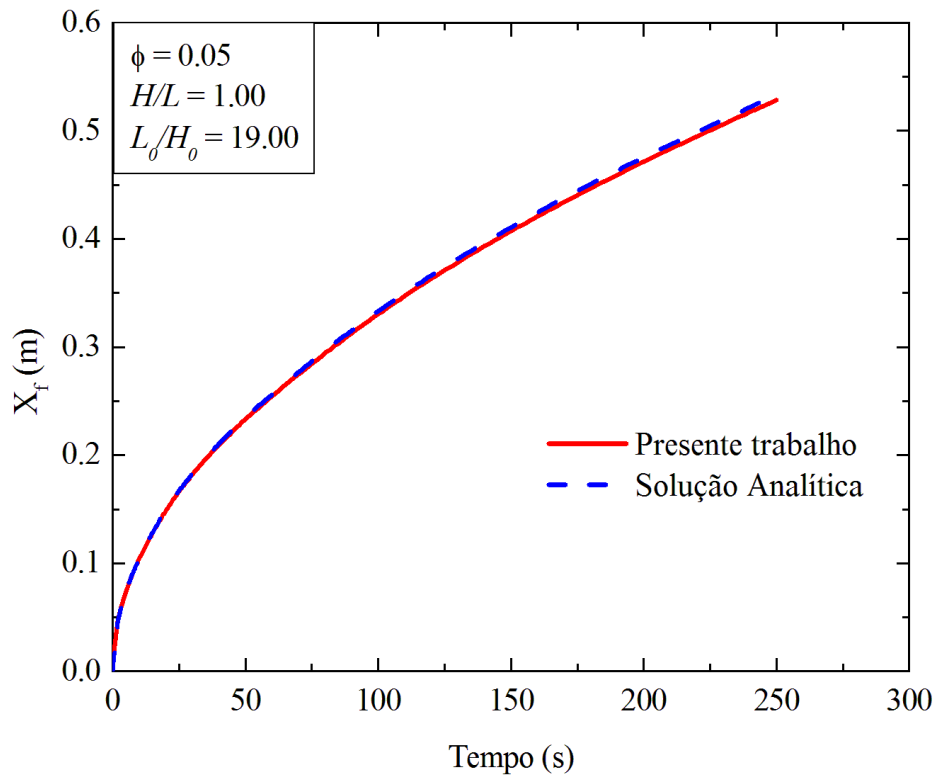


Figura 5.2 – Comparação entre a posição da linha de frente da resina em função do tempo obtida no presente trabalho e a solução analítica.

Com a definição dos procedimentos numéricos a serem empregados, bem como, a verificação do modelo numérico é possível partir para o estudo de avaliação da influência da geometria dos canais abertos sobre o tempo de infusão da resina no molde analisado.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização de uma moldagem bem sucedida, é necessário eliminar totalmente o ar residual no interior do meio poroso. A formação de vazios devido à impregnação parcial da resina no interior do reforço fibroso pode levar a falhas no emprego do produto final (JINLIAN et al., 2004; LOPES, 2009). Neste sentido, a otimização geométrica é importante pois não só aumenta a produtividade, pela redução do tempo de injeção, como aumenta a qualidade das peças produzidas pelo melhor preenchimento da resina, evitando assim a formação de espaços vazios, que passam a ser uma restrição na análise e definição do processo de Infusão de Resina Líquida (LRI).

Para obter o tempo de injeção, foi criada uma linha de referência no domínio (Figs. 4.1 e 4.2) definida pelos seguintes pontos: $P_1(x_1 = 0,05 \text{ m}, y_1 = 0,50 \text{ m})$ e $P_2(x_2 = 0,55 \text{ m}, y_2 = 0,50 \text{ m})$. A posição da linha de frente do escoamento foi monitorada ao longo desta linha. Quando o escoamento de resina atravessa completamente a linha de referência, isto é, quando a fração volumétrica ao longo de toda a linha é $f = 1,0$, considera-se que o processo de infusão está concluído.

6.1 Resultados da Avaliação Geométrica para um Canal em Forma de “I”

Foi avaliada a influência geométrica do canal aberto em forma de “I” introduzido em uma placa retangular com meio poroso sobre o tempo de infusão da resina no molde. Várias simulações foram realizadas, totalizando um conjunto de 60 simulações, com diferentes razões de L_0/H_0 e foi estudada a influência desta razão sobre o tempo de infusão para cinco diferentes valores de fração de área ocupada pelo canal aberto, $\phi = 0,005; 0,010; 0,030; 0,050$ e $0,100$.

Ressalta-se que o espaço de busca foi determinado considerando os limites do domínio, ou seja, $L_0 < L = 0,5 \text{ m}$ e $H_0 < H = 0,5 \text{ m}$. Além disso, foi considerada uma dimensão mínima para a espessura e comprimento dos canais, como sendo $L_0 \geq 0,005 \text{ m}$ e $H_0 \geq 0,005 \text{ m}$. Por exemplo, no caso do $\phi = 0,005$, como mostra a Tab. 6.1, a restrição de área ocupada pelo canal e a restrição imposta para as dimensões mínima do canal não permitem L_0 e H_0 maiores do que $0,25 \text{ m}$. Outro exemplo é o caso do $\phi = 0,100$, que pode ser visto na Tab. 6.2, em que os extremos das razões L_0/H_0 são obtidos considerando apenas a restrição dos limites do domínio, neste caso pode-se observar que como a fração de área do canal é maior, as dimensões de espessura e comprimento têm menor liberdade para variar dentro do domínio.

Tabela 6.1 – Dimensões H_0 e L_0 para a simulação do processo de LRI para um canal aberto em forma de “T” com $\phi = 0,005$.

L_0/H_0	H_0	L_0
0,02	0,2500	0,0050
0,10	0,1118	0,0111
0,50	0,0500	0,0250
2,00	0,0250	0,0500
4,00	0,0177	0,0707
6,00	0,0144	0,0866
8,00	0,0125	0,1000
10,00	0,0111	0,1118
12,00	0,0102	0,1225
14,00	0,0094	0,1323
30,00	0,0064	0,1936
50,00	0,0050	0,2500

Tabela 6.2 – Dimensões H_0 e L_0 para a simulação do processo de LRI para um canal aberto em forma de “T” com $\phi = 0,100$.

L_0/H_0	H_0	L_0
0,11	0,4767	0,0524
0,16	0,3953	0,0632
0,20	0,3535	0,0707
0,30	0,2887	0,0866
0,40	0,2500	0,1000
0,50	0,2236	0,1118
0,70	0,1889	0,1323
1,00	0,1581	0,1581
3,00	0,0913	0,2739
5,00	0,0707	0,3535
7,00	0,0598	0,4183
9,00	0,0527	0,4743

Os resultados mostram que o efeito da razão L_0/H_0 para as frações de área $\phi = 0,005$; 0,010; 0,030 e 0,050 para um canal em forma “T” sobre o tempo total de injeção da resina ao longo de todo

o domínio é semelhante para todas as frações ϕ estudadas, exceto para $\phi = 0,100$ devido à restrição da geometria para o limite superior de L_0/H_0 , como pode ser visto na Fig. 6.1. De uma forma geral, observa-se que as menores razões de L_0/H_0 conduziram aos melhores resultados, ou seja, existe uma redução no tempo (t) de injeção da resina quando o canal tem a maior penetração no interior do domínio poroso para a região da saída. Contudo, o aumento até o limite superior de L_0/H_0 conduz novamente a uma diminuição no tempo de injeção. Dessa forma, há uma razão mínima ótima global e uma razão ótima local situada no extremo superior de L_0/H_0 que conduzem aos menores tempos de injeção no meio fibroso e uma razão intermediária que leva ao pior desempenho. Nota-se uma diferença nesse comportamento apenas para o $\phi = 0,100$ onde há um crescimento quase assintótico do tempo de injeção em função da razão L_0/H_0 .

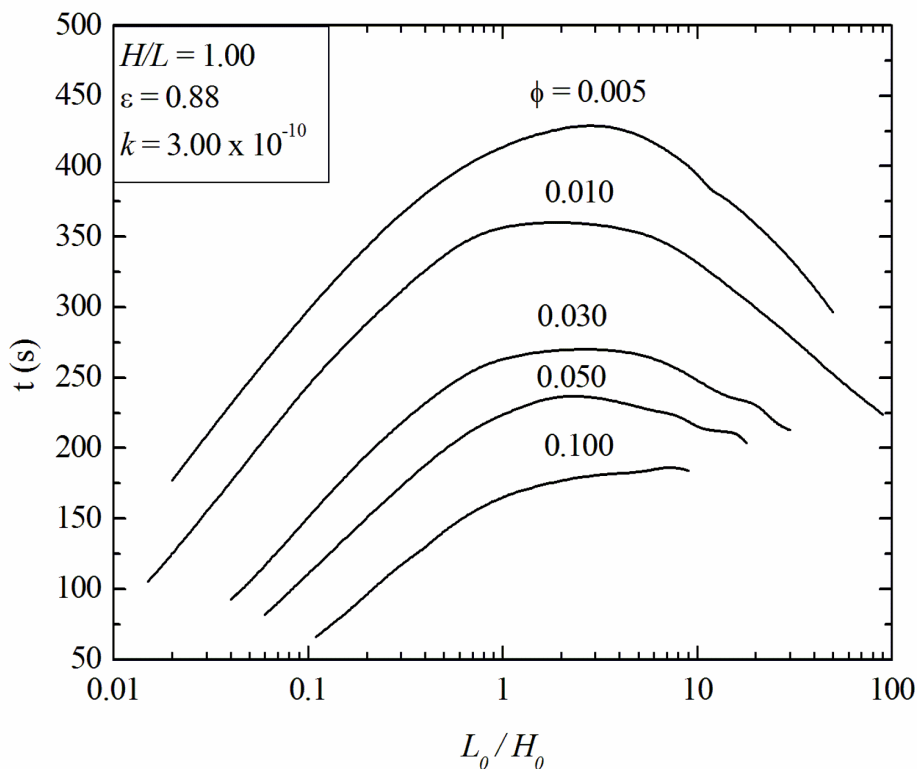


Figura 6.1 – Efeito da razão L_0/H_0 sobre o tempo de preenchimento no molde poroso para diferentes frações de área do canal aberto em forma de “I”.

Podem ser observados, por exemplo, que para a fração de área do canal $\phi = 0,010$, a razão de L_0/H_0 ótima é obtida para $(L_0/H_0)_o = 0,015$ e leva a um tempo de injeção da resina mínimo (t_m) de aproximadamente $t_m = 105,3$ s. Para o extremo superior de $L_0/H_0 = 90,0$ é obtido um tempo de injeção de $t = 224,0$ s e para a razão intermediária $L_0/H_0 = 1,0$, que corresponde ao pior desempenho, é obtido um tempo de injeção de $t = 362,6$ s. Os resultados mostram que, para $\phi = 0,010$, o desempenho fluido dinâmico (tempo de injeção) obtido para as geometrias ótimas global e local, respectivamente, é

aproximadamente 244,0% e 62,0% superior ao pior caso. Para $\phi = 0,100$, a razão de L_0/H_0 ótima é obtida para $(L_0/H_0)_o = 0,11$ e leva a um tempo de injeção mínimo de aproximadamente $t_m = 66,0$ s enquanto que para a razão máxima $L_0/H_0 = 9,0$ foi obtido um tempo de injeção de $t = 184,2$ s. Para este caso, com a razão intermediária $H_0/L_0 = 7,0$ foi obtido um tempo de injeção de $t = 187,3$ s, representando a geometria de pior desempenho, sendo aproximadamente 184,0% inferior ao alcançado pela geometria ótima global.

De forma geral, os resultados mostram a importância de avaliação geométrica nos processos de LRI. Além disso, os resultados indicam que o método Design Construtal é uma ferramenta adequada para o desenvolvimento e análise de projetos nesse tipo de problema. Nos resultados obtidos aqui, é possível verificar que a geometria ótima obtida para menores razões de ϕ possui um desempenho melhor do que geometrias intermediárias para razões maiores de ϕ . Por exemplo, para $\phi = 0,010$ o melhor desempenho ($t_m = 105,3$ s) obtido para $(L_0/H_0)_o = 0,015$ é superior a grande parte das geometrias obtidas para $\phi = 0,030; 0,050$ e $0,100$, indicando que a racionalização geométrica pode levar canais de menores dimensões a melhor desempenho do que canais com maiores dimensões.

Os resultados ótimos obtidos na Fig. 6.1 para cada fração de área ϕ são compilados na Fig. 6.2. A Figura 6.2 mostra a influência da razão entre a área do canal e a área da placa (ϕ) sobre o tempo de injeção uma vez minimizado no molde poroso com o canal aberto em forma de “I”. Os resultados da Fig. 6.2 indicam que, conforme esperado, o tempo de injeção uma vez minimizado (t_m) para as maiores frações de área do canal em “I” são menores do que para as menores magnitudes de ϕ . Por exemplo, o tempo de injeção mínimo (t_m) para $\phi = 0,100$ é de $t_m = 66,0$ s, enquanto que para $\phi = 0,005$ o tempo de injeção mínimo é de $t_m = 177,0$ s, ou seja, aproximadamente 168,0% de diferença. Nota-se também que para as menores razões de ϕ ($\phi \leq 0,02$) a queda de t_m com o aumento de ϕ é bastante elevada, enquanto que para $\phi > 0,02$ a taxa de decréscimo de t_m é suavizada.

Já a Fig. 6.3 mostra a influência da razão entre a área do canal e a área da placa (ϕ) sobre razão L_0/H_0 ótima $(L_0/H_0)_o$. De uma forma geral, os resultados mostram que o comportamento da razão geométrica $(L_0/H_0)_o$ pode se modificar com a variação da área ocupada pelo canal, ou seja, não há uma geometria ótima universal que conduza ao melhor desempenho para todas as frações de área dos canais abertos.

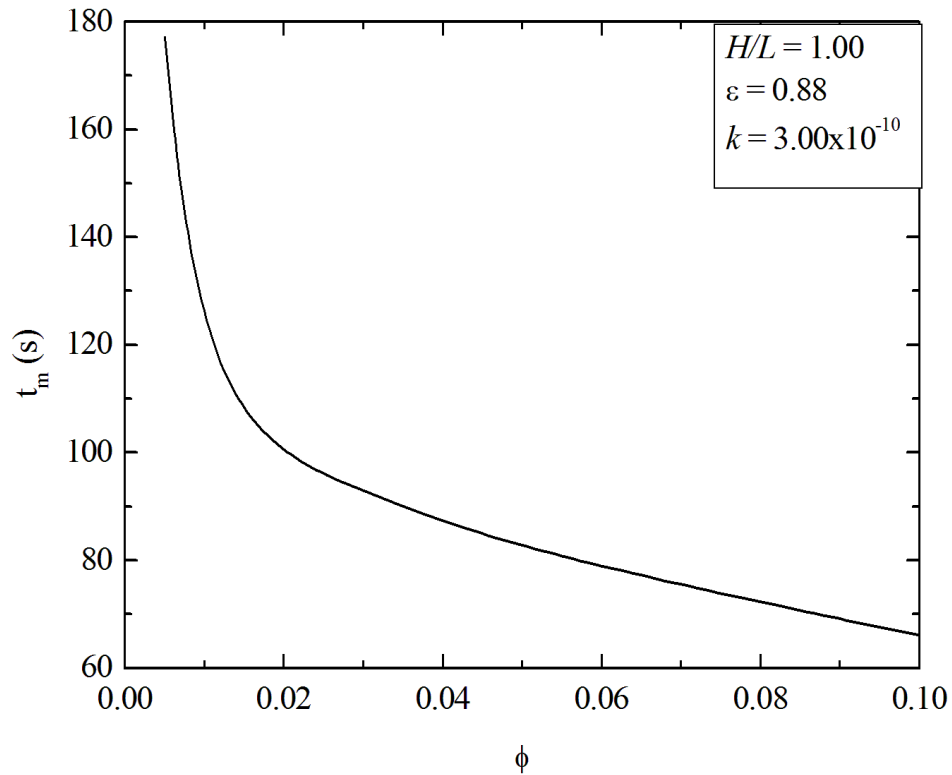


Figura 6.2 – Influência da razão entre a área do canal e a área da placa (ϕ) sobre o tempo de injeção mínimo no molde poroso com o canal aberto em forma de “T”.

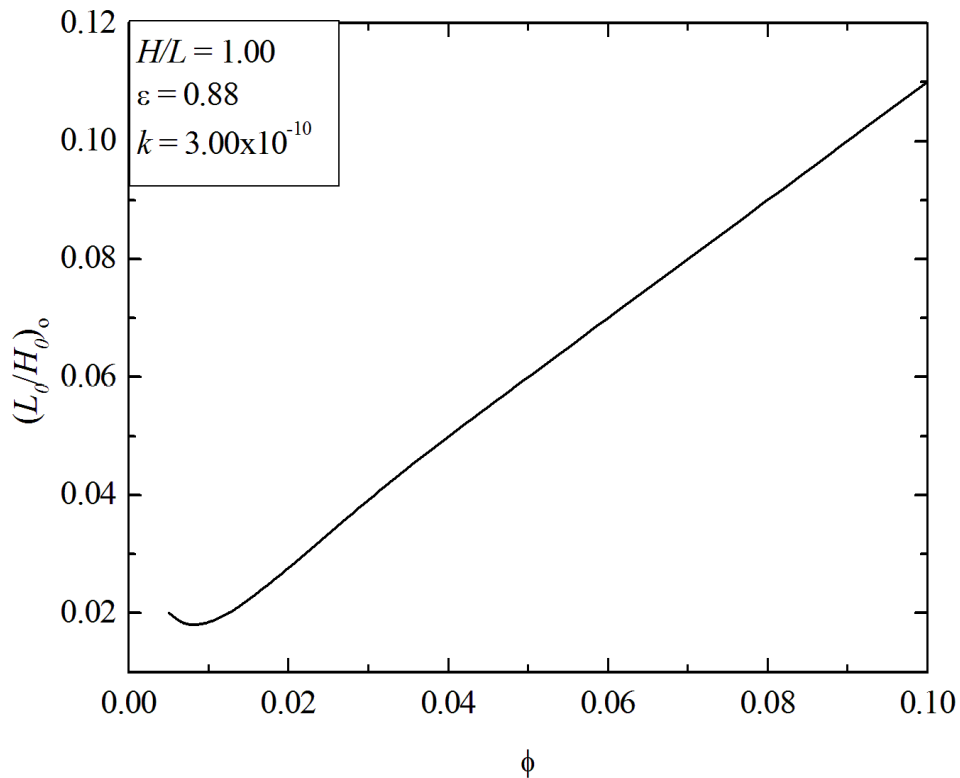


Figura 6.3 – Influência da razão entre a área do canal e a área da placa (ϕ) sobre a razão L_o/H_o ótima $(L_o/H_o)_o$.

A fim de ilustrar a influência da razão entre a área do canal e a área da placa (ϕ) e a razão L_0/H_0 , para um canal em forma de “T”, as Figs. 6.4 e 6.5 mostram o comportamento do avanço da resina para três instantes de tempo diferentes, exemplificando como ocorre o avanço da resina para $\phi = 0,010$ e $0,100$, respectivamente. Ressalta-se que de acordo com os resultados discutidos anteriormente, o efeito da razão L_0/H_0 para as frações de área $\phi = 0,005$; $0,010$; $0,030$ e $0,050$ em função do tempo são análogos e nota-se uma diferença apenas para $\phi = 0,100$. Nas figuras 6.4 e 6.5, a região vermelha representa a resina, ou seja, fração volumétrica (f) igual a 1, ao passo que a cor azul, representa o ar ($f = 0$). Regiões com outras cores (amarelo e verde) representam frações intermediárias da fase entre resina e ar, ou seja, $0,0 < f < 1,0$. Ressalta-se que esta descrição vale para todas as figuras apresentadas ilustrando a fração volumétrica da resina.

A Figura 6.4 mostra o avanço da resina para $\phi = 0,010$ e $(L_0/H_0)_o = 0,015$, $L_0/H_0 = 1,0$, $L_0/H_0 = 90,0$, que representam as razões extremas (geometria ótima global e local) e razão intermediária (pior caso), nos instantes de tempo $t = 20,0$ s; $60,0$ s e $100,0$ s, respectivamente. Na Figura 6.5 é apresentado o avanço da resina para $\phi = 0,100$ e $(L_0/H_0)_o = 0,11$, $L_0/H_0 = 7,0$, representando a geometria ótima e a de pior desempenho, nos instantes de tempo $t = 20,0$ s; $40,0$ s e $60,0$ s, respectivamente.

De uma forma geral, observa-se que, para as menores razões de L_0/H_0 , há um maior avanço da resina na direção y (direção de saída da resina da placa) e após o avanço pelo canal aberto, o escoamento da resina ocorre em dois sentidos (do meio para as extremidades laterais da placa). Além disso, na região da extremidade superior do canal, o comportamento da resina é radial. Esse comportamento faz com que a distribuição da resina no meio fibroso seja mais eficiente, minimizando o tempo de infusão da resina. Além disso, observa-se que não há formação de vazios que retardariam a infusão ou inviabilizariam a produção da peça estudada. Em alguns casos é possível observar que fica ar aprisionado nas laterais da placa, gerando vazios permanentes, porém estas regiões estão fora do domínio analisado. O comportamento da resina é radial para as menores razões de L_0/H_0 , para a razão intermediária de L_0/H_0 e linear na direção de y para as maiores razões de L_0/H_0 , ou seja, quando os canais ocupam a região inferior da placa com meio fibroso. Para as maiores razões de L_0/H_0 há uma redução na homogeneidade da distribuição da resina no domínio e, conseqüentemente, conduzindo aos maiores tempos de injeção. Para a avaliação geométrica de canais abertos em forma de “T” estudados aqui os canais mais alongados conduziram ao melhor desempenho devido à distribuição da resina de forma mais homogênea no domínio do meio fibroso, o que está de acordo com o princípio Construtal da Ótima Distribuição das Imperfeições.

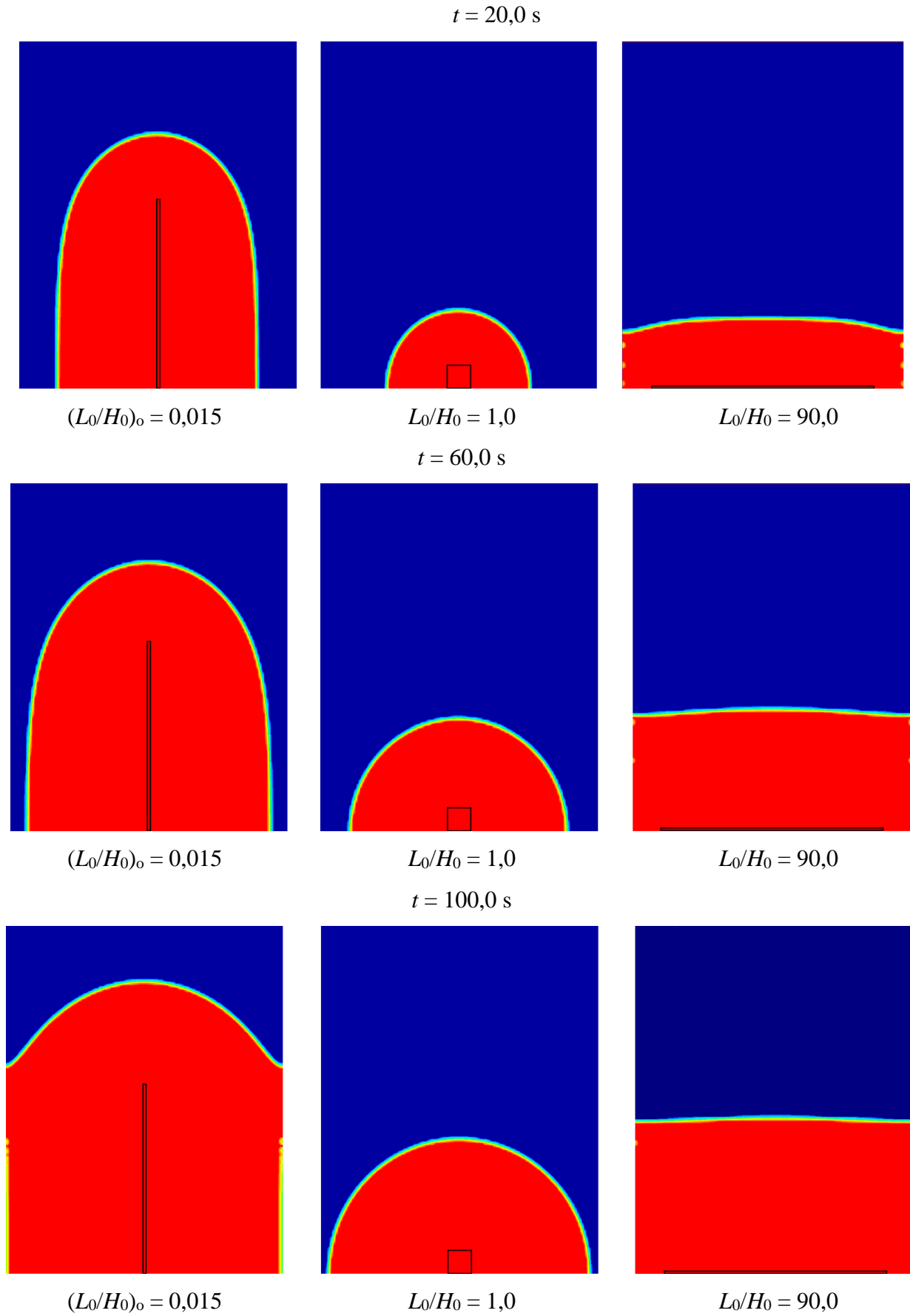


Figura 6.4 – Fração volumétrica da resina em função do tempo para $\phi = 0,010$ e três diferentes razões de L_0/H_0 : $(L_0/H_0)_o = 0,015$ (ótima global), $L_0/H_0 = 1,0$ (pior caso), $L_0/H_0 = 90,0$ (ótima local).

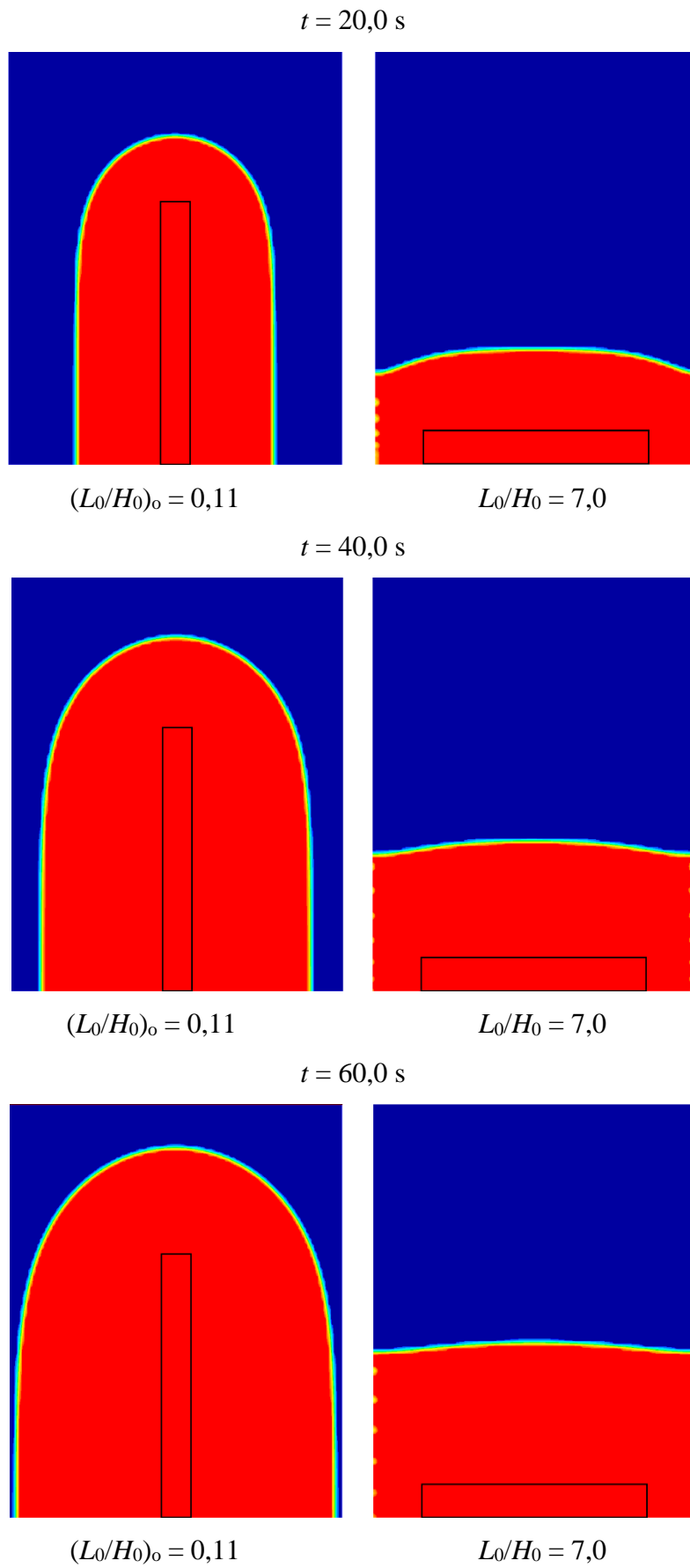


Figura 6.5 – Fração volumétrica da resina em função do tempo para $\phi = 0,100$ e duas diferentes razões de L_0/H_0 : $(L_0/H_0)_o = 0,11$ (ótima), $L_0/H_0 = 7,0$ (pior caso).

6.2 Resultados da Avaliação Geométrica para um Canal em Forma de “T”

Para avaliar a influência geométrica do canal aberto em forma de “T”, estudou-se o efeito das razões geométricas L_1/H_1 , L_0/H_0 e H_0/H_1 sobre o tempo de infusão de resina no domínio analisado. Para este caso o processo de otimização foi realizado apenas para $\phi = 0,050$, devido ao elevado número de simulações. Neste estudo específico, foi realizado um total de 189 simulações. O espaço de busca foi determinado considerando os limites do domínio, ou seja, $L_0 < L = 0,5$ m, $L_1 < L = 0,5$ m e $H_1 + H_0 < H = 0,5$ m.

Primeiramente é avaliado o efeito da razão L_1/H_1 no tempo de infusão de resina no molde para vários valores da razão L_0/H_0 e fixando H_0/H_1 para cada conjunto de valores de L_0/H_0 . As Figuras 6.6 – 6.9 mostram o efeito da razão L_1/H_1 sobre o tempo de infusão de resina no molde fibroso para várias razões de L_0/H_0 mantendo-se fixos $H_0/H_1 = 10,00$; $20,00$; $30,00$ e $40,00$, respectivamente. Ressalta-se que para os maiores valores H_0/H_1 , ou seja, para $H_0/H_1 = 30,00$ e $H_0/H_1 = 40,00$, ocorre uma limitação na liberdade do problema devido ao espaço ocupado pela geometria do canal, isso restringe a variação de L_0/H_0 . Por exemplo, para $H_0/H_1 = 40,00$ a variação é inviável para $L_0/H_0 > 0,100$, pois para tal variação a espessura do canal bifurcado se tornaria insignificante, o que desfigura a geometria do canal em forma de “T”.

Nas Figuras 6.6 – 6.9 as curvas contínuas representam as geometrias válidas, ou seja, as que não tiveram formação de vazios permanentes no interior do meio fibroso ou no canal vazio. As curvas pontilhadas representam os casos onde os espaços vazios formados ocorrem de forma permanente, mesmo que a linha de monitoramento indique um preenchimento do molde (em toda linha mensurse-se $f = 1,0$). Neste sentido, considera-se aqui uma injeção de resina com tempo infinito e estes casos são descartados do processo de otimização geométrica do canal em forma de “T”, uma vez que a existência de vazios é um problema crítico no processo de fabricação. Em outras palavras, a impregnação de resina dentro de todo o domínio é um parâmetro de suma importância e deve ser levado em conta para o projeto dos canais no processo de LRI.

De uma forma geral, os resultados das Figs. 6.6 – 6.9 mostram que, as maiores razões de L_1/H_1 conduziram aos melhores resultados, ou seja, existe uma redução no tempo (t) de injeção da resina quando o canal bifurcado tem maior penetração no interior do molde poroso para as laterais. Contudo, vale destacar que para certas geometrias em forma de “T”, especialmente as que possuem ramos bifurcados mais longos, há a formação de vazios nos vértices onde há expansão entre o canal simples e o bifurcado.

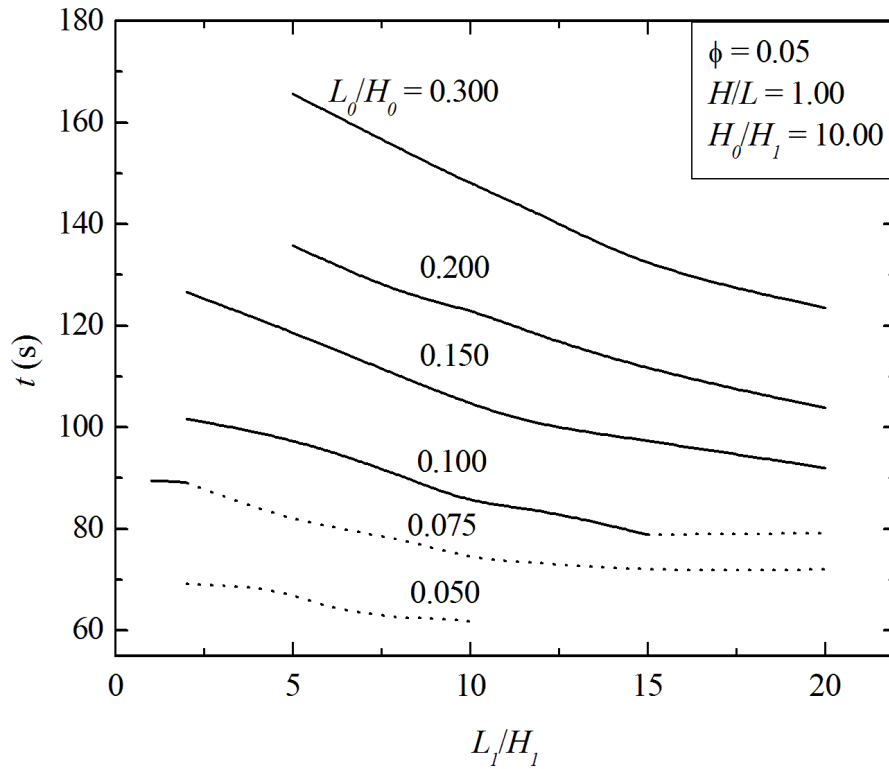


Figura 6.6 – Efeito da razão L_1/H_1 no tempo de preenchimento do molde para vários valores da razão L_0/H_0 e $H_0/H_1 = 10,00$.

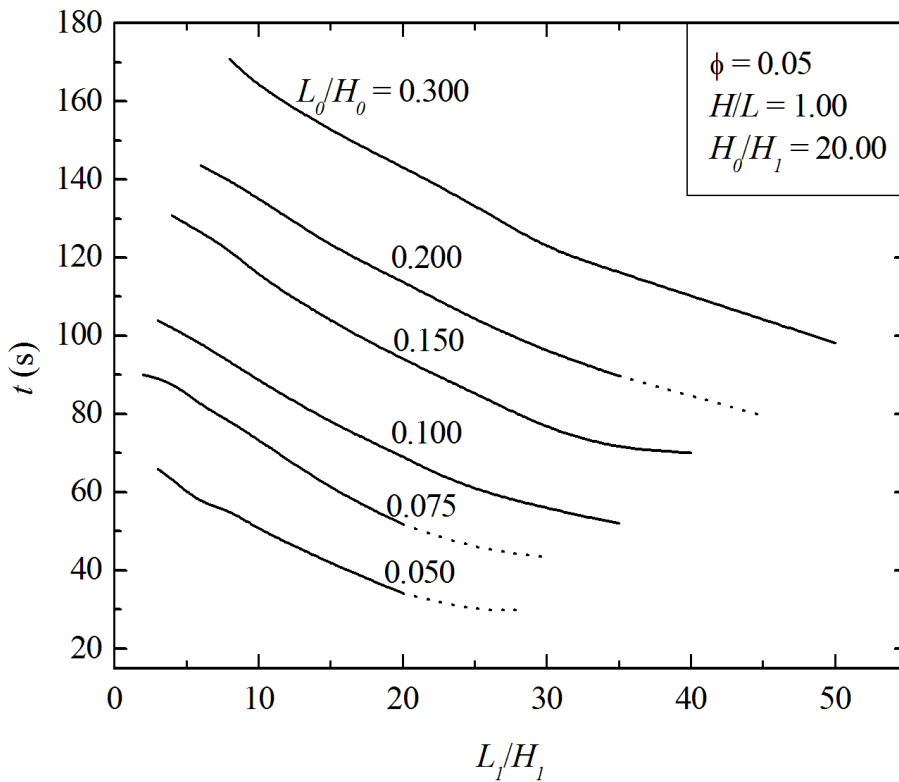


Figura 6.7 – Efeito da razão L_1/H_1 no tempo de preenchimento do molde para vários valores da razão L_0/H_0 e $H_0/H_1 = 20,00$.

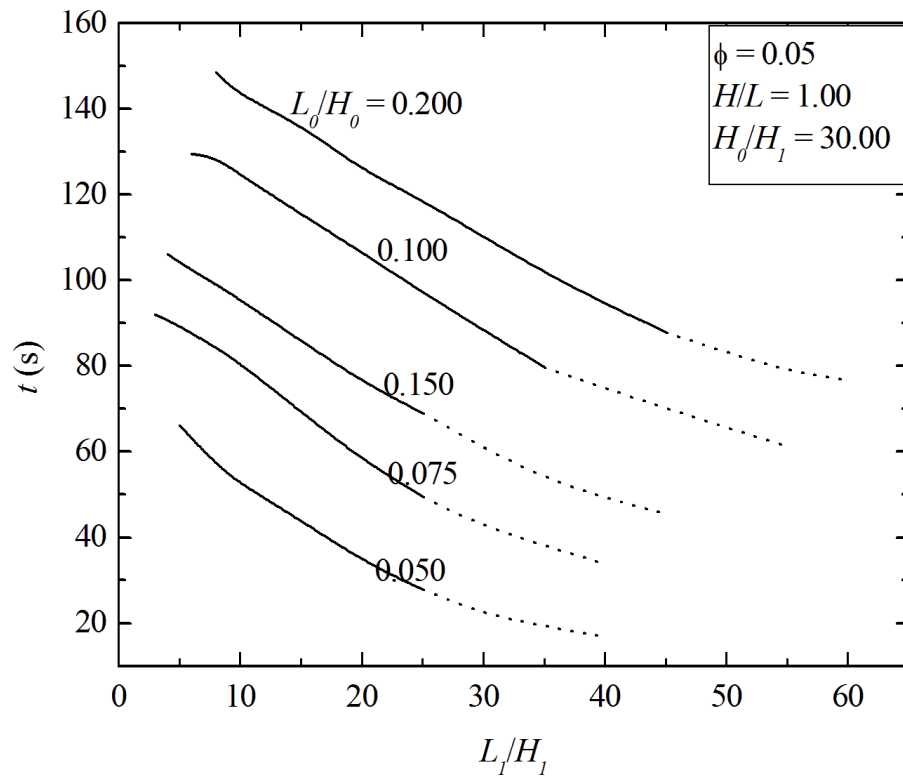


Figura 6.8 – Efeito da razão L_1/H_1 no tempo de preenchimento do molde para vários valores da razão L_0/H_0 e $H_0/H_1 = 30,00$.

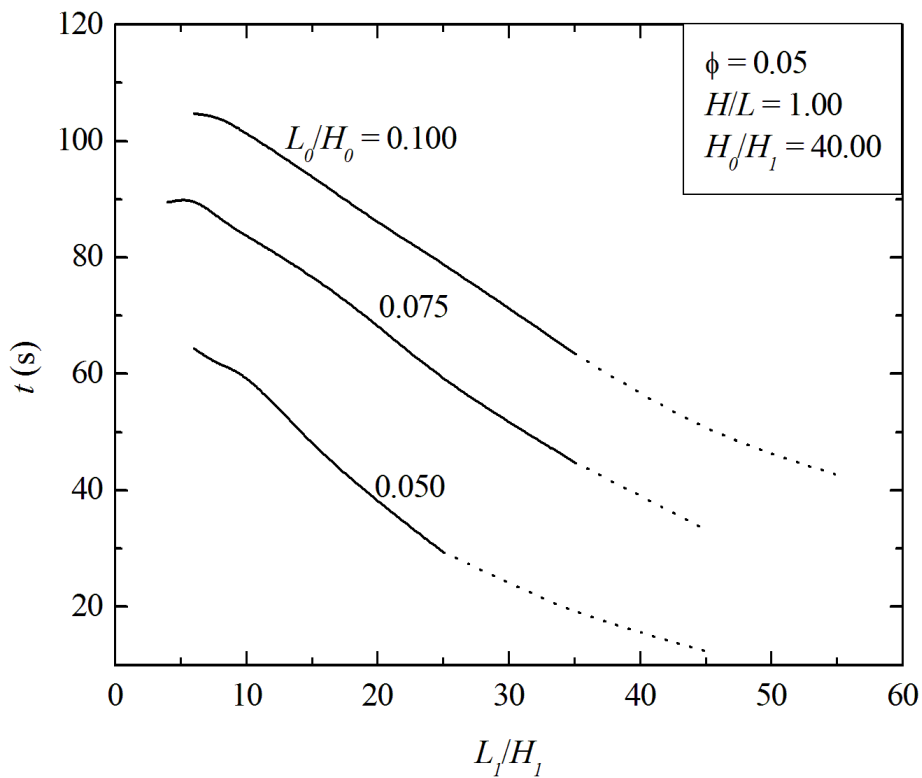


Figura 6.9 – Efeito da razão L_1/H_1 no tempo de preenchimento do molde para vários valores da razão L_0/H_0 e $H_0/H_1 = 40,00$.

Os resultados das Figs. 6.6 – 6.9 ainda indicam que para alguns casos de $H_0/H_1 = 10,00$ e $20,00$ e para todos os casos de $H_0/H_1 = 30,00$ e $40,00$ o aumento demasiado de L_1/H_1 , ou seja, do comprimento do canal bifurcado pela sua espessura, leva à formação de vazios distribuídos ao longo da placa. Na Figura 6.6 é possível observar que para $H_0/H_1 = 10,00$, $L_0/H_0 = 0,050$ e na maioria dos casos de $L_0/H_0 = 0,075$ o processo é ineficiente, pois embora o escoamento de resina atravesse completamente a linha de referência, indicando que todo o domínio está preenchido, ao analisar a qualidade do preenchimento de resina no molde percebe-se que a placa apresenta vazios e que a injeção de mais resina na entrada do canal não é capaz de desfazê-los, caracterizando-os como vazios permanentes. Um exemplo pode ser visto na Fig. 6.10 para o caso com $L_1/H_1 = 8,0$, $H_0/H_1 = 10,00$ e $L_0/H_0 = 0,050$ e $L_0/H_0 = 0,075$ para dois instantes de tempo diferentes, $t = 20,0$ s e $t = 80,0$ s, respectivamente.

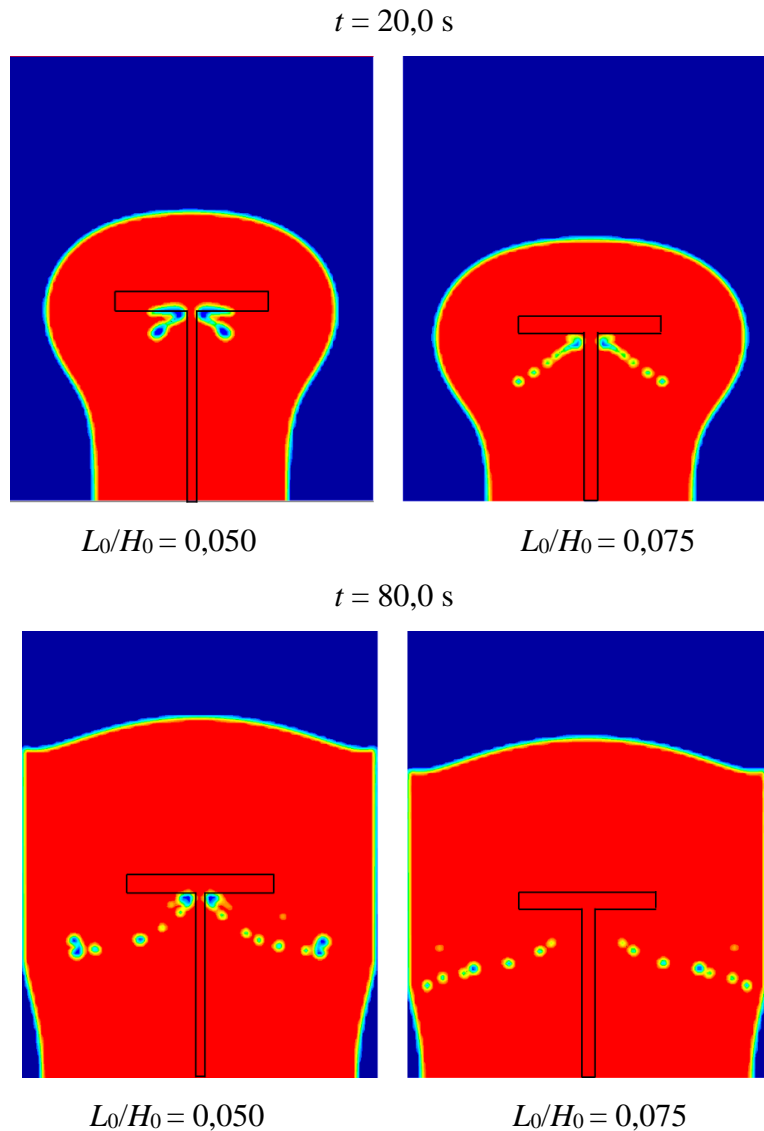


Figura 6.10 – Escoamento de resina com formação de vazios permanentes para $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$, $H_0/H_1 = 10,0$, $L_1/H_1 = 8,0$ e duas diferentes razões de L_0/H_0 .

A formação dos vazios é causada pelo descolamento de camada limite do escoamento da resina do canal simples para o bifurcado e posterior formação de um par de vórtices, conforme ilustrado na Fig. 6.10. Os vazios formados tendem a ficar retidos na região do vértice devido à dificuldade de dissipar o vórtice formado na expansão do canal em forma de “T”. A formação desses vazios representam irreversibilidades no sistema de fluxo requerendo uma maior pressão na injeção da resina na entrada do canal para minimizar os vazios gerados, o que do ponto de vista do processo de infusão pode se tornar inviável devido ao deslocamento do material fibroso. No decorrer do tempo, em alguns casos, os vazios se espalham pelo meio fibroso e se desfazem. Em outros casos, no entanto, os vazios formados são permanentes e, mesmo que a linha de monitoramento indique um preenchimento completo de resina, a geometria não é considerada para projeto devido à restrição de preenchimento de todo o molde. Assim, cabe destacar que no caso da geometria em “T” é necessário não somente observar o tempo de injeção como também verificar a formação de vazios permanentes na placa. No caso da ocorrência dos mesmos, o processo torna-se inutilizável, pois numa perspectiva real a peça a ser fabricada apresentará defeitos.

A fim de ilustrar a influência da razão L_1/H_1 no tempo de preenchimento do molde, a Fig. 6.11 apresenta o comportamento do avanço da resina para três instantes de tempo diferentes, $t = 10,0$ s, $30,0$ s e $60,0$ s, exemplificando o comportamento do avanço da resina em função do tempo para $H_0/H_1 = 40,0$, $L_0/H_0 = 0,1$ e duas diferentes razões de L_1/H_1 , $L_1/H_1 = 6,0$ e $(L_1/H_1)_o = 35,0$. Estas geometrias representam para estes parâmetros fixos o caso com pior desempenho e a forma geométrica uma vez otimizada, respectivamente. Para a razão $L_1/H_1 = 6,0$ é obtido um tempo de injeção de $t = 104,7$ s, enquanto que a razão $(L_1/H_1)_o = 35,0$ leva a um tempo de injeção da resina uma vez minimizado de $t_m = 63,5$ s, o que é cerca de 65,0% melhor em relação à geometria de pior desempenho. Os resultados mostram que, para a menor razão de H_1/L_1 , a distribuição da resina ocorre de uma forma mais radial na parte superior do canal em forma de “T” e retilínea em direção às superfícies laterais do molde na parte inferior do “T”, semelhantemente ao que ocorre nos canais em forma de “T” com elevada inserção do canal na placa fibrosa. Conforme a razão de H_1/L_1 é alterada para $(H_1/L_1)_o = 35,0$, o avanço radial da resina na parte superior do canal em “T” é intensificado em comparação com o caso anterior ($H_1/L_1 = 6,0$), intensificando também o avanço retilíneo do escoamento na parte inferior da placa com meio fibroso. Conseqüentemente, o preenchimento da resina na direção horizontal (do canal aberto para as paredes laterais) é completado em um tempo menor e o avanço final na direção de saída da placa fibrosa também é melhorado. Contudo, o aumento demasiado do comprimento do ramo secundário (aumento de H_1/L_1) leva a formação de vazios permanentes. Dessa forma, há uma razão intermediária ótima que conduz ao menor tempo de injeção no meio fibroso.

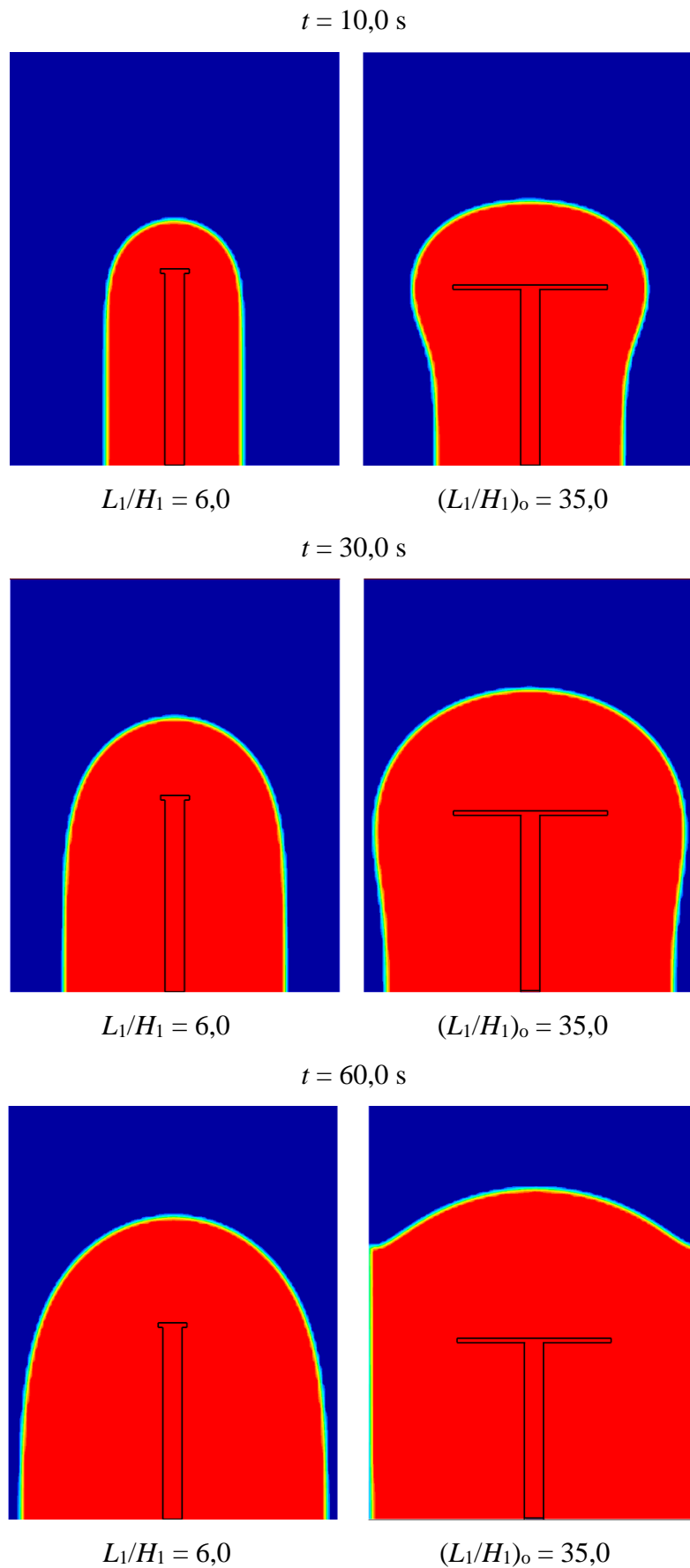


Figura 6.11 – Fração volumétrica da resina em função do tempo para $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$, $H_0/H_1 = 40,0$, $L_0/H_0 = 0,1$ e duas diferentes razões de L_1/H_1 .

Com a variação da razão L_1/H_1 obtêm-se valores mínimos para o tempo de infusão da resina no molde, para cada valor estudado de L_0/H_0 associados a diferentes razões de H_0/H_1 . Este tempo é denominado o tempo de infusão uma vez minimizado (t_m) e a correspondente razão L_1/H_1 é denominada a razão uma vez otimizada, $(L_1/H_1)_o$. Os resultados ótimos obtidos nas Figs. 6.6 – 6.9 são compilados e apresentados na Fig. 6.12. A Figura 6.12 ilustra a influência da razão L_0/H_0 no tempo de infusão uma vez minimizado, t_m , para diferentes razões de H_0/H_1 estudadas aqui. Pode ser observado que para $H_0/H_1 = 20,0$; $30,0$ e $40,0$ o efeito da razão L_0/H_0 sobre o tempo de injeção da resina uma vez minimizado é semelhante, nota-se uma diferença neste efeito apenas para $H_0/H_1 = 10,0$. De uma forma geral, observa-se que as menores razões de L_0/H_0 conduziram ao tempo de infusão duas vezes minimizado (t_{mm}), os seja, existe uma predominância para os menores tempos de injeção da resina quando o ramo simples (canal principal) tem maior penetração no interior do domínio poroso para a região da saída. Nota-se uma diferença nesse comportamento apenas para $H_0/H_1 = 10,0$, onde existe uma razão intermediária de L_0/H_0 que conduz ao desempenho ótimo do problema, este fato está relacionado com a predominância de vazios para grande parte das geometrias com $L_0/H_0 < 0,1$, conforme já foi discutido.

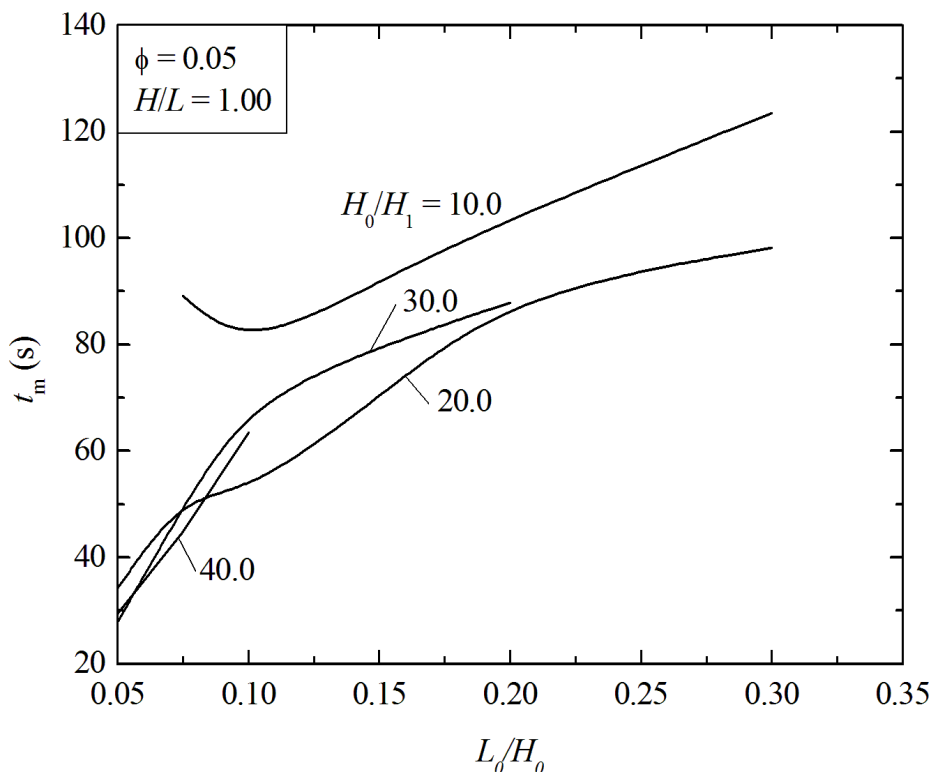


Figura 6.12 – Efeito da razão L_0/H_0 no tempo de infusão uma vez minimizado, t_m , para diferentes razões de H_0/H_1 .

A Figura 6.13 destaca a influência da razão L_0/H_0 sobre a razão L_1/H_1 uma vez otimizada, $(L_1/H_1)_o$, para diferentes razões de H_0/H_1 . Observa-se que o efeito de L_0/H_0 sobre a razão $(L_1/H_1)_o$ se

altera para diferentes valores de H_0/H_1 . No entanto, nota-se que para $H_0/H_1 = 20,0$; $30,0$ e $40,0$ a razão de $L_0/H_0 = 0,050$ conduz a uma região comum de $(L_1/H_1)_o$ situada entre as razões 20 e 25, ou seja, existe uma região de L_1/H_1 que conduz aos melhores desempenhos do canal em forma de “T” estudado. Para $H_0/H_1 = 10,0$, nota-se que a razão de $L_0/H_0 = 0,075$ conduz a uma razão $(L_1/H_1)_o$ mínima de $(L_1/H_1)_o = 2,0$, o que leva a uma geometria em forma de “T” com o canal principal alongado e abas curtas, o que é uma exceção no formato das geometrias para $(L_1/H_1)_o$, esse fato está relacionado com a restrição de otimização imposta pela formação de vazios permanentes para maiores razões de L_1/H_1 . Para o referido caso, nota-se ainda que para maiores razões de L_0/H_0 a razão $(L_1/H_1)_o$ tende a se estabilizar na faixa de $(L_1/H_1)_o = 20,0$. É importante destacar que uma razão geométrica influencia no efeito de outra razão sobre o objetivo do sistema de fluxo, neste caso o menor tempo para injeção da resina no meio fibroso.

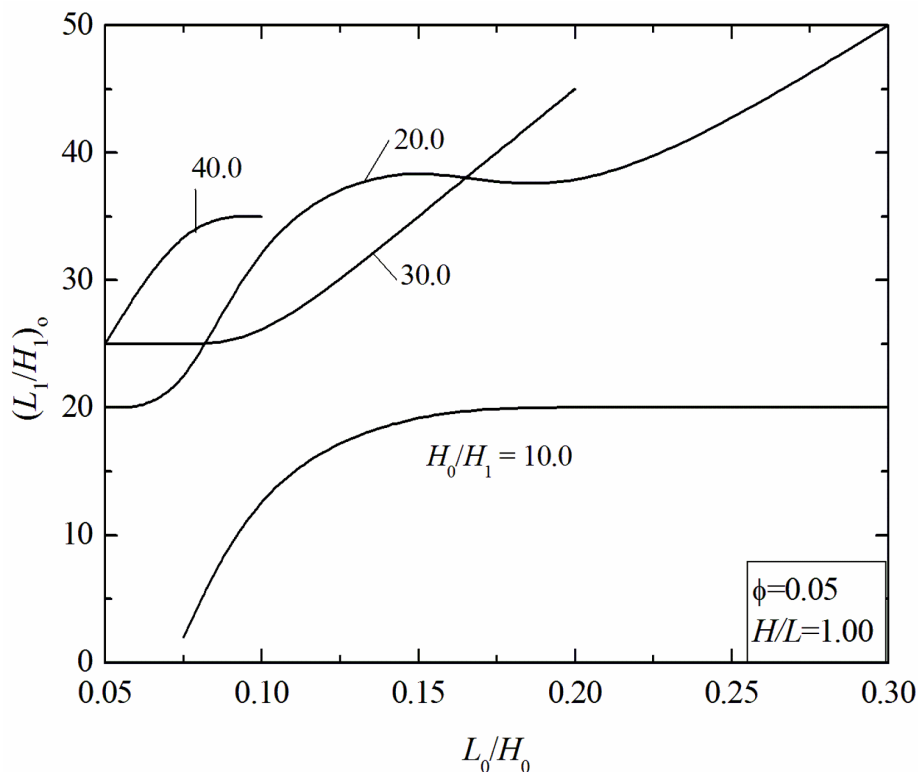


Figura 6.13 – Efeito da razão L_0/H_0 sobre a razão L_1/H_1 uma vez otimizada, $(L_1/H_1)_o$, para diferentes razões de H_0/H_1 .

Com a variação da razão L_1/H_1 para cada valor de L_0/H_0 e mantendo constante a razão H_0/H_1 , para cada conjunto de simulações, obtêm-se a otimização de dois graus de liberdade (L_1/H_1 e L_0/H_0). Nesse caso, o tempo de infusão mínimo obtido é denominado duas vezes minimizado (t_{mm}), e as correspondentes razões L_1/H_1 e L_0/H_0 são denominadas, respectivamente, duas vezes otimizada $(L_1/H_1)_{oo}$ e uma vez otimizada $(L_0/H_0)_o$. Com a repetição do processo variando também H_0/H_1 , é

obtido o tempo mínimo de infusão três vezes minimizado (t_{mmm}), a razão L_1/H_1 três vezes otimizada $(L_1/H_1)_{ooo}$, a razão L_0/H_0 duas vezes otimizada $(L_0/H_0)_{oo}$ e a razão H_0/H_1 uma vez otimizada $(H_0/H_1)_o$. As geometrias ótimas obtidas nas Figs. 6.12 e 6.13 são compiladas e apresentadas na Fig. 6.14. Mais precisamente, a Fig. 6.14 apresenta o efeito da razão H_0/H_1 sobre o tempo de infusão duas vezes minimizado (t_{mm}) e conseqüentemente sobre as respectivas geometrias ótimas L_0/H_0 e L_1/H_1 .

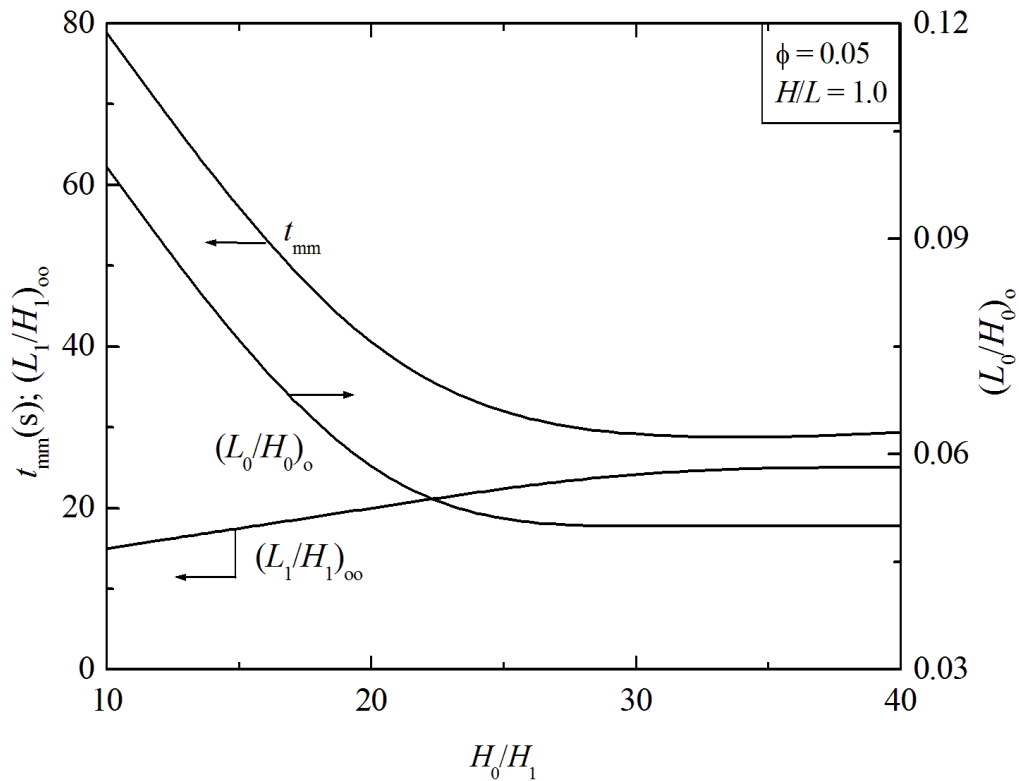


Figura 6.14 – Efeito da razão H_0/H_1 ao longo do tempo de infusão duas vezes minimizado, t_{mm} , e as respectivas formas ótimas, $(L_0/H_0)_o$, $(L_1/H_1)_{oo}$.

Os resultados mostram que o comportamento do tempo duas vezes minimizado sofre grandes variações com a variação da razão H_0/H_1 estudada e que existe uma forte dependência das razões $(L_1/H_1)_{oo}$ e $(L_0/H_0)_o$. O tempo mínimo três vezes minimizado (t_{mmm}) é obtido para a razão $(H_0/H_1)_o = 30,0$ que é levemente inferior ao encontrado para $H_0/H_1 = 40,0$, sendo possível afirmar apenas que há uma região de ótimo para a geometria três vezes otimizada. Nota-se ainda na Fig. 6.14 que para razões maiores de H_0/H_1 o comportamento de t_{mm} , $(L_1/H_1)_{oo}$ e $(L_0/H_0)_o$ tendem a uma região ótima comum. Mais precisamente, para as razões $H_0/H_1 = 20,0$; $30,0$ e $40,0$ a maior diferença encontrada para t_{mm} é de aproximadamente 23,0%. Para estes casos, a razão $(L_0/H_0)_o$ torna-se constante e a razão $(L_1/H_1)_{oo}$ tem uma pequena diferença em comparação com a razão $H_0/H_1 = 20,0$. Essa diferença se estabiliza para as razões $H_0/H_1 = 30,0$ e $H_0/H_1 = 40,0$. Para a razão mínima de $H_0/H_1 = 10,0$, o tempo de injeção duas vezes minimizado, t_{mm} , é consideravelmente maior que as demais razões de H_0/H_1 , levando a

um tempo de injeção duas vezes minimizado cerca de 183,0% maior em relação ao caso ótimo. Além disso, as razões $(L_1/H_1)_{oo}$ e $(L_0/H_0)_o$ são diferentes dos demais casos aqui analisados, reforçando o que foi afirmado anteriormente que a mudança de um parâmetro geométrico pode alterar completamente a influência de outras razões geométricas sobre o desempenho do processo de infusão.

Ressalta-se que através da região considerada ótima, obtém-se o menor tempo de infusão possível para a otimização geométrica, caracterizando-o como o tempo de infusão três vezes minimizado (t_{mmm}). Esse tempo é obtido para uma razão intermediária, $(H_0/H_1)_o = 30,0$, porém para a razão máxima, $H_0/H_1 = 40,0$, a diferença encontrada no desempenho da geometria é de cerca 5,0%, ou seja, o desempenho da razão geométrica $H_0/H_1 = 30,0$ é levemente superior ao de razão $H_0/H_1 = 40,0$. Isso indica que apesar de numericamente ter sido obtida a razão $(H_0/H_1)_o = 30,0$, H_0/H_1 uma vez otimizada, a razão $H_0/H_1 = 40,0$ também tem um desempenho muito bom, conseqüentemente a razão que possibilitar uma construção geométrica mais fácil é a recomendada para futuras aplicações.

Para corroborar essa observação, a Tab. 6.3 mostra a razão L_0/H_0 uma vez otimizada, L_1/H_1 duas vezes otimizada e o tempo de injeção da resina duas vezes minimizado para cada razão H_0/H_1 estudada e a Fig. 6.15 mostra as respectivas formas ótimas no domínio analisado para os diferentes valores de H_0/H_1 . É possível observar que para a razão H_0/H_1 de pior desempenho, $H_0/H_1 = 10,0$, a geometria em forma de “T” é restrita na região inferior da placa e que para as maiores razões de H_0/H_1 o desempenho é melhorado levando a formas geométricas com maior penetração no meio poroso. Contudo, o aumento da penetração do canal em forma de “T” no meio fibroso depende também da razão entre a espessura dos canais entre os ramos simples e bifurcado. Para o caso de $H_0/H_1 = 40,0$ a espessura do canal do ramo bifurcado fica muito pequena, de forma que o canal começa a dificultar o escoamento da resina.

Tabela 6.3 – Relação das razões ótimas e o tempo de injeção duas vezes minimizado para diferentes razões de H_0/H_1 , para $\phi = 0,05$ e $H/L = 1$.

H_0/H_1	$(L_0/H_0)_o$	$(L_1/H_1)_{oo}$	t_{mm} (s)
10,0	0,10	15	78,8
20,0	0,05	20	34,2
30,0	0,05	25	27,9
40,0	0,05	25	29,4

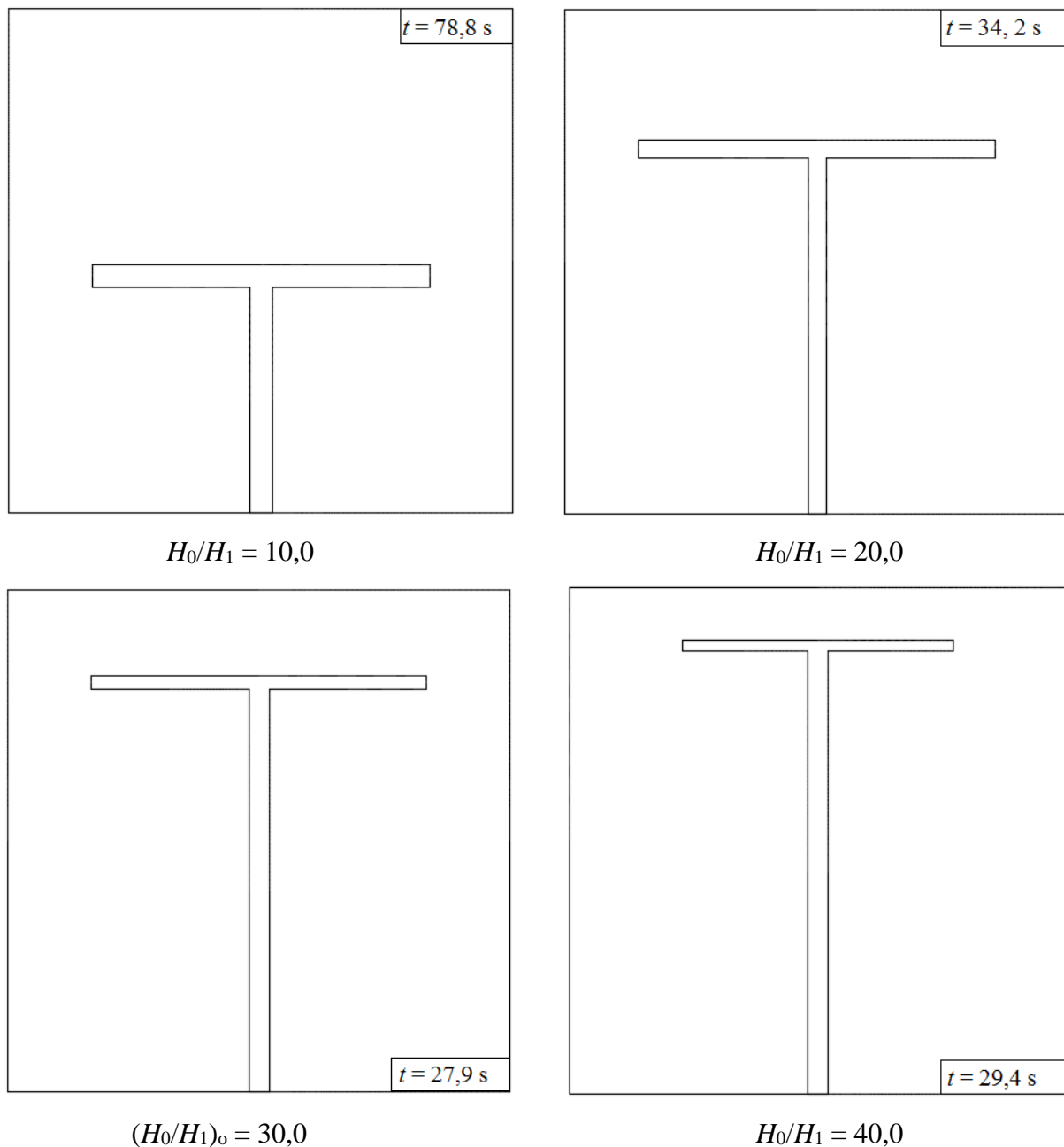


Figura 6.15 – Ilustração das melhores formas geométricas para o canal aberto em forma de “T” no domínio analisado para $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$, para as diferentes razões de H_0/H_1 estudadas: $H_0/H_1 = 10,0$, $H_0/H_1 = 20,0$, $(H_0/H_1)_o = 30,0$ e $H_0/H_1 = 40,0$.

Com o intuito de ilustrar o comportamento transiente do escoamento da resina no molde as Figs. 6.16 e 6.17 mostram a distribuição da fração volumétrica da resina em função do tempo para a razão H_0/H_1 de pior desempenho, $H_0/H_1 = 10,0$, e para razão H_0/H_1 uma vez otimizada, $(H_0/H_1)_o = 30,0$, com as correspondentes razões ótimas: $(L_0/H_0)_{oo}$ e $(L_1/H_1)_{ooo}$. As topologias são apresentadas para os seguintes instantes de tempo: $t = 20,0$ s; $40,0$ s e $60,0$ s, respectivamente.

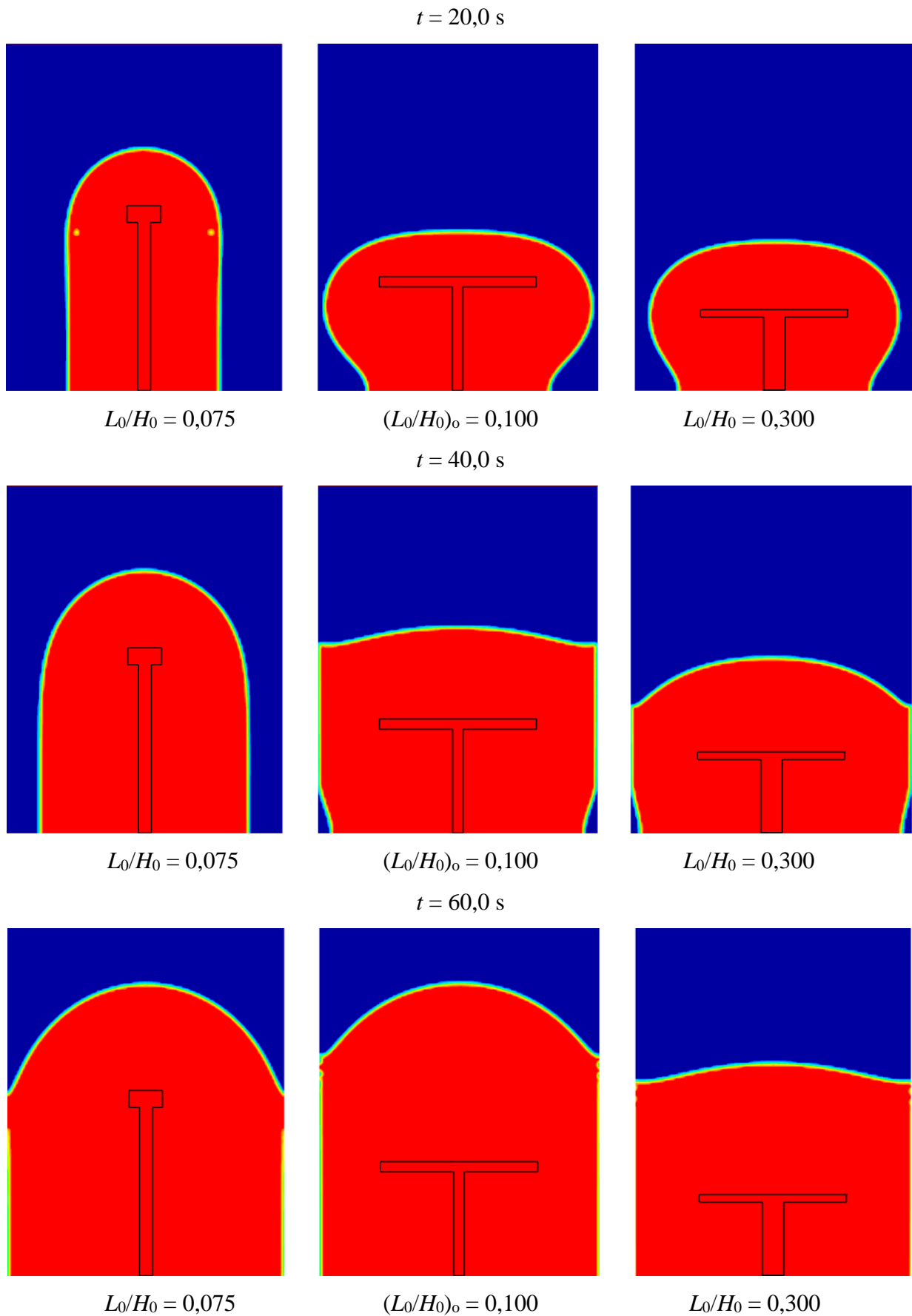


Figura 6.16 – Fração volumétrica da resina em função do tempo para $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$, $H_0/H_1 = 10,0$, para três diferentes razões de L_0/H_0 .

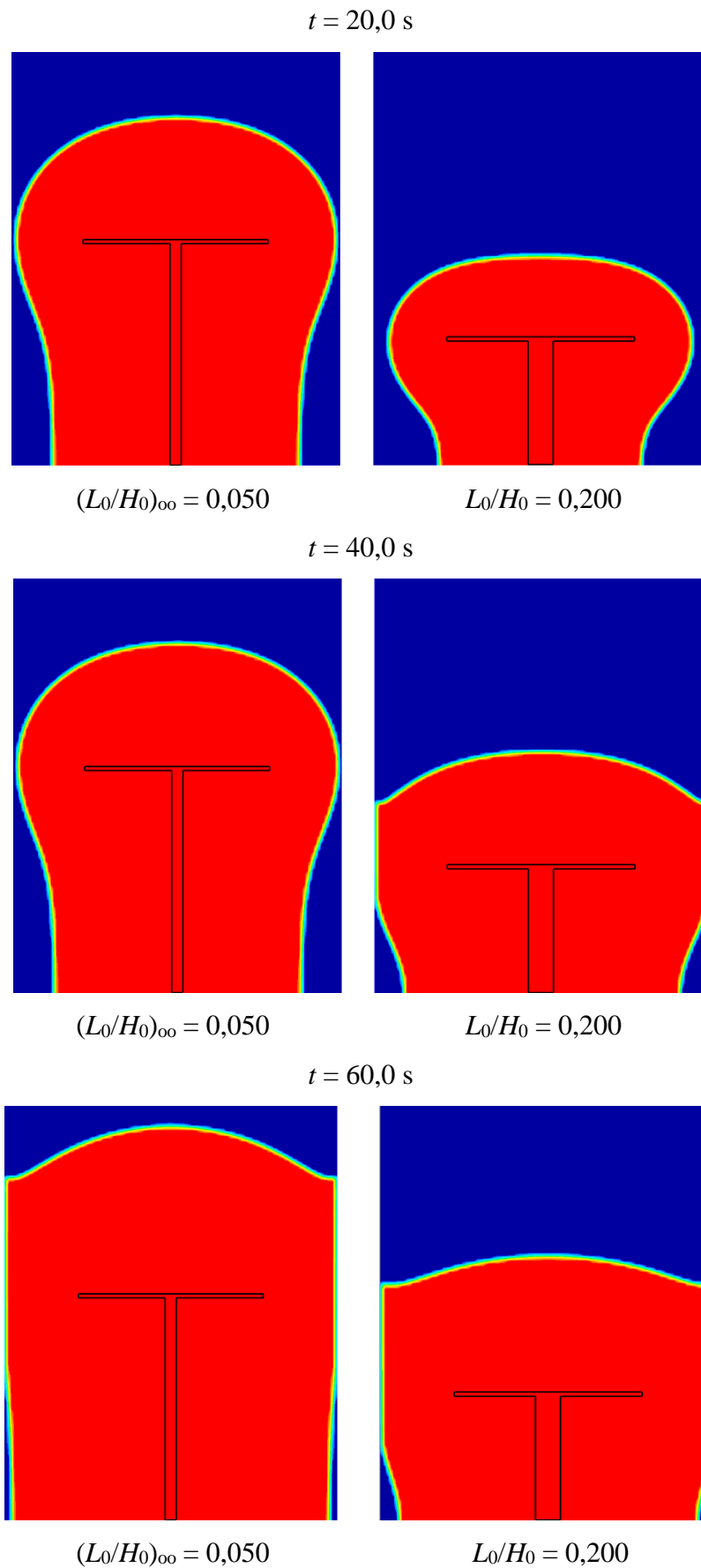


Figura 6.17 – Fração volumétrica da resina em função do tempo para $\phi = 0,05$, $H/L = 1,0$, $(H_0/H_1)_o = 30,0$, para duas diferentes razões de L_0/H_0 .

A Figura 6.16 ilustra o avanço da resina nos instantes de tempo analisados para $H_0/H_1 = 10,0$ e $L_0/H_0 = 0,075$, $(L_0/H_0)_o = 0,100$ e $L_0/H_0 = 0,300$ que representam, para este caso, uma razão de desempenho intermediário, a razão ótima de L_0/H_0 e razão de pior desempenho, respectivamente. Para a razão $L_0/H_0 = 0,075$ é obtido um tempo de injeção uma vez minimizado de $t_m = 89,1$ s, a razão $(L_0/H_0)_o = 0,100$ leva a um tempo de injeção da resina duas vezes minimizado de $t_{mmm} = 78,8$ s e para a razão $L_0/H_0 = 0,300$ é obtido um tempo de injeção uma vez minimizado de $t_m = 123,5$ s. Os resultados mostram que, para $H_0/H_1 = 10,0$, o desempenho fluido dinâmico (tempo de injeção) do pior caso e do caso intermediário é de aproximadamente 57,0% e 13,0%, respectivamente, inferior ao obtido para a geometria uma vez otimizada.

Na Figura 6.17 é apresentado o avanço da resina para a razão ótima, $(H_0/H_1)_o = 30,0$ e duas diferentes razões de L_0/H_0 , $(L_0/H_0)_{oo} = 0,050$, $L_0/H_0 = 0,200$, que representam a correspondente razão duas vezes otimizada e razão de pior desempenho para $(H_0/H_1)_o = 30,0$, respectivamente. Para a razão $(L_0/H_0)_{oo} = 0,050$ é obtido um tempo de injeção três vezes minimizado de $t_{mmm} = 27,9$ s e a razão $L_0/H_0 = 0,200$ leva a um tempo de injeção uma vez minimizado de $t_m = 87,9$ s, ou seja, cerca de 215,0% maior que o obtido para a geometria ótima.

De uma forma geral, é possível notar que para as menores razões de L_0/H_0 , há um maior avanço da resina na direção y (direção da saída da placa. No entanto, o escoamento na direção x ocorre mais lentamente, o que acaba retardando o avanço da resina ao longo do tempo. Isso é claramente ilustrado na Fig. 6.16 ($L_0/H_0 = 0,075$) e $((L_0/H_0)_o = 0,100)$ do tempo $t = 20,0$ s até o tempo $t = 60,0$ s. Para $t = 60,0$ s o avanço na direção y é maior para a razão intermediária de L_0/H_0 .

Os resultados discutidos até aqui mostraram que, para o canal em forma de “T”, todas as razões geométricas estudadas, ou seja, todos os graus de liberdade, exercem influência sobre o tempo de infusão da resina no molde. Mais precisamente, todos os parâmetros geométricos mostraram alguma sensibilidade sobre o tempo de infusão, indicando que para um estudo real recomenda-se que todos os parâmetros geométricos sejam avaliados.

Fazendo uma comparação entre o desempenho dos canais em forma de “T” e em de forma “I”, para $\phi = 0,05$, sobre o tempo de infusão, têm-se que a geometria ótima no caso do canal em forma de “I” levou a um tempo de injeção uma vez minimizado de $t_m = 81,5$ s, enquanto que a geometria três vezes otimizada para o canal em forma de “T” conduziu a um tempo de injeção três vezes minimizado de $t_{mmm} = 27,9$ s, ou seja, o desempenho fluido dinâmico é melhorado cerca de 192,0%. Para o estudo realizado, as geometrias dos canais abertos em forma de “I” e em forma de “T” foram completamente otimizadas sendo observado que a geometria mais complexa conduziu a um melhor desempenho do processo de infusão, o que indica futuros estudos com outras formas geométricas de canais abertos. Neste sentido, os resultados mostram a importância da avaliação geométrica para o

processo de infusão de resina líquida e a aplicação do Design Construtal para racionalizar o projeto desse tipo de processo.

6.3 Resultados da Avaliação Geométrica para Diferentes Configurações de Canais Abertos

Esta sessão apresenta os resultados de um estudo simplificado, onde compara-se o tempo de infusão da resina para quatro diferentes configurações de canais abertos: em forma de “I”, em forma de “T”, “duplo-T” e em forma de “Y”, conforme ilustram as Figs. 4.1, 4.2 e 6.18. Neste estudo específico, a espessura e a soma de todos os comprimentos dos canais são consideradas iguais, ou seja, apenas a configuração do canal é alterada. Para o canal em forma de “I” considera-se as seguintes dimensões $L_0 = 0,0635$ m e $H_0 = 0,400$ m. Para o canal em forma de “T” as dimensões são $L_0 = H_1 = 0,0635$ m e $H_0 = L_1 = 0,200$ m ($H_0 + L_1 = 0,400$ m). Para o canal “duplo-T” as dimensões impostas são $L_0 = H_1 = H_3 = 0,0635$ m e $H_0 = L_1 = H_2 = L_2 = 0,100$ m ($H_0 + L_1 + H_2 + L_2 = 0,400$ m). Finalmente, para o canal em forma de “Y” é tomado $L_0 = L_1 = 0,0635$ m e $H_0 = H_1 = 0,1333$ m ($H_0 + 2H_1 = 0,400$ m). Para este caso, os ramos bifurcados do canal têm um ângulo de 45° com o eixo horizontal.

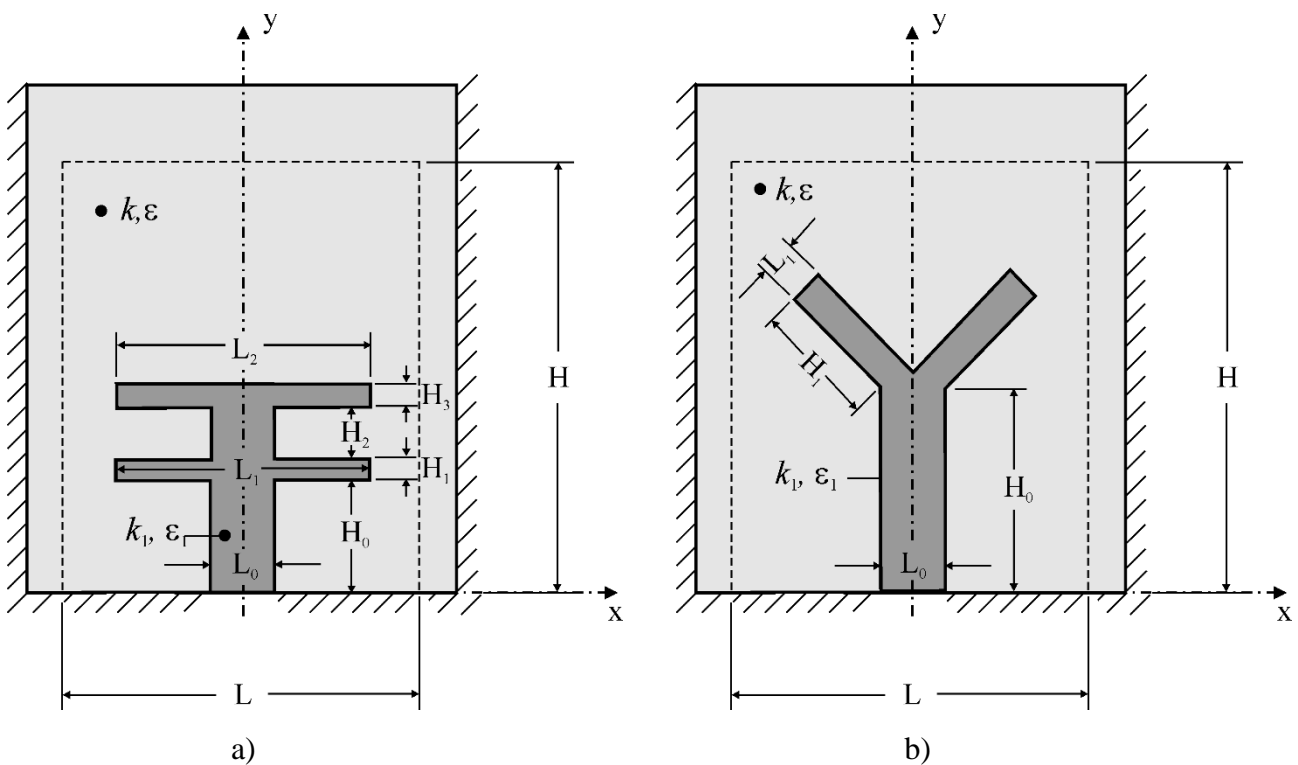


Figura 6.18 – Ilustração do domínio computacional do processo de LRI a ser simulado com o canal aberto em forma de “duplo-T” (a) e “Y” (b).

A Figura 6.19 mostra a comparação do tempo (t) de impregnação da resina em todo o domínio fibroso para as quatro geometrias avaliadas, representadas nas Figs. 4.1, 4.2 e 6.18. Pode ser observado que o canal aberto em forma de “Y” conduziu aos melhores resultados com o tempo de infusão de $t = 121,4$ s, enquanto os canais em forma de “I” e “T” conduziram a um desempenho intermediário, com $t = 131,2$ s e $t = 136,4$ s, respectivamente. O pior desempenho é obtido com o canal aberto em “duplo-T”, onde $t = 161,6$ s.

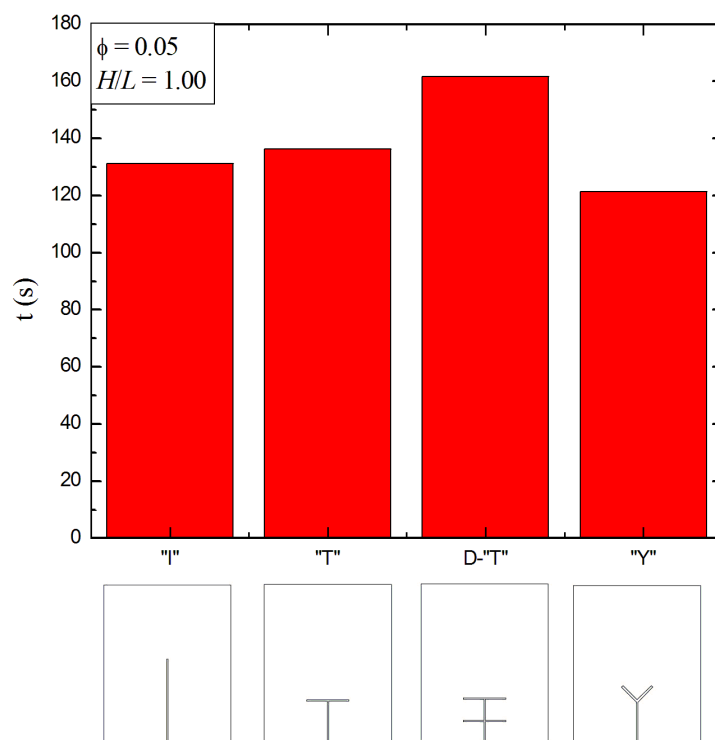


Figura 6.19 – Efeito da geometria dos canais abertos no tempo de preenchimento da resina no molde.

Os resultados mostraram que apenas uma simples comparação realizada entre diferentes geometrias permitiu encontrar uma diferença no tempo de infusão da resina de cerca de 33,0%, mostrando a importância da avaliação geométrica no processo de LRI. Observa-se também que a geometria simples (canal em forma de “I”) conduziu a um desempenho superior que a obtida com a geometria mais complexa (canal em “duplo-T”). Este fato reforça que o projeto deste tipo de processo é fortemente dependente da configuração utilizada para os canais abertos. O melhor desempenho do canal em forma de “I”, em comparação com o canal em forma de “T” e “duplo-T” pode ser explicado pela maior penetração do canal em forma de “I” no interior do domínio poroso para a região da saída. Neste sentido, os resultados indicaram que os casos em forma de “T” e “duplo-T” podem ser melhorados, uma vez que a sua configuração não fica restrita à região inferior de reforço fibroso. Isso fica claro analisando-se em conjunto com os resultados das seções anteriores, onde se observa que a

forma completamente otimizada do canal em forma de “T” possui um desempenho bastante superior ao melhor caso de canal em forma de “I”, para a mesma imposição de restrições. O canal em forma de “Y” conduz ao melhor desempenho nos casos considerados, provavelmente por distribuir mais uniformemente a resina em ambas as direções x e y . Obviamente, esta geometria merece futuros estudos de otimização geométrica para aplicabilidade em processos de infusão de resina líquida.

Com o propósito de otimizar a geometria do canal aberto em forma de “T”, levando em consideração as condições de espessura e comprimento atribuídas no estudo preliminar, e então comparar com desempenho do canal aberto em forma de “I”, visto anteriormente, foi variado através da BE as dimensões de comprimento do ramo principal (H_0) e do ramo bifurcado (L_1) do canal. Para este estudo é imposta, a relação L_1/H_0 como grau de liberdade geométrica. A Figura 6.20 mostra o efeito da razão L_1/H_0 sobre o tempo total de injeção da resina ao longo de todo o domínio. Pode ser observado que as menores razões de L_1/H_0 conduziram aos melhores resultados, ou seja, existe uma redução no tempo (t) de injeção da resina quando o canal tem o ramo principal mais alongado para a região da saída e abas mais curtas. Neste sentido, a geometria com menor razão L_1/H_0 tende a um canal em forma de “I”. Nota-se que para a condição específica de $H_0 = L_1 = 0,200$ m, o desempenho do canal em forma de “I” foi melhor em relação ao desempenho do canal em forma de “T”. Contudo, com a otimização geométrica o desempenho para o canal em forma de “T” é cerca de 17,0% superior ao canal em forma de “I”, indicando que, possivelmente, a geometria otimizada para os canais em forma de “duplo-T” e em forma de “Y” conduzam a melhores resultados.

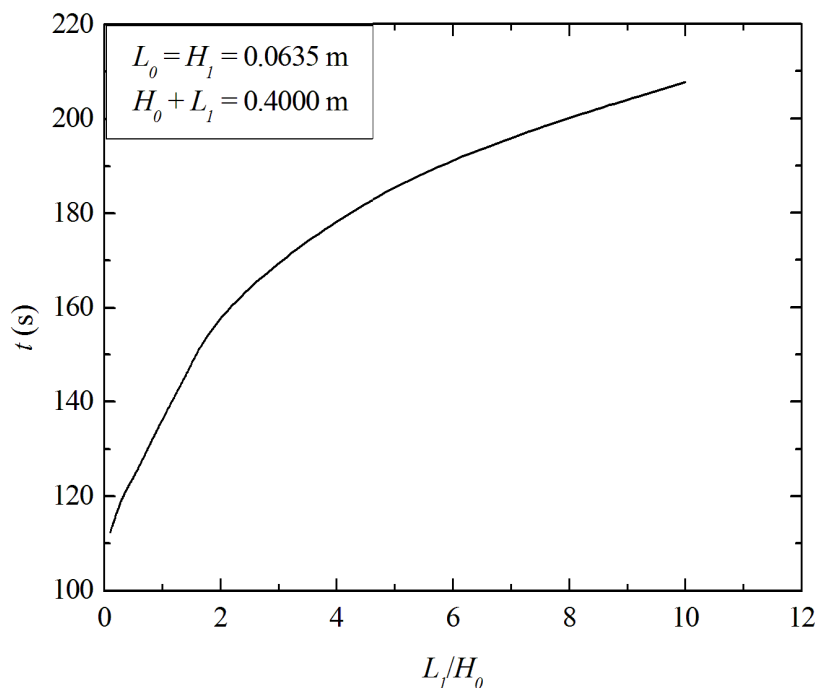


Figura 6.20 – Efeito da razão L_1/H_0 no tempo de preenchimento do molde poroso com o canal aberto em forma de “T”.

7 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

O presente trabalho apresentou um estudo numérico sobre a avaliação geométrica de canais abertos em um processo de infusão de resina líquida (LRI) aplicando o Design Construtal e a Busca Exaustiva (BE). O principal objetivo deste estudo foi avaliar a influência da geometria de canais abertos em forma de “I” e “T” inseridos em uma placa retangular bidimensional com um meio poroso sobre o tempo de infusão da resina.

As simulações numéricas do presente trabalho foram realizadas através do método de volumes finitos (MVF) para a solução das equações de conservação de massa, conservação da quantidade de movimento para a mistura de resina e ar, e uma equação de transporte para a fração volumétrica de uma das fases (resina ou ar). A interação entre as fases foi tratada com o método *Volume of fluid* (VOF). A resistência do meio poroso foi considerada através da lei de Darcy.

Para o caso estudado do canal aberto em forma de “I” foi avaliado o efeito da razão L_0/H_0 sobre o tempo de infusão e a distribuição da resina ao longo do material com meio poroso e estudou-se a influência da razão entre a área do canal e a área da placa (ϕ) sobre o tempo de infusão mínimo (t_m) e sobre a razão L_0/H_0 ótima $(L_0/H_0)_o$. Os resultados mostraram que as melhores geometrias, para este caso foram as com uma maior penetração na placa porosa, ou seja, com menores razões de L_0/H_0 , conforme o esperado, devido a distribuição da resina de forma mais homogênea no domínio do meio fibroso, o que está de acordo com o princípio Construtal da Ótima Distribuição das Imperfeições. Por exemplo, para $\phi = 0,050$ o melhor desempenho ($t_m = 81,5$ s) foi obtido com a configuração $(L_0/H_0)_o = 0,06$, enquanto que para $L_0/H_0 = 2$ o tempo de injeção foi de $t = 239,9$ s (pior desempenho para $\phi = 0,050$) e para razão máxima $L_0/H_0 = 18$ é obtido um tempo de injeção de $t = 203,4$ s. Portanto, observou-se que, exceto para $\phi = 0,100$ onde há um crescimento quase assintótico do tempo de injeção em função da razão L_0/H_0 , para cada ϕ existe uma razão (L_0/H_0) ótima global e uma geometria ótima local. Para maiores valores de ϕ foram encontrados os menores tempos de injeção uma vez minimizados, conforme esperado. Contudo, a avaliação geométrica no processo de infusão indicou que a geometria ótima obtida para menores razões de ϕ leva a melhores desempenhos do que geometrias não otimizadas para razões maiores de ϕ , indicando que a racionalização geométrica pode levar canais de menores dimensões a um melhor desempenho do que canais com maiores dimensões.

Para o caso do canal aberto em forma de “T” foi avaliado o efeito das razões geométricas L_1/H_1 , L_0/H_0 e H_0/H_1 , para $\phi = 0,05$, sobre o tempo de infusão e analisou-se a distribuição da resina ao longo do material com meio poroso. Os resultados mostraram que as maiores razões de L_1/H_1 conduziram aos melhores resultados, ou seja, quando avaliado este parâmetro as melhores geometrias foram as que o canal bifurcado apresentou maior penetração no interior do molde poroso. Contudo,

o aumento demasiado de L_1/H_1 conduziu à formação de vazios permanentes, especialmente para os casos com menores razões de L_0/H_0 . Dessa forma, há uma razão intermediária ótima que conduz ao menor tempo de injeção no meio fibroso. Quando avaliada a razão L_0/H_0 sobre o tempo de infusão uma vez minimizado (t_m) observou-se que as menores razões conduziram aos menores tempos de infusão, exceto para a razão $H_0/H_1 = 10,0$ onde uma razão ótima intermediária de L_0/H_0 foi obtida. De uma forma geral, os resultados mostraram que o dimensionamento adequado do ramo simples do canal em “T” é bastante importante para melhorar o desempenho do processo de infusão. Com relação ao efeito da razão H_0/H_1 sobre o tempo de infusão duas vezes minimizado, verificou-se que a tendência é que o melhor desempenho seja obtido para grandes razões de H_0/H_1 . Contudo, o aumento da penetração do canal em forma de “T” no meio fibroso depende também da razão entre a espessura dos canais do ramo simples e ramos bifurcados. Para o caso de $H_0/H_1 = 40,0$, maior razão estudada, a espessura do canal dos ramos bifurcados foi muito pequena, de forma que o canal começa a dificultar o escoamento da resina. Dessa forma, há uma razão intermediária que conduz ao melhor desempenho, $(H_0/H_1)_o = 30,0$.

De uma forma geral, para o canal em forma de “T” as geometrias de pior desempenho são restritas na região inferior da placa e o desempenho é melhorado quando o ramo principal tem maior penetração no meio poroso para a região da saída e o ramo bifurcado (secundário) para as laterais, desde que a razão entre as espessuras dos ramos simples e bifurcados não sejam muito grandes ou pequenas para não causar restrição ao escoamento da resina. Os resultados mostraram ainda que todos os graus de liberdade exercem influência sobre o tempo de infusão da resina no molde, indicando que, para um estudo real, recomenda-se que todos os parâmetros geométricos sejam avaliados. Vale ressaltar que a avaliação de cada razão geométrica não foi realizada de forma isolada, pois uma razão geométrica influencia no efeito de outra razão sobre o objetivo do sistema de fluxo, neste caso o menor tempo para injeção da resina no meio fibroso.

Quando comparado o desempenho dos canais em forma de “I” e em forma de “T”, para $\phi = 0,05$, sobre o tempo de infusão os resultados mostraram que a geometria três vezes otimizada para o canal em forma de “T” é cerca de 192,0 % melhor que a geometria ótima para o canal em forma de “I”. Dessa forma, este estudo mostrou que a geometria mais complexa conduziu a um melhor desempenho do processo de infusão, o que indica futuros estudos com outras formas geométricas de canais abertos. Neste sentido, os resultados mostraram a importância da avaliação geométrica para o processo de infusão de resina líquida e a aplicação do Design Construtal para racionalizar o projeto desse tipo de processo.

O estudo simplificado para a comparação do tempo de infusão da resina com quatro diferentes configurações de canais abertos: em forma de “I”, em forma de “T”, “duplo-T” e em forma de “Y”

também mostrou a importância da avaliação geométrica para o processo de LRI. Apenas uma simples comparação entre as diferentes geometrias levou a uma diferença de tempo de preenchimento de resina no molde de até 33,0%. O melhor resultado foi obtido com o canal em forma de "Y", mostrando que esta geometria é um candidato promissor para futuros estudos de otimização geométrica. Além disso, verificou-se na presente avaliação que as geometrias mais complexas levaram ao pior desempenho. Esse comportamento, em geral, não é intuitivamente esperado e reforça a importância do emprego de uma metodologia para avaliação geométrica desse tipo de problema.

Para finalizar, são sugeridas algumas propostas de continuidade para o presente trabalho:

- realizar um estudo completo de otimização geométrica para um canal em forma de "Y";
- contabilizar a vazão de resina desperdiçada com diferentes estratégias de injeção;
- ampliar a abrangência do estudo realizado aqui para moldes tridimensionais e outras propriedades físicas da resina.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABMACO: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS COMPÓSITOS. **Compósitos I: Materias, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências**. São Paulo, 623 p., 2008.

ABMACO: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS COMPÓSITOS. **Compósitos 2: Tecnologia de processos**. São Paulo, 355 p., 2009.

ALVES, A. L. D. S. **Processamento de placas compósitas pela técnica de moldagem por infusão de resina de SEEMANN (SCRIMP)**. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, 2006.

AOC: World Leader in Resin Technology. Disponível em: <http://www.aoc-resins.com/web/site/pages-prod/RTM_Light>. Acesso em: 05 Abril 2016.

BEJAN, A.; MERKX, G. W. **Constructal theory of social dynamics**. New York: Spring, 2007.

BEJAN, A. **Shape and structure, from engineering to nature**. New York: Cambridge University Press, 324 p., 2000.

BEJAN, A; LORENTE, S.; MIGUEL, A. F.; REIS, A. H. Along with Constructal Theory. **UNIL/FGSE – Workshop series nº 1**, Lausanne University Press, 2006.

BEJAN, A.; LORENTE, S. **Design With Constructal Theory**. Wiley: Hoboken, 2008.

BEJAN, A.; LORENTE, S. The constructal law and the evolution of design in nature. **Phis Life Rev**, v. 8, n. 3, p. 209-240, 2011.

BEJAN, A.; ZANE, J. P. **Design in nature: how the constructal law governs evolution in biology, physics, technology and social organization**. 1. ed. Doubleday, 2012.

BISERNI, C; ROCHA, L. A. O.; STANESCU, G.; LORENZINI, E. Constructal H-shaped cavities according to Bejan's theory. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 50, p. 2132–2138, 2007.

BISERNI, C.; ROCHA, L. A. O.; BEJAN, A. Inverted fins: geometric optimization of the intrusion into a conducting wall. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 47, p. 2577–2586, 2004.

BORTOLI, A. L. **Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 136 p., 2000.

BROUWER, W.; VAN HERPT, E. C. F.; LABORDUS, M. Vacuum injection moulding for large structural applications. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 34, p. 551 - 558, 2003.

CELLE, P.; DRAPIER, S.; BERGHEAU, M. Numerical modelling of liquid infusion into fibrous media undergoing compaction. **European Journal of Mechanics A/Solids**, v. 17, p. 647-661, 2008.

CHUNG, T. J. **Computational Fluid Dynamics**. USA: Academic Press, Cambridge University Press, 2002.

DOS SANTOS, E. D. **Análise Numérica de Escoamentos Turbulentos não Reativos com Transfêrencia de Calor por Convecção e Radiação Térmica em Meios Participantes**. Tese de Doutorado, Porto Alegre, 2011.

ESTRADA, E. da S. D.; FAGUNDES, T. M.; ISOLDI, L. A.; DOS SANTOS, E. D.; XIE, G.; ROCHA, L. A. O. Constructal Design Associated to Genetic Algorithm of Asymmetric V-Shaped Pathways. **Journal of Heat Transfer**, v. 137, p. 0610101-0610107, 2015.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. Berlim: Springer, 364 p., 1997.

FLUENT. **Documentation Manual - FLUENT 6.3.16**. Ansys Inc., 2007.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos - Conceitos Básicos e Aplicações**. São Paulo: Edusp, 426 p., 2000.

GOMES, P. P.; FERRO, O. A. G.; REZENDE, M. C. Experimental characterization and simulation of VARTM process to obtain carbon/epoxi composites. **Brazilian conference on composite materials - BCCM1**, Natal, p. 1-6, 16-19 July 2012.

GONCHAROVA, G.; COSSON, B.; DELÉGLISE LAGARDÉRE, M. Analytical modeling of composite manufacturing by vacuum assisted infusion with minimal experimental characterization of random fabrics. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 219, p. 173 - 180, 2015.

GONZALES, G. V.; ESTRADA, E. da S. D.; EMMENDORFER, L.R.; ISOLDI, L. A.; XIE, G.; ROCHA, L. A. O.; DOS SANTOS, E. D. A comparison of simulated annealing schedules for constructal design of complex cavities intruded into conductive walls with internal heat generation. **Energy**, v. 93, p. 372-382, 2015.

GRESHO, P. M.; SANI, R. L. **Incompressible Flow and the Finite Element Method: Advection-diffusion and Isothermal Laminar Flow**. Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltda, 1999.

GRÖSSING, H.; STADLMAJER, N.; FAUSTER, E.; FLEISCHMANN, M.; SCHLEDJEWSKI, R. Flow Front Advancement during Composite Processing: Predictions from Numerical Filling Simulation Tools in Comparison with Real-World Experiments. **POLYMER COMPOSITES**, p. 1-12, 2015.

HAIJMOHAMMADI, M. R.; NOURAZAR, S. S.; CAMPO, A.; POOZESH, S. Optimal discrete distribution of heat flux elements for in-tube laminar forced convection. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 40, p. 89-96, 2013.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of Fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, n. 1, p. 201-225, 1981.

ISOLDI, L. A.; OLIVEIRA, C. O.; ROCHA, L. A. O.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C. Three-dimensional numerical modeling of RTM and LRTM processes. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 34, p. 105 - 111, 2012.

ISOLDI, L. A.; SOUZA, J. A.; DOS SANTOS, E. D.; MARCHESINI, R.; PORTO, J.; LETZOW, M.; ROCHA, L. A. O.; Constructal Design applied to the lighth resin transfer molding (LRTM) manufacturing process. **Proceedings of 22 and COBEM**, Ribeirão Preto - SP, 2013.

JINLIAN, H.; YI, L.; XUEMING, S. Study on void formation in multi-layer woven fabrics. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 35, p. 595–603, 2004.

KUENTZER, N.; SIMACEK, P.; ADVANI, S. G.; WALSH, S. Correlation of void distribution to VARTM manufacturing techniques. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, p. 802–813, 2007.

KUNDU, B.; BHANJA, D. Performace and optimization analysis of a constructal T-Shaped fin subject to variable thermal conductivity and convective heat transfer coefficient. **Int J Heat Mass Transf**, v. 53, p. 254-267, 2010.

LEDEZMA, G. A.; BEJAN, A.; ERRERA, M. R. Constructal tree networks for heat transfer. **J. Appl. Phys.**, v. 82, p. 89-100, 1997.

LING, L.; YONGCAN, C.; YULIANG, L. **Volume of fluid (VOF) method for curved free surface water flow in shallow open channel**. Department of Hydralic Engineering, Tsinghua University. Beijing, China, 2001.

LOPES, A. F. **Estudo do processo de infusão a vácuo em materiais compósitos**. Universidade do Porto. Porto. 2009.

LORENZINI, G.; BISERNI, C.; ISOLDI, L. A.; DOS SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O. Constructal Design Applied to the Geometric Optimization of Y-shaped Cavities Embedded in a Conducting Medium. **J. Electronic Packaging**, v. 133, p. 041008-1 – 041008-8, 2011.

LORENZINI, G.; GARCIA, F. L.; DOS SANTOS, E. D.; BISERNI, C.; ROCHA, L. A. O. Constructal design applied to the optimization of complex geometries: T-Y-shaped cavities with two additional lateral intrusions cooled by convection. **International Journal of Heat and Mass**, v. 55, p. 1505-1512, 2012.

LORENZINI, G.; BISERNI, C.; ESTRADA, E. da S. D.; ISOLDI, L. A.; DOS SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O. Constructal Design of T-Shaped Cavity for Several Convective Fluxes Imposed at the Cavity Surfaces. **Journal of Engineering Thermophysics**, p. 309–321, 2013.

LORENZINI, G.; BISERNI, C.; ESTRADA, E. da S. D.; ISOLDI, L. A.; DOS SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O. Constructal Design of Convective Y-Shaped Cavities by Means Cavities by Means of Genetic Algorithm. **Journal of Heat Transfer**, v. 136, p. 071702-1 - 071702-9, 2014.

LORENZINI, G.; BARRETO, E. X.; BECKEL, C. C.; SHENEIDER, P. S.; ISOLDI, L. A.; DOS SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O. Constructal design of I-shaped high conductive pathway for cooling a heat-generating medium considering the thermal contact resistance. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 93, p. 770–777, 2016.

LV, X.; ZOU, Q.; REEVE, D. Numerical simulation of overflow at vertical weirs using a hybrid level set/VOF method. **Adv. Water Resour**, V. 34, p. 1320 - 1334, 2011.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2ª Ed., 453 p., 2004.

MARINUCCI, G. **Materias Compósitos Poliméricos: fundamentos e tecnologia**. São Paulo: Artliber, 333 p., 2011.

MIGUEL, A. F. O aparecimento da forma e estrutura em sistemas naturais e fabricados: a visão da teoria constructal. **GeoBoletim** 5, p. 4-5, 2007.

MORREN, G.; BOTTIGLIERI, M.; BOSSUYT, S.; SOL, H.; LECOMPTE, D.; VERLEYE, B.; LOMOV, S. V. A reference specimen for permeability measurements of fibrous reinforcements for RTM. **Compos Part Appl Sci Manuf**, v. 40, n. 3, p. 244-250, 2009.

OLIVEIRA, C. P.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C.; ISOLDI, L. A.; SILVA, R. D. S. Comparação dos métodos VOF e FE/CV aplicados à solução de problemas de RTM. **Vetor**, v.21, p. 22-33, 2011.

OLIVEIRA, C. P.; SOUZA, J. A.; ISOLDI, L. A.; AMICO, S. C. Algebraic Rectilinear Model for Multilayer Resin Transfer Molding Injection. **Jornal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 32, p. 3-15, 2012.

PARDINI, L. C.; GONÇALVES, A. Processamento de Compósitos Termoestruturais de Carbono Reforçado com Fibras de Carbono. **V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Belo Horizonte, 2009.

PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. New York, USA: McGraw-Hill, 1980.

PATANKAR, S. V.; SPALDING, D. B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. **Int. J. Heat Mass Transfer**, v.15, 1972.

POODTS, E. et al. FE analysis and production experience of a sandwich structure component manufactured by means of vacuum assisted resin infusion process. **Composites Part B Engineering**, vol. 46, p. 179-186, 2013.

PORTO, J. D. S. **Modelagem Computacional do Processo de Moldagem por Transferência de Resina aplicado à Engenharia Naval**. Dissertação de mestrado. Rio Grande: Universidade Federal do Rio Grande. 2012.

PORTO, J. D. S.; LETZOW, M.; DOS SANTOS, E. D.; AMICO, S. C.; SOUZA, J. A.; ISOLDI, L. A. Computational modeling of RTM and LRTM processes applied to complex geometries. **Ciência/Science**, v. 11, p. 93-99, 2012.

REDDY, J. N; GARTLING, D. K. **The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics**. CRC, Boca Raton, Florida, USA, 1994.

REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. **Compósitos Estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber, 396 p., 2011.

RIBEIRO, G. G.; SOUZA, J. A.; ROCHA, L. A. O.; AMICO, S. C. Utilização do Aplicativo Fluent na Modelagem Numérica do Processo RTM. **IV Congresso Brasileiro de Carbono**, Gramado/Rs, p. 557-560, 2007.

ROCHA, L. A. O.; LORENZINI, E.; BISERNI, C. Geometric optimization of shapes on the basis of Bejan's Constructal theory. **Int Commun Heat Mass Transf**, v. 32, n. 10, p. 1281-1288, 2005.

RODRIGUES, M. K.; BRUM, R. S.; VAZ, J.; ROCHA, L. A. O.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) employing the Constructal Design method. **Renew Energy**, v. 80, p. 538-551, 2015.

RUDD, C. D.; LONG, A. C.; KENDALL, K. N.; MANGIN, C. **Liquid Moulding Technologies: Resin Transfer Moulding, Structural Reaction Injection Moulding and Related Processing Techniques**. Abington Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 1997.

SCHLICHTING, H. **Boundary-layer Theory**. McGraw-Hill, New York, 1979.

SRINIVASAN, V.; SALAZAR, A. J.; SAITO, K. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. **Applied Mathematical Modelling**, p. 3710 - 3730, 2011.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method**. Malaysia: Longman Group Ltd, 1995.

WANG, P.; DRAPIER, S.; MOLIMARD, J.; VAUTRIN, A.; MINNI, J. C. Numerical and experimental analyses of resin infusion manufacturing processes of composite materials. **Journal of Composite Materials**, v. 46, n. 13, p. 1617-1631, 2012.

XIE, Z.; CHEN, L.; SUN, F. Geometry optimization of T-shaped cavities according to constructal theory. **Math Comput Model**, v. 52, p. 1538-1546, 2010.

YENILMEZ, B.; SOZER, E. M. Comparison of e-glass fabric preforms in the Vacuum Infusion Process, A: Characterization experiments. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 40, n. 4, p. 499 - 510, 2009.