

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

ANÁLISE NUMÉRICA DA CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DE CANAIS DE
INJEÇÃO EM PROBLEMAS DE INFUSÃO DE RESINA LÍQUIDA CONSTRUÍDOS COM A
APLICAÇÃO DA TEORIA CONSTRUTAL

por

Glauciléia Maria Cardoso Magalhães

Tese para obtenção do Título de
Doutora em Modelagem Computacional

Rio Grande, janeiro, 2023

Glauciléia Maria Cardoso Magalhães

“ANÁLISE NUMÉRICA DA CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DE CANAIS DE INJEÇÃO EM PROBLEMAS DE INFUSÃO DE RESINA LÍQUIDA CONSTRUÍDOS COM A APLICAÇÃO DA TEORIA CONSTRUTAL”

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

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos (Orientador – FURG)

Documento assinado digitalmente



JEFERSON AVILA SOUZA
Data: 31/01/2023 11:59:28-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. Jeferson Avila Souza (Coorientador – FURG)

Documento assinado digitalmente



EMANUEL DA SILVA DIAZ ESTRADA
Data: 31/01/2023 11:05:15-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

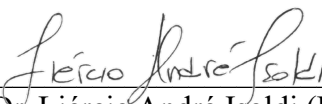
Prof. Dr. Emanuel da Silva Diaz Estrada (FURG)

Documento assinado digitalmente

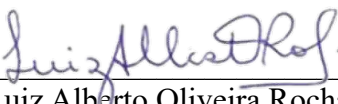


GILL VELLEDA GONZALES
Data: 30/01/2023 18:33:45-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. Gill Velleda Gonzales (IFSul)



Prof. Dr. Liércio André Isoldi (FURG)



Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha (FURG)

Ficha Catalográfica

M189a Magalhães, Glauciléia Maria Cardoso.

Análise numérica da configuração geométrica de canais de injeção em problemas de infusão de resina líquida construídos com a aplicação da teoria construtal / Glauciléia Maria Cardoso Magalhães. – 2023.

109 f.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande/RS, 2023.

Orientador: Dr. Elizaldo Domingues dos Santos.

Coorientador: Dr. Jeferson Avila Souza.

1. Infusão de resina líquida 2. Teoria Construtal 3. Função de construção I. Santos, Elizaldo Domingues dos II. Souza, Jeferson Avila III. Título.

CDU 004:517

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

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 coorientador, Prof. Dr. Jeferson Avila Souza, pelos seus ensinamentos, presteza e disponibilidade em ajudar.

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

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.

Aos meus pais, Celso Magalhães e Nazira Magalhães, pelo amor incondicional e apoio.

À Laisa Soares, pela amizade e parceria.

À Higor Coelho, pelo companheirismo e apoio.

Aos meus amigos Cleiton dos Anjos, Fabricio Molon, Bruna Molon e Bianca Molon pelos bons momentos compartilhados.

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 canais de injeção que facilitam 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 do processo. O principal objetivo do trabalho é propor uma técnica construtiva baseada na Teoria Construtal para orientar o projeto neste tipo de processo. Mais precisamente, é desenvolvida uma metodologia onde a configuração geométrica dos canais de injeção cresce a partir de uma construção elementar utilizando as seguintes funções de construção: FC: R - função de construção baseada na resistência ao escoamento de resina, FC: t - função de construção baseada na minimização do tempo de preenchimento do molde e FC: m - função de construção baseada na minimização da quantidade de massa de resina desperdiçada. As equações de conservação de massa e quantidade de movimento para a mistura de resina e ar e uma equação para o transporte da fração de volume de resina foram resolvidas com o Método dos Volumes Finitos. A interação entre as fases foi tratada com o método *Volume of Fluid*. A resistência ao escoamento através do meio poroso foi modelada com a lei de Darcy. Os resultados mostraram que as técnicas construtivas desenvolvidas a partir da Teoria Construtal são bastante promissoras para obter um melhor desempenho fluidodinâmico do problema, minimizando o tempo de injeção e o desperdício de resina, bem como, compreender a construção da forma nesses sistemas. Os resultados demonstraram ainda a influência da resolução do canal sobre os indicadores de performance e sobre a configuração geométrica dos canais de injeção. Quando comparada à montagem de novos elementos em pontos adjacentes aos canais de injeção com maior ou menor resistência ao escoamento, os resultados comprovaram que os novos canais devem ser inseridos nas regiões de menor resistência, no intuito de facilitar o acesso do escoamento de resina ao longo do meio poroso. As funções de construção baseadas nos indicadores de performance levaram aos melhores resultados dos próprios indicadores, ou seja, a FC: t conduziu aos menores tempos de infusão e a FC: m conduziu aos menores valores para a quantidade de massa desperdiçada. Os resultados também indicaram que formas ramificadas dos canais de injeção conduziram aos melhores desempenhos, independente da razão altura/comprimento da placa porosa empregada. Os padrões obtidos foram semelhantes às configurações naturais observadas em escoamentos de ponto para volume, mas adaptadas à restrição de área imposta.

Palavras-chaves: Infusão de resina líquida, Teoria Construtal, Função de construção.

ABSTRACT

This work presents the numerical investigation of a liquid resin infusion process, which consists of injecting a polymeric resin in a closed mold comprised of a fibrous medium and injection channels that facilitate the spread of the resin throughout the domain. In the industrial field, the method of trial and error has often been 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 the process. The main objective is to propose a constructive technique based on the Constructal Theory to guide the project in this type of process. More specifically, a methodology is developed where the shape and structure of the injection channels grow from an elementary construction using the following construction techniques: FC: R - construction function based on resin flow resistance, FC: t - construction function based on minimizing the mold filling time, and FC: m - construction function based on minimizing the amount of wasted resin mass. The mass conservation and momentum equations for the mixture of resin and air, and an equation for the resin volume fraction transport were resolved with the Finite Volume Method. The phase interaction was treated with the Volume of Fluid method. The resistance to flow through the porous medium was modeled with Darcy's law. The results showed that the constructive techniques developed from the Constructal Theory are very promising to obtain a better fluid dynamic performance of the problem, minimizing the injection time and resin waste, as well as, understanding the construction of the shape in these systems. The results also demonstrated the influence of the channel resolution on the performance indicators and the shape and structure of the empty channels. When comparing the assembly of new elements at points adjacent to the empty channels with greater or lesser resistance to flow, the results proved that the new channels must be inserted in the regions of less resistance in order to maximize the access of the resin flow along the porous medium. Construction functions based on performance indicators led to the best results of the indicators themselves, that is, FC: t led to the lowest infusion times, and FC: m led to the lowest values for the amount of wasted mass. The results also indicated that branched forms of the injection channels led to the best performances, regardless of the height/length ratio of the porous plate used. The patterns obtained were like the natural configurations observed in point-to-volume flows but adapted to the imposed area restriction.

Keywords: Liquid resin infusion, Constructal Theory, Construction function.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Estado da Arte	17
1.2	Objetivos.....	24
1.2.1	Objetivos Específicos.....	25
1.3	Delineamento do Texto	25
2	FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE INFUSÃO	27
2.1	Materiais Compósitos.....	27
2.2	Processos de fabricação	28
2.2.1	Infusão de Resina Líquida (LRI)	29
3	FUNDAMENTOS DA TEORIA CONSTRUTAL	35
4	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	41
4.1	Descrição do Problema.....	42
4.2	Construção dos canais de injeção com a Teoria Construtal	47
5	MODELAGEM NUMÉRICA.....	53
5.1	Noções do Método dos Volumes Finitos (MVF)	54
5.1.1	Discretização Temporal das Equações de Conservação	55
5.1.2	Tratamento dos Termos Advectivos das Equações de Conservação	55
5.1.3	Acoplamento Pressão-Velocidade	56
5.2	Procedimentos Numéricos.....	56
5.2.1	Verificação do Modelo Numérico.....	57
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
6.1	Investigação da influência das condições de contorno no crescimento do canal e nos indicadores de performance.....	60
6.2	Resultados do Refinamento da Resolução do Canal ($CR = 10$).....	64
6.3	Comparação entre a montagem de novos ECs em pontos adjacentes aos canais de injeção com maior ou menor resistência ao escoamento.....	70
6.4	Construção dos canais de injeção aplicando a Teoria Construtal com a Função de Construção baseada na minimização do tempo de infusão ($FC: t$)	75
6.5	Construção dos canais de injeção aplicando a Teoria Construtal com a Função de Construção baseada na minimização da massa de resina desperdiçada ($FC: m$) no processo LRI.....	83
6.6	Avaliação do efeito da razão geométrica H/L	91
7	CONCLUSÕES.....	100
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Etapas do processo de infusão: a) posicionamento do reforço, b) fechamento do saco de vácuo, c) vácuo, d) injeção da matriz polimérica (MARINUCCI, 2011).....	30
Figura 2.2 - Exemplos de aplicações industriais do processo de LRI nos setores: a) de energia eólica, b) náutico (Brouwer et al. 2003)	31
Figura 2.3 - 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).	33
Figura 2.4 - Estratégias de infusão (NASSEH, 2021).....	34
Figura 2.5 - Exemplos de canais de injeção secundários (NASSEH, 2021).....	34
Figura 3.1 - Exemplo de formas e estruturas de sistemas de fluxo e comparação entre padrões presentes na natureza (BEJAN; LORENTE, 2013)	36
Figura 3.2 - Exemplo do padrão <i>treelike</i> presente na natureza (Adaptado de “Physics, Biology and Economic Inequality”, 2019)	37
Figura 4.1 - Ilustração do domínio computacional do processo de LRI a ser simulado	43
Figura 4.2 - Ilustração do domínio computacional para: a) molde sem paredes, b) molde com paredes laterais	45
Figura 4.3 - Ilustração do domínio computacional com $CR = 10$	46
Figura 4.4 - Ilustração do domínio computacional para: a) $H/L = 0,5$, b) $H/L = 2.0$	47
Figura 4.5 - Ilustração da técnica de construção com FC: R	49
Figura 4.6 - Ilustração da técnica de construção com FC: t	52
Figura 5.1 - Ilustração da linha de monitoramento	59
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	59
Figura 6.1 - Ilustração da construção inicial dos ECs	60
Figura 6.2 - Esquema da montagem dos ECs para os dois casos estudados: a) molde sem paredes, b) molde com paredes nas superfícies laterais	61
Figura 6.3 - Efeito do número de ECs e da razão ϕ ao longo do tempo (t) de infusão e desperdício de massa (m) para o molde sem paredes laterais	62
Figura 6.4 - Efeito do número de ECs e da razão ϕ ao longo do tempo (t) de infusão e desperdício de massa (m) para o molde com paredes nas superfícies laterais	62
Figura 6.5 - Fração volumétrica da resina em função do tempo para $N = 5$ e $\phi = 0,05$, com duas diferentes condições de contorno: a) molde sem paredes, b) molde com paredes nas superfícies	

laterais	64
Figura 6.6 - Esquema da montagem dos ECs para $CR = 10$ e $\phi_{max} = 0.20$	65
Figura 6.7 - Efeito do número de ECs e da razão ϕ ao longo do tempo (t) de infusão e desperdício de massa (m) para $CR = 10$	66
Figura 6.8 - Efeito do tempo de preenchimento do molde sobre a vazão instantânea da resina desperdiçada, para cada EC construído como canal de injeção	67
Figura 6.9 - Fração volumétrica da resina em função do tempo para $CR = 10$, com duas diferentes configurações: a) $N = 2$ e $\phi = 0,02$, b) $N = 16$ e $\phi = 0,16$	69
Figura 6.10 - Configurações ótimas: a) $CR = 5$ ($N = 5$ ou $\phi = 0,20$), b) $CR = 10$ ($N = 20$ ou $\phi = 0,20$)	70
Figura 6.11 - Esquema da montagem dos ECs para $CR = 5$ e $\phi_{max} = 0,20$: a) construção no sentido de R_{menor} , b) construção no sentido de R_{maior}	71
Figura 6.12 - Comparação entre o desempenho dos indicadores de performance obtidos com a construção dos ECs no sentido de R_{menor} versus R_{maior} ao escoamento, para $CR = 5$	72
Figura 6.13 - Esquema da montagem dos ECs para construção no sentido de maior resistência ao escoamento, para $CR = 10$ e $\phi_{max} = 0.20$	73
Figura 6.14 - Comparação entre o desempenho dos indicadores de performance obtidos com a construção dos ECs no sentido de R_{menor} versus R_{maior} ao escoamento, para $CR = 10$	74
Figura 6.15 - Tempo de injeção para todas as possibilidades exploradas pela FC baseada na minimização do tempo de infusão, para $CR = 5$	76
Figura 6.16 - a) Tempo de injeção para todas as possibilidades exploradas pela FC baseada na minimização do tempo de infusão, para $CR = 10$, b) Configurações ótimas obtidas com a FC: t	77
Figura 6.17 - Escoamento de resina com formação de vazios permanentes para $CR = 10$, $N = 18$, $\phi = 0,18$ e $EC = 54$ para dois instantes de tempo diferentes: a) $t = 20,0$ s, b) $t = 70,0$ s	78
Figura 6.18 - Esquema da montagem dos ECs com FC: t , para $CR = 5$	79
Figura 6.19 - Esquema da montagem dos ECs com FC: t , para $CR = 10$	80
Figura 6.20 - Comparação entre o desempenho dos indicadores de performance obtidos com a FC: t e com a FC: R , para $CR = 5$	81
Figura 6.21 - Comparação entre o desempenho dos indicadores de performance obtidos com a FC: t e com a FC: R , para $CR = 10$	81
Figura 6.22 - Esquema da montagem dos ECs com FC: m , para $CR = 5$	83
Figura 6.23 - Comparação entre o desempenho de t obtido com a FC: R , FC: t e FC: m , para $CR = 5$	84
Figura 6.24 - Comparação entre o desempenho de m obtido com a FC: R , FC: t e FC: m , para $CR = 5$	

.....	84
Figura 6.25 - Posição da linha de frente do escoamento de resina para três instantes de tempo, $CR = 5$ e $N = 5$, para as três estratégias de construção: a) FC: R , b) FC: t e c) FC: m	86
Figura 6.26 - Esquema da montagem dos ECs com FC: m , para $CR = 10$	87
Figura 6.27 - Comparação entre o desempenho de t obtido com a FC: R , t e m , para $CR = 10$	88
Figura 6.28 - Comparação entre o desempenho de m obtido com a FC: R , t e m , para $CR = 10$	88
Figura 6.29 - Posição da linha de frente do escoamento de resina para três instantes de tempo, $CR = 10$ e $N = 20$, para as três estratégias de construção: a) FC: R , b) FC: t e c) FC: m	90
Figura 6.30 - Similaridade da técnica utilizando a FC: t com o processo de LRI em estruturas de grande porte.....	91
Figura 6.31 - Esquema da montagem dos ECs com FC: t , para $H/L = 0,5$	93
Figura 6.32 - Esquema da montagem dos ECs com FC: t , para $H/L = 2,0$	94
Figura 6.33 - Efeito de ϕ sobre t , para $H/L = 0,5$, $1,0$ e $2,0$	96
Figura 6.34 - Efeito de ϕ sobre m , para $H/L = 0,5$, $1,0$ e $2,0$	96
Figura 6.35 - Distribuição dos campos de pressão em função do tempo para as razões $H/L = 0,5$, $1,0$ e $2,0$, respectivamente, para $\phi = 0,1$: a) $t = 50,0$ s, b) $t = 100,0$ s e c) $t = 150,0$ s	97
Figura 6.36 - Distribuição dos campos de pressão em função do tempo para as razões $H/L = 0,5$, $1,0$ e $2,0$, respectivamente, para $\phi = 0,2$: a) $t = 20,0$ s, b) $t = 40,0$ s e c) $t = 60,0$ s	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Teste de independência de malha para o caso com paredes nas superfícies laterais e $N = 1$	58
Tabela 6.1 - Relação das razões L_0/H_0 e L_1/H_1 para BE e função de construção, para $CR = 5$	80

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área do meio poroso [m ²]
A_0	Área do canal de injeção [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 ramo principal do canal [m]
H_1	Comprimento do ramo bifurcado do canal [m]
K	Permeabilidade do meio [m ²]
L	Largura do molde [m]
L_{in}	Dimensão da entrada da resina [m]
l	Tamanho do EC cruzado pela resina [m]
L_0	Largura do ramo principal do canal [m]
L_1	Largura do ramo bifurcado do canal [m]
m	Massa da resina desperdiçada no processo de infusão [kg]
$\dot{m}$	Vazão instantânea da resina [kg/s]
N	Número de elementos que constituem os canais de injeção
P	Pressão total [Pa]
P_{in}	Pressão de injeção [Pa]
R	Resistência ao escoamento [N]
t	Tempo [s]
u	Velocidade na direção x [m/s]
v	Velocidade na direção y [m/s]
v_m	Velocidade média da resina na entrada do domínio [m/s]

$\vec{V}$	Vetor velocidade [m/s]
V_n	Componente da velocidade normal à secção de área transversal ao escoamento [m/s]
W	Dimensão no plano z [m]
X_f	Posição da linha de frente da resina [m]
x, y	Coordenadas espaciais do domínio bidimensional [m]

Símbolos gregos

ρ	Massa específica [kg/m ³]
ε	Porosidade
ϕ	Relação entre área da secção transversal do canal e área da placa
$\overset{=}{\tau}$	Tensor de tensões [N/m ²]
Δ	Variação de alguma variável em relação ao tempo ou ao espaço
μ	Viscosidade dinâmica [Pa s]

LISTA DE ABREVIATURAS

BE	Busca Exaustiva
CA	Matriz Construtal (<i>Constructal Array</i>)
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
CR	Resolução do Canal (<i>Channel Resolution</i>)
CVD	Diagrama de Voronoi Centroidal (<i>Centroidal Voronoi Diagram</i>)
DCT	Design com Teoria Construtal (<i>Design with Constructal Theory</i>)
EC	Construtal Elementar (<i>Elemental Constructal</i>)
EDP	Equação Diferencial Parcial
FC	Função de Construção
FC: R	Função de Construção baseada na Resistência ao escoamento de resina
FC: t	Função de Construção baseada na minimização do Tempo de preenchimento do molde
FC: m	Função de Construção baseada na minimização da quantidade de Massa de resina desperdiçada no processo
FE/CV	<i>Finite Element /Control Volume</i>
FRCP	Peças Compósitas Reforçadas com Fibra (<i>Fiber Reinforced Composite Parts</i>)
GA	Algoritmos Genéticos (<i>Genetic Algorithm</i>)
LCM	Moldagem Líquida de Compósitos (<i>Liquid Composite Molding</i>)
LRI	Infusão de Resina Líquida (<i>Liquid Resin Infusion</i>)
LRTM	Moldagem por Transferência de Resina Light (<i>Light Resin Transfer Molding</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>
PRESTO	<i>PREssure STaggering Option</i>
RTM	Moldagem por Transferência de Resina (<i>Resin Transfer Molding</i>)

SA	Recozimento Simulado (<i>Simulated Annealing</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 a evolução tecnológica e de mercado, os pesquisadores e engenheiros estão continuamente buscando novos materiais que apresentem maior resistência, leveza e baixa massa específica. Existe a necessidade de materiais avançados com combinações de propriedades específicas para melhoria de características tais como, a resistência à corrosão, maior resistência mecânica em relação ao peso, resistência a altas temperaturas e à erosão. Os materiais compósitos oferecem a essência para atender muitas dessas propriedades desejadas (LUO et al., 2001; POODTS et al., 2013).

As técnicas de Moldagem Líquida de Compósitos (LCM – do inglês: *Liquid Composite Molding*) são inovadoras e apresentam grande potencial para produzir componentes de baixo custo e alta qualidade, além de peças complexas. Um exemplo de destaque na aplicação de materiais compósitos pode ser visto na indústria aeronáutica, que tem como desafio a economia de combustível. Uma das estratégias para atingir esse objetivo consiste na otimização da massa específica dos materiais utilizados nos componentes de aviões. Os modelos Airbus A350 e Boeing 787 têm mais de 50% de suas estruturas construídas com materiais compósitos. Além da indústria aeroespacial, o uso de materiais compósitos é cada vez mais atraente no setor automotivo, pois oferecem a possibilidade da redução de peso de uma estrutura sem comprometer suas propriedades mecânicas. Portanto, tecnologias eficientes para a fabricação de Peças Compósitas Reforçadas com Fibra (FRCP – do inglês: *Fiber Reinforced Composite Parts*) de alta qualidade é de interesse crescente (GROSSING et al., 2016).

A injeção de resina no meio fibroso depende do processo de LCM escolhido. Entre os importantes processos, destaca-se a Infusão de Resina Líquida (LRI – do inglês: *Liquid Resin Infusion*) que consiste na infusão de uma resina polimérica utilizando canais de injeção inseridos em um domínio com meio fibroso, impregnado com a resina. Os canais de injeção facilitam a propagação global da resina ao longo do domínio do molde (WANG et al., 2012).

Para fabricar um componente de material compósito polimérico com alta qualidade é necessário controlar o escoamento da resina para evitar pontos secos no componente. A presença de espaços vazios pode danificar a peça e afetar significativamente as propriedades mecânicas de uma estrutura, causando efeitos prejudiciais, como baixa resistência ao cisalhamento, compressão, impacto e fadiga (GROSSING et al., 2016; MATSUZAKI et al., 2013; POODTS et al., 2013).

Em processos de LRI, os aspectos mais importantes são a eficiência da infusão da resina em termos de tempo de infusão, custos e qualidade das peças produzidas. Nesse sentido, para a configuração de um processo LRI é necessário prever o comportamento do escoamento da resina ao

longo do domínio poroso, sendo o arranjo dos locais de entrada e saída da resina uma tarefa crítica. A configuração dos canais de injeção, por exemplo, tem grande impacto no padrão do escoamento da resina e, conseqüentemente, no tempo de preenchimento do molde e formação de vazios nos componentes fabricados (GROSSING et al., 2016; LUO et al., 2001; MATSUZAKI et al., 2013).

No âmbito industrial, o método de tentativa e erro é usualmente empregado para indicar as melhores configurações geométricas, o que pode levar a elevados tempos de infusão e risco de falha durante os estágios iniciais da produção de um novo componente em material compósito. Além disso, esse procedimento iterativo é geralmente oneroso, pois envolve recursos humanos, equipamentos e materiais. Muitas vezes a montagem da peça em material compósito depende da experiência do construtor para mitigar erros de processo. Os principais problemas de processamento que dificultam a implementação do processo LRI nas indústrias são: impregnação de resina lenta ou mal controlada, formação de regiões secas, baixa repetibilidade e confiabilidade na qualidade das peças fabricadas (POODTS et al., 2013; SHEVTSOV et al., 2021; OOSTEROM et al., 2019).

Como o método de tentativa e erro requer muito tempo, custo e esforço e nem sempre é possível obter todos os dados necessários para projetar um processo LRI ótimo, os esforços de pesquisadores e engenheiros foram orientados para desenvolver uma descrição teórica adequada da dinâmica do processo de infusão de resina e ferramentas de modelagem computacional capazes de prever a evolução do processo no tempo (BERTLING et al., 2016; HU et al., 2020; SHEVTSOV et al., 2021). Simulações numéricas são promissoras para reduzir a tentativa e erro e, assim, aumentar a economia de custos. Como resultado, é possível prever a distribuição da pressão, padrões do escoamento da resina e formações de vazios. Com essas informações, alguns parâmetros do processo podem ser otimizados, por exemplo, distribuição dos canais de injeção no domínio poroso e localização dos pontos de entrada e saída da resina. Além disso, pode ser investigada a influência desses parâmetros sobre os indicadores de performance e qualidade como, tempo de preenchimento do molde, desperdício de resina ou regiões secas (GROSSING et al., 2016; LUO et al., 2001; MATSUZAKI et al., 2013).

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma metodologia onde a configuração geométrica dos canais de injeção cresce a partir de uma construção elementar utilizando as seguintes técnicas de construção: 1 – função de construção baseada na resistência ao escoamento de resina (FC: R), 2 – função de construção baseada na minimização do tempo de preenchimento do molde (FC: t) e 3 – função de construção baseada na minimização da quantidade de massa de resina desperdiçada (FC: m) no processo LRI. Mais precisamente, é apresentado um estudo idealizado do processo de infusão (simulação do princípio de funcionamento), obtendo recomendações teóricas sobre a configuração geométrica que conduz a um melhor desempenho fluidodinâmico do problema

(minimizando tempo de injeção e desperdício de resina). O algoritmo de construção é baseado na Teoria Construtal. A aplicação da Teoria Construtal para geração de configurações de canais de injeção inseridos em meio poroso ainda não foi amplamente explorada na literatura.

No presente trabalho numérico, o avanço do escoamento da resina é modelado através das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação de transporte para a fração volumétrica da resina. A discretização destas equações é realizada através do Método dos Volumes Finitos (MVF) (PATANKAR, 1980; VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007). 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 definida pela Lei de Darcy.

Para a realização do estudo da racionalização do projeto em processos de infusão de resina, o uso da modelagem computacional é de fundamental importância. No presente estudo foram empregados os softwares GMSH (para a realização do pré-processamento como desenho do domínio, definição das diferentes regiões do escoamento e geração da malha) e FLUENT, versão 14 (para imposição das condições de contorno, processamento e pós-processamento da solução).

1.1 Estado da Arte

Mathur et al. (1999) utilizaram Algoritmos Genéticos (GAs - do inglês: *Genetic Algorithm*) acoplados interativamente com simulações numéricas para otimizar os locais de entrada e saída para o processo de Moldagem por Transferência de Resina (RTM – do inglês: *Resin Transfer Molding*), a fim de minimizar os tempos de preenchimento e a formação de pontos secos. Os autores realizaram um estudo de caso com uma peça de geometria complexa. O GA foi capaz de encontrar locais ideais de entrada e saída usando menos de 1% de todas as combinações possíveis de simulações. Assim, os autores salientam que GAs podem ser usados com eficiência para minimizar o tempo de preenchimento e a formação de pontos secos por meio da localização ideal de portões e respiradouros em processos de RTM.

LUO et al. (2001) apresentaram uma abordagem sistemática para um projeto idealizado do processo RTM. Esta abordagem foi construída sobre um modelo de simulação numérica acoplado a uma rede neural e algoritmos genéticos para otimização do processo. O modelo de simulação foi empregado para prever padrões do escoamento de resina (ou seja, potenciais problemas de qualidade) e eficiência de processamento (tempo de preenchimento do molde). Com os resultados da simulação, uma rede neural foi treinada para criar um modelo rápido para o processo RTM. Algoritmos genéticos foram aplicados a este modelo para buscar os pontos ideais de injeção e aberturas de ventilação para

o melhor desempenho de processo, ou seja, tempo de preenchimento curto e alto nível de qualidade (defeitos mínimos).

Brouwer et al. (2003) descreveram formas para melhorar a confiabilidade e previsibilidade da tecnologia de Moldagem por Transferência de Resina Assistida à Vácuo (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. Os autores apresentaram estratégias para melhorar o posicionamento dos canais de injeção e para conseguir o processamento do material compósito livre de vazios. Mais precisamente, os autores descreveram dois exemplos de grandes aplicações estruturais desenvolvidas, sendo uma pá de rotor e um casco de barco de 20 m e de 16 m de comprimento, respectivamente. A estratégia de injeção adotada, para o segundo caso, pelos autores consiste em um canal principal de injeção, na região central do domínio, deslocando da popa para a proa (através da quilha) e vários canais bifurcados espalhados ao longo da área do domínio (de centro para a periferia). Foi utilizado como ferramenta o software RTM-Worx para simular numericamente o escoamento de resina.

Posteriormente, Gomes et al. (2012) realizaram um estudo numérico e experimental para melhor caracterização do processo VARTM, indicando as melhores estratégias para o preenchimento de uma pré-forma porosa, que consiste em uma placa retangular e 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. Os autores utilizaram o software RTM-Worx®, baseado no FE/CV (do inglês: *Finite Element /Control Volume*), para simular o processo VARTM. 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. Os resultados indicaram que a consideração de duas regiões de saída (com vácuo) e uma região de entrada de resina, colocadas nos extremos do comprimento do domínio, foi a melhor estratégia para minimizar o tempo preenchimento e prevenir a formação de vazios.

Isoldi et al. (2012) realizaram um estudo numérico de um escoamento de resina simulando o princípio de funcionamento dos processos de RTM e Moldagem por Transferência de Resina *Light* (LRTM – do inglês: *Light - Resin Transfer Molding*). Neste estudo, diversas aplicações de RTM foram consideradas. No que tange à abordagem matemática e numérica, a solução baseou-se no método VOF e utilizou-se o software comercial FLUENT para a solução aproximada das equações de conservação do problema. Neste estudo, vários casos foram resolvidos numericamente (escoamento retilíneo, radial e domínio tridimensional) e comparados com resultados analíticos,

experimentais e numéricos da literatura. A diferença máxima entre estas soluções foi cerca de 8,0%, mostrando a validade e eficácia do método numérico desenvolvido. Além disso, uma nova metodologia computacional foi desenvolvida para simular um processo por 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. Esta metodologia explora a capacidade do método VOF de analisar geometrias que combinam meios porosos e regiões abertas (vazias).

Sirtautas et al. (2015) desenvolveram um modelo numérico baseado no Método de Elementos Finitos (MEF), considerando os efeitos de compactação e relaxamento de tecido e permeabilidade ortotrópica dependente da pressão no domínio para diferentes materiais fibrosos. A aplicabilidade do modelo foi demonstrada por comparação entre o modelo numérico e os resultados experimentais para o escoamento de resina no domínio bidimensional de peça aeroespacial. Os resultados mostraram boa concordância, recomendando a utilização do método computacional proposto.

Posteriormente, Grossing et al. (2016) abordaram uma metodologia de simulação para prever o escoamento de resina em peças reais e compararam a viabilidade técnica de empregar os softwares PAM-RTM, baseado no modelo numérico FE/CV e OpenFOAM, baseado no método VOF, para a obtenção das soluções numéricas. Primeiramente, foi observado que as soluções numéricas foram validadas através de comparação com resultados experimentais. Inferiu-se que ambos os modelos numéricos apresentaram resultados muito semelhantes para simulações de meios porosos.

Wang et al. (2016) desenvolveram um método iterativo baseado em um Diagrama de Voronoi Centroidal (CVD), que consiste em um tipo especial de decomposição de um dado espaço cujos pontos gerados são os centroides (centros de massa) das regiões analisadas, para otimização da distribuição de vários canais de injeção e para reduzir o número de testes necessários. Os nós na superfície da malha foram usados para gerar o diagrama de Voronoi Centroidal (CVD) da geometria do molde e de forma interativa foi encontrado o CVD ideal da superfície do molde. Foi demonstrado que o CVD da superfície da peça retornou os locais de entrada da resina que minimize o custo funcional do tempo de preenchimento do molde e requer menos simulações a serem executadas em comparação com os métodos de Busca Exaustiva (BE) e Algoritmos Genéticos.

Pierce et al. (2017) desenvolveram e validaram um modelo multifísico para melhorar a simulação do processo de infusão em uma pré-forma complexa. Amostras de tecido de fibra de carbono foram experimentalmente caracterizadas para determinar propriedades de tração, cisalhamento e permeabilidade. Essas propriedades foram incorporadas em um modelo de drapejo (modelo que considera a deformação do tecido). Os resultados do modelo de drapejamento foram ligados ao modelo de infusão, de modo que a relação caracterizada entre a deformação por

cisalhamento e a permeabilidade do tecido pode ser usada para prever a distribuição das propriedades de permeabilidade ao longo de uma pré-forma antes da infusão. Os resultados foram comparados com modelos tradicionais usados na indústria que não consideram a deformação do tecido. A combinação de propriedades de permeabilidade dependente da deformação da pré-forma levou a previsões mais realistas do comportamento do escoamento de resina em relação aos modelos tradicionais. No geral, o modelo multifísico mostrou boa concordância com experimentos de validação, particularmente em áreas de deformação de alto cisalhamento, que afetam significativamente o comportamento do escoamento local.

Geng et al. (2019) investigaram o comportamento da impregnação da resina em placas curvas simulando um processo VARTM. Eles realizaram um estudo experimental investigando a influência dos ângulos de curvatura e camadas de pré-forma sobre a linha de frente do escoamento da resina. Os resultados indicaram que devido à interação entre as deformações da pré-forma e a formação de vazios, as regiões curvas nos moldes levaram a um aumento de 15 a 30% do tempo de preenchimento em comparação com uma região retilínea. Foi desenvolvida ainda, uma metodologia analítica para avaliar o coeficiente de perda de pressão e as variações gerais de permeabilidade em regiões curvas. Além disso, uma série de simulações numéricas foram realizadas usando o software LIMS, baseado no FE/CV, e diferentes ângulos de curvatura foram testados. Os resultados das simulações foram concordantes com os dados experimentais.

Rubino e Carlone (2019) propuseram uma metodologia semi-analítica para considerar os efeitos da compactação da pré-forma no escoamento de resina para um meio poroso deformável, que é importante para processos como VARTM e Processo de Seemann para a Moldagem de Compósitos por Infusão de Resina (SCRIMP – do inglês: *Seeman Composites Resin Infusion Molding Process*), onde uma bolsa flexível é comumente usada como parte do molde. O efeito da compactação da pré-forma sobre o tempo de impregnação foi avaliado integrando um modelo analítico. Foi simulada a deformação das fibras de acordo com o valor real da pressão aplicada no material e a aderência da pré-forma utilizando uma sub-rotina para modelos de escoamentos dinâmicos. As simulações foram realizadas utilizando o pacote Ansys CFX. O modelo de compactação e a abordagem acoplada foram comparados com dados da literatura para testar sua confiabilidade. Os resultados numéricos mostraram que a compactação da pré-forma afeta significativamente o escoamento da resina e o tempo de preenchimento do molde.

Struzziero e Skordos (2019) realizaram uma otimização numérica multiobjetivo com foco na escolha de um perfil de temperatura ideal, que minimize o tempo de preenchimento e o risco de impedimento do escoamento de resina devido à cura excessiva. Para a otimização, os autores empregaram métodos de inteligência computacional baseados em Algoritmo Genético (GA). Os

parâmetros do processo são a posição dos locais de entrada da resina, o preenchimento do molde, o perfil de temperatura e coeficiente de convecção. Os resultados alcançaram reduções de quase 66% e 15%, no tempo de preenchimento e no grau final de cura, respectivamente, em comparação com soluções de fabricação industrial padrão.

No trabalho de Gajjar et al. (2020), placas planas de polímero reforçada com fibra de carbono foram fabricadas usando o processo de infusão a vácuo (VIP – do inglês: *vacuum infusion process*) considerando vários parâmetros do processo. A espessura da peça e a pressão da resina foram consideradas como parâmetros de processamento na fabricação de placas planas. A pressão de compactação e a fração volumétrica foram medidas em diferentes locais da placa plana durante o processo de fabricação. A pressão de compactação também foi simulada no software FLUENT para todas as peças fabricadas e comparada com resultados experimentais. A variação percentual da pressão da resina para resultados experimentais e de simulação encontraram-se dentro da boa concordância. A espessura da peça foi diminuindo enquanto a fração volumétrica foi aumentada da entrada da resina para as seções de saída.

Shevtsov et al. (2020, 2021) realizaram um estudo numérico para modelar e otimizar a qualidade do processo de infusão a vácuo, especificamente para prever e eliminar corretamente a formação de pontos secos na fabricação de peças compósitas tridimensionais de geometrias complexas, como painéis de aeronaves. Esses trabalhos também apresentaram alguns resultados experimentais, que demonstram dois casos de formação de pontos secos em painéis de aeronaves de grande porte, e analisaram as razões para o surgimento desses defeitos. Para o modelo computacional, uma técnica numérica baseada no escoamento de resina líquida em um pré-molde poroso foi acoplada a um modelo que descreve o movimento do escoamento em solos insaturados. A técnica numérica proposta foi implementada no ambiente Comsol Multiphysics FE e pós-processada no software MATLAB, o que possibilitou detectar corretamente os tempos de formação, localização e dimensões dos pontos secos. Em Shevtsov et al. (2021) os autores utilizaram uma abordagem complementar levando em consideração os efeitos térmicos, cinéticos e reológicos. Eles aplicaram a técnica em um processo de infusão a vácuo com uma geometria 3D complexa.

Adhikari et al. (2021) estudaram a modelagem de um escoamento bifásico, incompressível e transiente, na presença de meios de alta permeabilidade durante o processo VARTM. O modelo numérico para previsão de mudança instantânea de pressão, elevação de espessura, tempo de preenchimento do molde e posições da linha de frente do escoamento foi validado com experimentos para uma placa plana com duas configurações diferentes dos meios de alta permeabilidade para garantir a saturação completa. A previsão do tempo de preenchimento mostrou uma boa correspondência com as medições experimentais com precisão de 5%.

No âmbito da Teoria Construtal é possível observar na literatura que, a mesma tem sido aplicada para a recomendação da configuração geométrica, para maximizar o desempenho e compreender o efeito do design, em diversos problemas, como dinâmica social (Bejan e Merks, 2007), sistemas térmicos, como trocadores de calor (Feijó et al., 2018; Wu et al., 2019), fontes renováveis de energia (Nunes et al., 2021) e até mesmo em problemas de mecânica dos sólidos (Lima et al., 2020; Mardanpour et al., 2021). Do conhecimento da autora, com exceção das obras de Isoldi et al. (2013), Magalhães et al. (2016) e Magalhães et al. (2020), a Teoria Construtal não foi empregada na literatura para investigação da influência da geometria no desempenho de processos LCM. Sobretudo, o desenvolvimento de uma metodologia baseada em técnicas de construção da configuração geométrica dos canais de injeção, aplicando a Teoria Construtal é inédito ao problema de infusão de resina.

No trabalho de Isoldi et al. (2013) o método Design Construtal foi empregado para analisar 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 de injeção no tempo final de injeção de resina no molde fibroso. Os resultados indicaram uma possibilidade de reduzir substancialmente o tempo injeção no processo.

Magalhães et al. (2020) investigaram a influência da geometria de canais de injeção em forma de I e T inseridos em uma placa retangular bidimensional com um meio poroso, sobre o tempo de infusão da resina, simulando o princípio operacional de um processo de Infusão de Resina Líquida (LRI). A otimização geométrica foi realizada através dos métodos Design Construtal e Busca Exaustiva (BE). Para as condições estudadas, a melhor configuração em T resultou em um tempo de preenchimento quase três vezes menor do que a geometria ótima em I, mostrando que a complexidade dos canais beneficiou o desempenho do processo. Ressalta-se que o trabalho citado é uma espécie de continuidade do estudo de Magalhães et al. (2016) com a diferença de que em Magalhães et al. (2020) o canal em forma de T é completamente otimizado, ou seja, todos os três graus de liberdade foram investigados.

Nos trabalhos supracitados o método Design Construtal associado à técnica de Busca Exaustiva foram aplicados para otimização geométrica de formas predefinidas, destaca-se a seguir alguns trabalhos que abordaram a evolução (crescimento) do Design e são inspirações para o presente trabalho.

Errera e Bejan (1998) mostraram que os padrões dendríticos formados por canais de baixa resistência em uma bacia hidrográfica são reprodutíveis e podem ser deduzidos a partir de um único princípio que atua em todas as etapas no desenvolvimento do padrão: a minimização restrita da resistência global ao escoamento. A bacia do rio foi modelada através da lei de Darcy, como um

território bidimensional, com meio poroso heterogêneo saturado. De uma etapa para outra, pequenos elementos do meio poroso foram desalojados e removidos de maneira a minimizar a resistência global ao escoamento. Os elementos removidos foram substituídos por canais com menor resistência ao escoamento, formando um padrão dendrítico que é determinístico, e não aleatório.

Avendaño et al. (2018) utilizaram a Teoria Construtal e Algoritmos Genéticos para construir caminhos condutores conectados a um dissipador de calor inseridos em uma placa quadrada de baixa condutividade com geração interna de calor. Mais precisamente, o objetivo do trabalho foi minimizar a resistência térmica global (temperatura máxima) que ocorre no domínio computacional. Os autores observaram que a forma final obtida facilitou a construção dos caminhos de forma evolutiva utilizando todo o material disponível, enquanto o GA distribuiu gradualmente (uma porcentagem para cada evolução) o material, de forma incremental. As formas encontradas para os caminhos têm grande semelhança com as formas ramificadas em forma de árvore encontradas na natureza.

O trabalho de Vianna et al. (2018) usou a Teoria Construtal em seu sentido mais fundamental, ou seja, onde as formas geométricas evoluem (crescem) a partir de uma forma elementar, denominada como Construtal Elementar (EC – do inglês: *Elemental Constructal*), ao invés da aplicação de um método de otimização a uma geometria predefinida. Para testar o algoritmo proposto, os autores resolveram um problema de cavidade isotérmica em um corpo sólido gerador de calor e a solução foi comparada com as soluções obtidas na literatura para várias formas predefinidas (I, T, Y, X e outras). O objetivo principal não foi encontrar a melhor geometria possível para a cavidade, mas entender como a forma da cavidade deve crescer para reduzir a temperatura no domínio sólido. Além disso, o problema de otimização de cavidade foi usado apenas como um exemplo de aplicação de uma metodologia muito mais geral usada para prever como a configuração geométrica pode evoluir em diferentes problemas de escoamento.

Pedroti et al. (2020) realizaram um estudo numérico sobre a remoção de energia em um arranjo tubular aquecido submetido a um escoamento externo. Levando em conta que pode existir uma grande variedade de arranjos tubulares, os autores desenvolveram um arranjo tubular que não utiliza nenhum tipo de arranjo inicial predefinido. Seguindo os princípios da Teoria Construtal, as variáveis de velocidade e temperatura foram utilizadas para definir uma função de posicionamento cuja determinação do máximo, determina a melhor posição em potencial para a montagem de tubos dentro de uma área de ocupação de tamanho finito. Para validar a metodologia proposta, o arranjo de tubos obtido, denominado Matriz Construtal (CA – do inglês: *Constructal Array*), foi comparado com arranjos padrões sugeridos na literatura (matriz tubular alinhada e alternada). A influência do número de Reynolds no padrão de formação das CAs também foi investigada. Em todas as análises realizadas,

a configuração das Matrizes Construtal apresentou maior remoção de energia (até 71%) do que os arranjos alinhados e alternados, o que destaca a capacidade do método proposto.

Recentemente, Zhang e Lorente (2022) apresentaram uma metodologia para prever o crescimento de uma rede de fluido, de um escoamento considerado laminar e incompressível, em um domínio poroso circular. Redes em forma de árvore foram geradas conectando uma entrada a um número crescente de saídas, o que permitiu o crescimento da rede mantendo sua vazão volumétrica geral constante. O crescimento aconteceu de tal forma que, em todos os níveis as características geométricas se transformaram para manter o volume total do fluido mínimo. A metodologia Construtal baseou-se no desenvolvimento de um algoritmo inspirado na técnica de Otimização Construtiva Restrita (do inglês: *Constrained Constructive Optimization*) combinada à lei de Hess-Murray's. Os resultados mostraram que a rede de fluidos reconfigurou seus dendritos a cada passo de crescimento, mas seu ângulo médio de bifurcação permaneceu constante independentemente do número de saídas conectadas. Além disso, os resultados mostraram que quando dada liberdade suficiente, ou seja, sem restrição no comprimento dos canais, as redes fluidas tendem a invadir todo o espaço disponível, independentemente da forma do domínio: redondo, quadrado ou retangular.

Em contribuição ao estado da arte, o presente trabalho propõe duas técnicas inovadoras de construção do design de canais de injeção em problemas de Infusão de Resina Líquida (LRI). Mais precisamente, é desenvolvida uma metodologia onde a configuração geométrica dos canais cresce a partir de uma construção elementar utilizando a Teoria Construtal com função de construção baseada na resistência ao escoamento de resina e a Teoria Construtal com uma função de construção baseada nos indicadores de performance (tempo de preenchimento do molde e a quantidade de massa de resina desperdiçada no processo). Destaca-se que a metodologia proposta pode ser aplicada para racionalizar processos industriais e reduzir os custos e esforços envolvidos nos processos de LRI.

1.2 Objetivos

No presente trabalho, tem-se o objetivo de desenvolver uma metodologia numérica para a construção dos canais de injeção em problemas de Infusão de Resina Líquida (LRI) baseada na Teoria Construtal, obtendo recomendações teóricas sobre a configuração geométrica de canais de injeção, que conduzem a um melhor desempenho fluidodinâmico do problema (minimizando tempo de injeção e desperdício de resina) a partir de uma configuração elementar e com crescimento definido a partir de funções de construção.

1.2.1 Objetivos Específicos

O estudo desenvolvido aqui tem como objetivos específicos:

- ✓ aplicar a Teoria Construtal para definir uma metodologia para a construção dos canais de injeção (sem forma pré-definida) a serem inseridos no meio fibroso;
- ✓ investigar a influência das condições de contorno no crescimento do canal e nos indicadores de performance do problema estudado;
- ✓ comparar os indicadores de performance na evolução dos elementos de construção (ECs) considerando a montagem de cada novo elemento de canal de injeção na posição de maior ou menor resistência ao escoamento;
- ✓ avaliar o efeito da dimensão dos ECs sobre a forma gerada e sobre os indicadores de performance do sistema;
- ✓ comparar o design gerado para os canais de injeção considerando o aumento do canal de injeção com as FC: R , FC: t e FC: m .
- ✓ avaliar o efeito da razão geométrica H/L (relação entre o comprimento e a largura do molde) sobre os indicadores de performance e o design gerado para os canais de injeção, utilizando a metodologia com FC: t ;
- ✓ avaliar a influência da geometria sobre a formação de vazios no interior do molde;
- ✓ gerar, através da modelagem computacional e da Teoria Construtal, recomendações teóricas sobre a configuração da geometria dos canais de injeção inseridos em uma placa retangular com 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 abrangendo processos de Moldagem Líquida de Compósitos, importantes trabalhos sobre Teoria Construtal, o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre materiais compósitos, destacando o processo LRI e aspectos abordados na literatura a respeito das variáveis envolvidas no referido processo, bem como o princípio de funcionamento, as vantagens e desvantagens.

O Capítulo 3 aborda aspectos básicos encontrados na bibliografia sobre conceitos relacionados com a Teoria Construtal.

O Capítulo 4 trata da modelagem matemática empregada para a simulação de um processo LRI. Além disso, também é apresentada a descrição e aplicação da Teoria Construtal ao problema.

O Capítulo 5 apresenta aspectos relacionados à modelagem numérica dos escoamentos, noções sobre o Método de Volumes Finitos (MVF) a ser utilizado para as simulações e os procedimentos numéricos adotados. Também é apresentada a verificação do modelo numérico empregado.

O Capítulo 6 apresenta e discute os resultados referentes à análise numérica da configuração geométrica de canais de injeção em problemas de LRI construídos com a Teoria Construtal.

O Capítulo 7 traz as conclusões referentes ao estudo da influência da configuração geométrica dos canais de injeção em um processo LRI. 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

Este capítulo aborda fundamentos dos materiais compósitos e destaca o processo de fabricação LRI.

2.1 Materiais Compósitos

Nas mais antigas civilizações, intuitivamente, já se tinha a ideia de combinar materiais para obter outros materiais diferenciados, como tijolos de argila, produzidos pela combinação de palha e barro. Árvores e plantas fornecem compósitos naturais que foram usados pelos homens pré-históricos e ainda são usados largamente na construção civil e em estruturas de andaimes. A madeira é um bom exemplo de compósito natural, uma combinação de fibras de celulose envolvidas por resina natural chamada lignina. A celulose proporciona resistência e a lignina funciona como “cola” que liga e estabiliza a fibra. O bambu é compósito de madeira muito eficiente. Os componentes são também celulose e lignina, como em qualquer madeira, entretanto o bambu é oco. Isso resulta em uma estrutura leve, porém, resistente. Varas de pesca e tacos de golfe copiam esse design natural (ABMACO, 2009; REZENDE et al., 2011).

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 (MARINUCCI, 2011; REZENDE et al., 2011; RUDD et al., 1997).

É importante salientar que pelo menos um constituinte do material compósito apresenta característica filamentar, fibrosa ou particulada, dispersa, conhecida como reforço, e envolta em fase contínua denominada matriz (ligante). Tipicamente as fases dispersas são resistentes e com baixas massas específicas, enquanto a matriz é um material dúctil ou tenaz. Se o compósito for projetado corretamente, combinará a resistência do reforço com a tenacidade da matriz para alcançar uma combinação de propriedades desejadas, não disponíveis em nenhum dos materiais isoladamente. As propriedades do compósito resultante estão diretamente associadas às propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa, tal como forma, tamanho e distribuição (ABMACO, 2008, 2009; MARINUCCI, 2011; RUDD et al., 1997).

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. 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; RUDD et al., 1997).

O desenvolvimento da tecnologia dos compósitos poliméricos avançados tem como uma de suas finalidades formar um conjunto de materiais que combine elevada resistência, 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, 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 (MARINUCCI, 2011; REZENDE et al., 2011; RUDD et al., 1997).

2.2 Processos de fabricação

Na elaboração de um componente estrutural utilizando materiais compósitos é de grande importância o conhecimento das propriedades e natureza dos materiais empregados quando se deseja um efeito sinérgico entre seus constituintes, ou seja, obter propriedades potencializadas. A escolha equivocada destes e do processamento empregado pode promover um efeito contrário, provocando um decaimento nas propriedades desejadas (MARINUCCI, 2011; REZENDE et al., 2011).

A qualidade de um produto empregando-se material compósito é fortemente influenciada pelo processo de fabricação. O método empregado no processamento de obtenção do compósito define suas características, tais como a qualidade de dispersão e distribuição da fase reforço, da homogeneidade estrutural, conformidade geométrica, etc. O processamento depende do tipo de matriz e de reforço empregado, além da geometria do componente (MARINUCCI, 2011; REZENDE et al., 2011).

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. Esse objetivo é alcançado empregando-se um processo adequado à fabricação e seguindo-se especificações

e normas. Nesse contexto, a escolha correta do processo contribui significativamente para o sucesso de um empreendimento (MARINUCCI, 2011).

Processos cada vez mais inovadores permitem 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, será dado destaque ao processo LRI, foco deste trabalho.

2.2.1 Infusão de Resina Líquida (LRI)

O processo de laminação por 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; NASSEH, 2021). 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. Isso porque utiliza apenas o molde que dará a forma geométrica à peça e um saco de vácuo. A Figura 2.1 ilustra as quatro etapas básicas do processo. Após a preparação do molde (limpeza e aplicação de agentes desmoldantes), o reforço seco é colocado no molde na quantidade necessária para obter a espessura desejada para a estrutura, Fig. 2.1 (a). Na Figura 2.1 (a), além do reforço fibroso existe um núcleo estrutural, o que caracteriza a peça do tipo sanduíche. 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, Fig. 2.1 (b). 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, Fig. 2.1 (c). Finalmente, a impregnação do reforço fibroso é feita pela resina, introduzida no interior do molde através de canais de injeção, e succionada pelo vácuo criado sob o filme, Fig. 2.1 (d). 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).

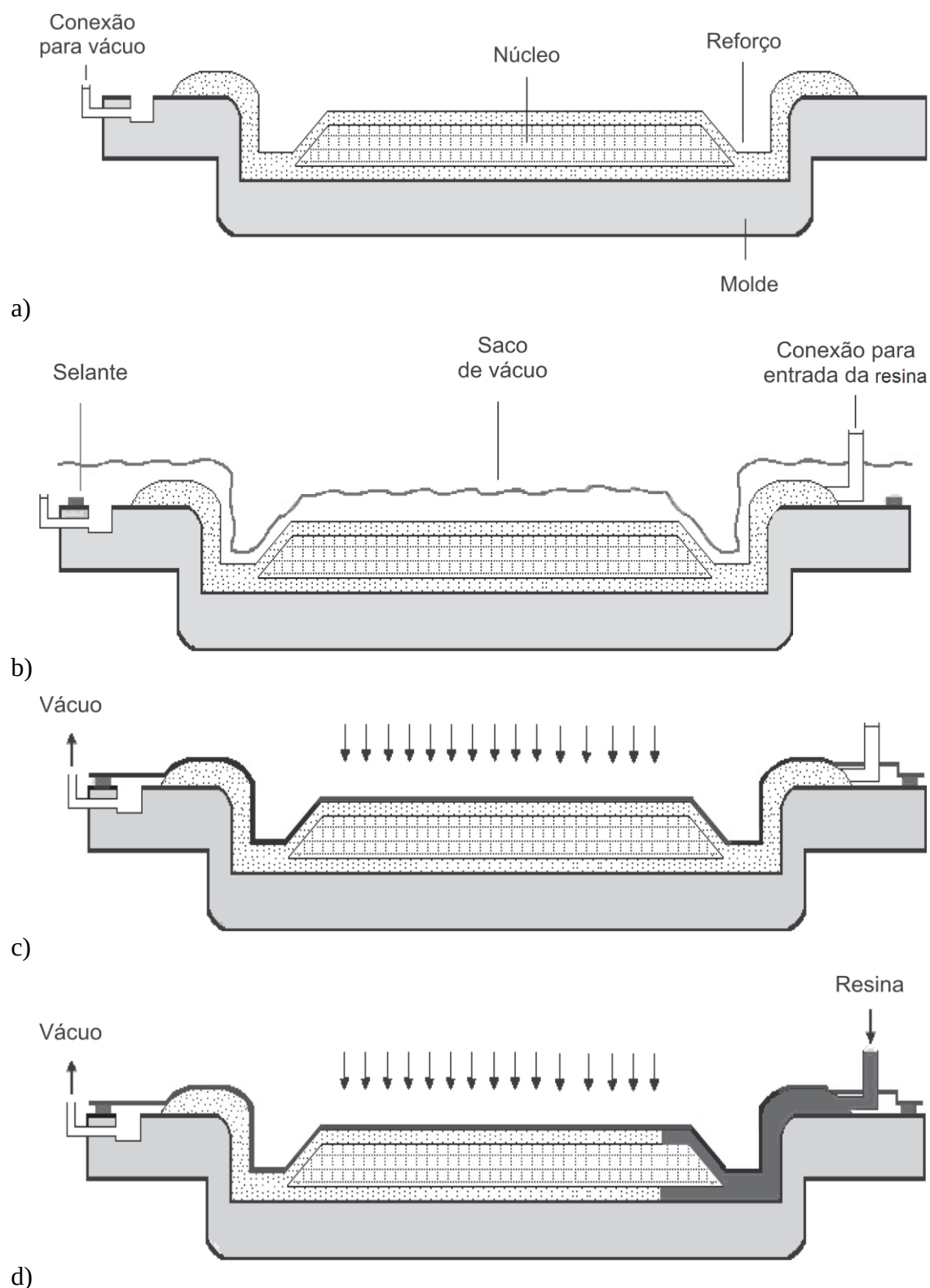


Figura 2.1 – Etapas do processo de infusão: a) posicionamento do reforço, b) fechamento do saco de vácuo, c) vácuo, d) injeção da matriz polimérica (MARINUCCI, 2011).

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; NASSEH, 2021).

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 de 20 m e 50 m, respectivamente (BROUWER et al., 2003; MARINUCCI, 2011). Duas ilustrações dos exemplos supracitados são apresentadas na Fig. 2.2.



Figura 2.2 – Exemplos 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 do 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 e pontos de vácuo no molde para que todo o reforço seja impregnado adequadamente. O tempo de infusão depende da posição de entrada da resina e da saída de vácuo. Isso pode ser feito de

várias maneiras e é função do projetista ou construtor definir qual é a melhor estratégia para cada projeto. O objetivo do construtor é otimizar da melhor forma os canais de injeção e pontos de entrada de resina, assim como as linhas e pontos de saída de vácuo para fazer com que a resina entre em processo de gel logo após a frente de resina chegar nas linhas de vácuo. Desta forma, o sistema não perde pressão com a excessiva saturação das linhas de vácuo e também diminui muito o desperdício de resina no processo (NASSEH, 2021).

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 regiões secas (vazios) que são pontos fracos do material e podem levar a falha estrutural (LOPES, 2009; MARINUCCI, 2011). A quantidade de vazios dentro de um laminado pode ser diretamente relacionada com a sua qualidade. A presença de vazios dentro da peça pode reduzir consideravelmente o desempenho mecânico, principalmente a resistência aos esforços de cisalhamento interlaminar, flexão e compressão. Além disso, os vazios agem como concentradores de tensão e podem ser pontos iniciadores de trincas (NASSEH, 2021).

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. O desenvolvimento de simulações numéricas permite a análise da estratégia de fabricação antes mesmo da construção do molde. Com a análise do escoamento de resina, é possível determinar qual a quantidade de linhas de vácuo, canais de injeção, posicionamento e espaçamento dos canais, local de início e término dos canais e conexão. A habilidade de realizar tentativas de injeção em um ambiente virtual torna possível um desenvolvimento mais rápido do processo, facilitando a otimização do tempo de trabalho e o desperdício de material. Além, é claro, de diminuir o risco e os custos que uma abordagem clássica de tentativa e erro teria para otimizar o processo (MARINUCCI, 2011; NASSEH, 2021).

Dependendo da extensão do laminado (área), há estratégias estabelecidas do arranjo das linhas de injeção. A Fig. 2.3 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 2.3, 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. 2.3(a), a resina entra no domínio na linha contínua e se desloca linearmente até a região da linha tracejada. Observa-se apenas uma linha de vácuo e um canal de entrada da matriz, que estão

em lados opostos. Na Fig. 2.3 (f) mostra-se uma geometria complexa por onde a resina entra no domínio. O intuito é trabalhar com o arranjo que distribui mais homogeneamente a resina ao longo do domínio (MARINUCCI, 2011).

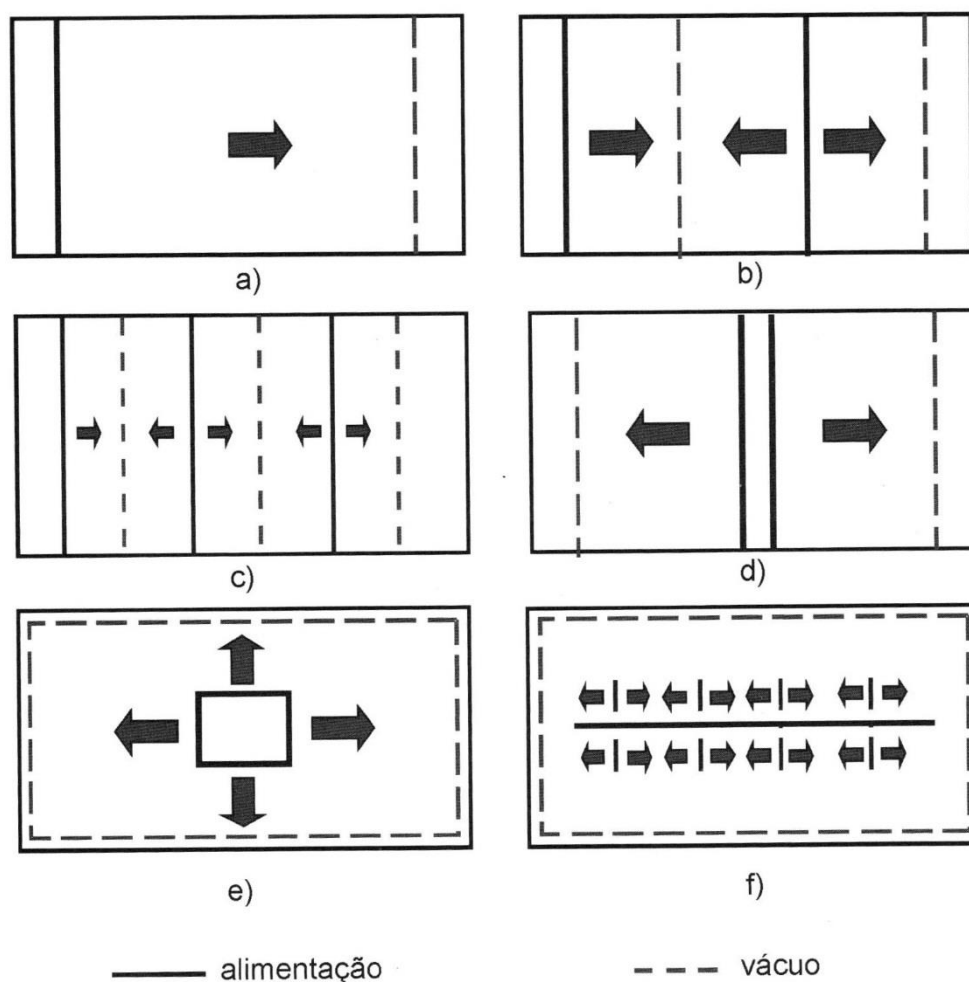


Figura 2.3 – Tipos de arranjo das linhas de alimentação da matriz: a) sequencial simples, b) sequencial duplo, c) sequencial alternado, d) composto, e) central, f) espinha de peixe (MARINUCCI 2011).

Apesar de vários arranjos para o processo de infusão, basicamente qualquer estratégia de infusão, até as de alto nível de complexidade, pode ser discretizada e simplificada por três métodos básicos mostrados na Fig. 2.4. Na Figura. 2.4 (a) o método ilustrado é chamado de *Point Injection* e é bastante utilizado quando se pretende infundir uma pequena área isolada de reforço ou também em testes de permeabilidade. Dos três métodos, este é o que possui maior tempo de infusão e depende também do diâmetro de entrada da resina. Ou seja, a frente de resina nesse método corre de forma imprevisível e lenta, tornando essa estratégia a menos confiável. O método apresentado na Fig. 2.4 (b) é chamado *Edge Injection*, onde a resina é injetada por um canal posicionado em uma das arestas

da peça e a linha de vácuo é posicionada na extremidade contrária. Dessa forma a resina é transportada ao longo do comprimento do laminado pelo diferencial de pressão. Esse método possui muitas variações onde, dependendo da largura e a geometria da peça, é possível mudar o posicionamento do canal de injeção e linha de vácuo e assim melhorar a frente de resina. O método ilustrado na Fig. 2.4 (c) é chamado *Peripheral Injection* e a resina é alimentada por todas as arestas e transportada para o centro da peça (NASSEH, 2021).

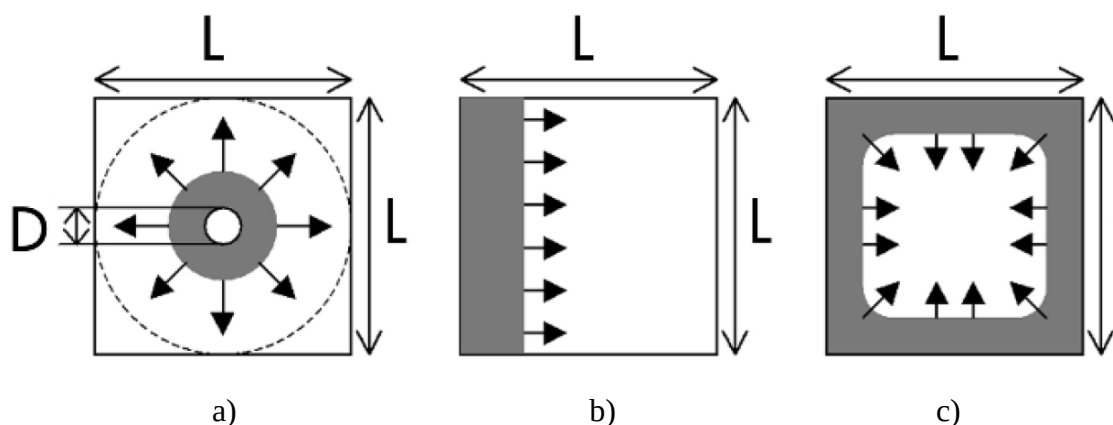


Figura 2.4 – Estratégias de infusão (NASSEH, 2021).

Ao realizar uma infusão com o método *Edge Injection*, Fig. 2.4 (b), o construtor deve atentar para a distância na qual a frente de resina terá que avançar. No caso dessa distância ser elevada, é recomendado posicionar o canal de injeção no centro do painel e assim reduzir, pela metade, a distância a ser percorrida. Além disso, uma estratégia muito utilizada em grandes infusões é a utilização de canais de injeção secundários, chamados de *branches*. A Figura 2.5 mostra alguns exemplos de canais de injeção secundários em uma placa de comprimento $2L$ e largura L . A Figura 2.5 (a) mostra os canais secundários adicionados primeiramente no centro do canal principal, depois somente nas extremidades, Fig. 2.5 (b), e finalmente ao centro e nas extremidades, Fig. 2.5 (c). É possível variar o comprimento e as distâncias entre os canais secundários e o canal principal para maximizar o avanço da resina na geometria desejada (NASSEH, 2021).

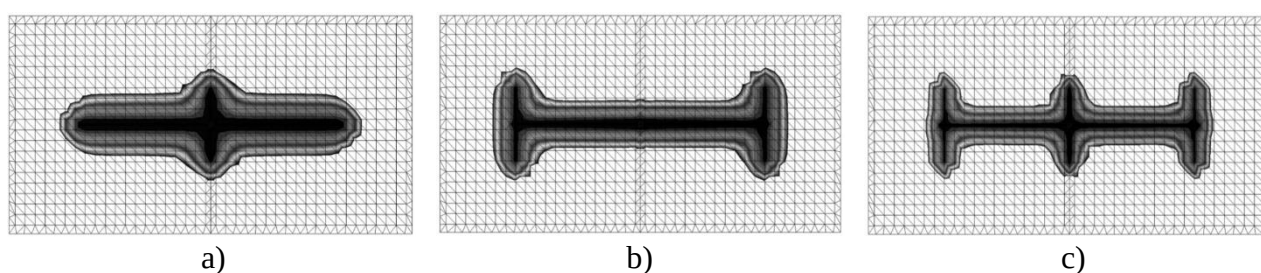


Figura 2.5 – Exemplos de canais de injeção secundários (NASSEH, 2021).

3 FUNDAMENTOS DA TEORIA CONSTRUTAL

A Teoria Construtal explica como ocorre a organização, a complexidade e a diversidade dos sistemas abertos onde existe fluxo/escoamento na natureza e engenharia. A descoberta de tal teoria se deu durante uma viagem à 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. e este atribuía a forma geométrica natural à “chance e necessidade”. Analisando a natureza, Bejan refutou 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; BEJAN e ZANE, 2012).

Neste sentido, a teoria proposta por Bejan defende que as formas geométricas de sistemas de fluxo/escoamento presentes na natureza não são aleatórias, ao acaso, e sim determinísticas e orientadas por um princípio físico (BEJAN, 2000; BEJAN e ZANE, 2012). Este princípio físico que a Teoria Construtal relaciona aos padrões, formas e estruturas semelhantes, encontrados na natureza (árvores, delta dos rios, pulmões humanos, corpo de animal e outros) é denominado Lei Construtal (BEJAN e LORENTE, 2011). O princípio físico afirma que para um sistema de dimensões finitas, onde existe fluxo/escoamento, persistir no tempo (sobreviver), a sua configuração deve evoluir livremente de tal forma que propicie o mais fácil acesso às correntes que fluem/escoam através dele (BEJAN, 2000, 2016; BEJAN e LORENTE, 2008, 2011; BEJAN e ZANE, 2012).

A essência da Lei Construtal é que todo processo em movimento, seja de um ser vivo, como uma planta, ou algo mais intangível ou inanimado, como uma rota migratória, avança rumo a redistribuir as imperfeições. Esse avanço gera mudanças morfológicas e ajustes que respondem ao mesmo princípio da evolução rumo a algo melhor. E isso, se aplica a fluxos/escoamentos tão díspares como o trânsito de uma cidade, o transporte de oxigênio dos pulmões e a fluidez dos pensamentos na arquitetura do cérebro (BEJAN, 2016).

O fenômeno do design na natureza une o inanimado com o animado. A Figura 3.1 mostra um exemplo onde a forma e a estrutura dos sistemas de fluxo/escoamento são descritas pela Lei Construtal, bem como, a semelhança entre alguns padrões encontrados na natureza. Na Figura 3.1(a) é ilustrado o delta do rio Lena, no norte da Sibéria e na Fig. 3.1(b) um molde do pulmão humano. A imagem ilustrada sugere uma comparação no padrão geométrico. A forma das seções transversais dos

rios e a maneira como as veias se interligam para atingir o pulmão, são determinadas por um princípio, isto é, existe uma direção para onde os sistemas abertos (vivos) caminham para “melhorar o seu desempenho” (BEJAN e LORENTE, 2013; BEJAN e ZANE, 2012).

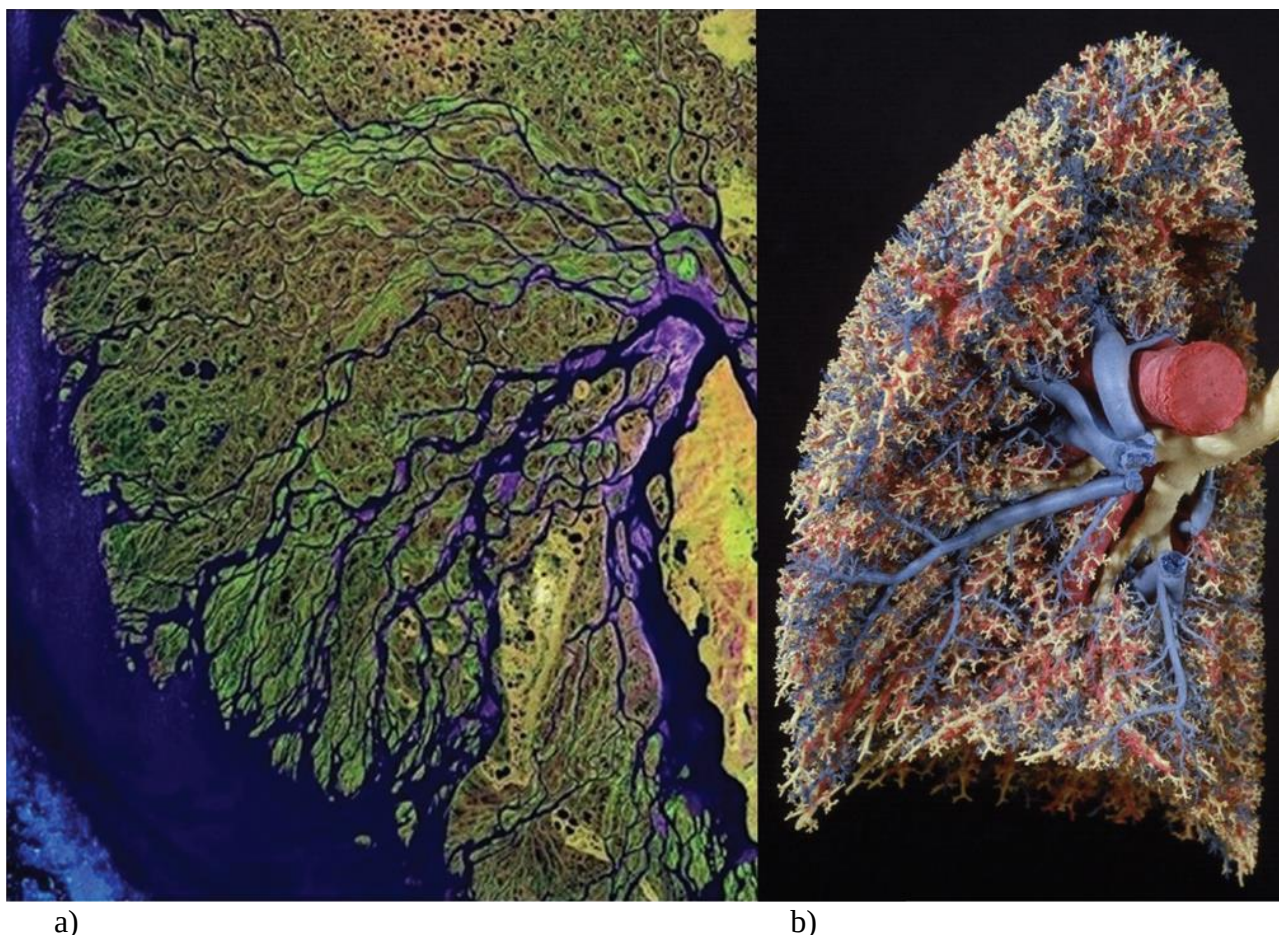


Figura 3.1 – Exemplo de formas e estruturas de sistemas de fluxo/escoamento e comparação entre padrões presentes na natureza (BEJAN e LORENTE, 2013).

Um sistema de fluxo/escoamento possui duas propriedades básicas, o fluxo/escoamento (por exemplo, fluido, calor, massa ou informação) e a estrutura por onde ele flui/escoa. 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, para-raios ou outra nuvem). Assim como em raios, vários outros sistemas apresentam o padrão de estrutura em forma de árvore (*tree-like form*). Este padrão é o formato que facilita o fluxo/escoamento de um ponto para uma área ou de uma área para um ponto (BEJAN e ZANE, 2012). A Figura 3.2 ilustra um exemplo do padrão de árvore presente na natureza. As imagens da Fig. 3.2 sugerem a forma característica de árvore em flocos de neve e em raios.



Figura 3.2 – Exemplo do padrão de árvore presente na natureza (Adaptado de “Physics, Biology and Economic Inequality”, 2019).

Mesmo sendo uma forma muito comum na natureza, o padrão de árvore 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). O futuro aponta na direção de caminhos mais curtos, rotas mais baratas, elementos estruturais mais leves, resistentes, 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 melhor 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 flua/escoe mais facilmente. Essa tendência natural de fluir/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 que for menos imperfeito possível. Esta tem sido a tendência da evolução de projetos em tecnologia, biologia, geomorfologia e organização social. O objetivo sempre é distribuir as imperfeições de maneira que o sistema global seja o menos imperfeito possível (BEJAN e ZANE, 2012).

Uma das formas de aplicar a Lei Construtal é através do método Design Construtal, também conhecido como Design com Teoria Construtal (DCT – do inglês: *Design with Constructal Theory*). Este método 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 consiste nos seguintes passos (ROCHA et al., 2017):

- 1) definir o sistema: identificar de forma clara e inequívoca o que constitui o “sistema”, ou seja, a região no espaço ou a quantidade de massa que é objeto de análise;

- 2) identificar os fluxos/escoamentos: certificar de que o sistema tenha liberdade para mudar e entender “o que flui/escoa” dentro dele, ou seja, porque o sistema é um “sistema de fluxo/escoamento”;
- 3) iniciar de forma simples: permitir que apenas um parâmetro do sistema seja alterado no início. Isso confere ao sistema um grau de liberdade. O projetista deve estudar como as mudanças neste parâmetro aumentam o acesso ao fluxo/escoamento das correntes que habitam o sistema e incorporar ao projeto o primeiro parâmetro com o qual o sistema funciona melhor;
- 4) adicionar um grau de liberdade: permitir que um segundo parâmetro seja alterado livremente. Ao investigar esse segundo grau de liberdade, o projetista encontrará outra característica melhor, que deverá ser adotada. Voltar para a etapa 3 e refinar o primeiro parâmetro para trabalhar o segundo;
- 5) adicionar outro grau de liberdade: permitir que um terceiro parâmetro varie livremente. Encontrar a melhor variante desse parâmetro. Voltar e repetir as etapas 3 e 4, ou seja, refinar os dois parâmetros anteriores.
- 6) e assim por diante: este é um processo de construção sem fim, exceto o tempo finito do investigador.

O Design Construtal guia o projetista (no tempo) na direção de arquiteturas do fluxo/escoamento que têm desempenhos globais superiores para condições de acesso especificadas no fluxo/escoamento (fluidos, calor, tensões). Vale ressaltar que, a arquitetura descoberta para cada conjunto de condições gera 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 são livres 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).

A Lei Construtal não é uma declaração de otimização, maximização, minimização ou qualquer outra imagem mental de “design final” ou “destino”. A Lei Construtal trata da direção da evolução no tempo e do fato de que o fenômeno do design não é estático e sim, dinâmico, sempre mutável,

como as imagens de um filme no cinema. A evolução nunca acaba. A direção do tempo é o fenômeno natural, e a lei da física que rege esse fenômeno natural é a Lei Construtal (ROCHA et al., 2017).

O Design Construtal não é um método de otimização matemática. No entanto, quando o sistema possui muitos graus de liberdade, o método Design Construtal pode ser utilizado em associação com algum método de otimização. 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) e Recozimento Simulado (SA – 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, 2014); Gonzales et al. (2015). Essa abordagem possibilita estudar sistemas complexos, ou seja, sistemas com maior número de graus de liberdade (ROCHA et al., 2017).

Existe uma maneira alternativa, apresentada em Bejan (2000), de olhar para o fluxo/escoamento de um volume a um ponto. Em resumo, a sequência Construtal é aquela em que o fluxo/escoamento de um volume a um ponto cresce em um espaço cada vez maior. Esse crescimento ocorre em etapas (montagens, construções). O produto de otimização alcançado na etapa anterior é preservado (memorizado) à medida que se avança para a próxima etapa: a memória é uma característica definidora da sequência Construtal. O Design de cada novo conjunto é tal que permite que o fluxo/escoamento continue sua expansão externa com resistência mínima.

De acordo com Bejan (2000), crescimento, montagem ou agregação surge como um mecanismo de minimização da resistência global. O design otimizado representa o crescimento ótimo quando a geometria otimizada for preservada (memorizada) no nível elementar. Volumes elementares de tamanho fixo e as formas ótimas podem ser usados como blocos de construção (peças de um mosaico) para preencher o volume dado. Crescimento, montagem ou agregação não é um comportamento “natural” dado como certo. Não é aceito empiricamente como auto-organização. Não é casual. Não é uma “propriedade” assumida. Na Teoria Construtal, a agregação é um resultado/consequência do princípio determinístico (Lei Construtal), da facilitação do acesso às correntes internas, sujeito a restrições globais.

No presente trabalho, a Teoria Construtal é aplicada em um problema de impregnação de resina em meio poroso através de canais de injeção. São analisados dois indicadores de performance: o tempo de preenchimento para impregnação da resina em todo o domínio e a quantidade de massa de resina desperdiçada necessária para impregnar todo o domínio. As melhores formas são aquelas que minimizam esses indicadores de performance. Aqui, não é usada uma configuração pré-definida para o canal de injeção, mas sim uma construção através da evolução do design. A evolução dos

canais de injeção se dá a partir de uma construção elementar, utilizando diferentes funções de construção, buscando proporcionar a menor resistência ao escoamento da resina, um menor tempo de preenchimento do molde e uma menor quantidade de massa de resina desperdiçada no processo. Também é necessário entender o problema físico e definir a modelagem computacional para obter a solução do escoamento bifásico resina/ar.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA

No presente estudo, é considerado um escoamento incompressível, laminar e transiente de uma mistura resina/ar em um domínio bidimensional. Além disso, as duas fases são tratadas como imiscíveis. Para a predição desse tipo de escoamento, são resolvidas numericamente as equações de conservação de massa e quantidade de movimento para a mistura resina/ar e uma equação de transporte para a fração volumétrica da resina. As equações de conservação de massa e quantidade de movimento para a mistura de resina/ar são fornecidas por (SCHLICHTING, 1979; CHUNG, 2002):

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\bar{\tau}] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.2)$$

onde ρ é a massa específica da mistura [kg/m^3], t é o tempo [s] e $\vec{v}$ é o vetor de velocidades [m/s], P é a pressão [Pa], $\vec{g}$ é o vetor de aceleração gravitacional [m/s^2], $\vec{F}$ é um vetor de força externa por unidade de volume [N/m^3] e $\bar{\tau}$ é o tensor de cisalhamento no fluido [N/m^2], dado por:

$$\bar{\tau} = \mu(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) \quad (4.3)$$

sendo μ a viscosidade do fluido [$\text{Pa} \cdot \text{s}$].

O efeito do meio poroso é incluído no modelo matemático pela inserção de uma força de campo na equação do balanço da quantidade de movimento, baseada na Lei de Darcy, conforme dado por (RUDD et al., 1997; SCHLICHTING, 1979):

$$\vec{F} = -\frac{\mu}{K} \vec{V} \quad (4.4)$$

onde K é a permeabilidade do meio poroso [m^2].

Para a solução do processo de LRI com o software FLUENT, foi utilizado o método VOF (*Volume of Fluid*). O modelo VOF proposto por Hirt e Nichols (1981), é um modelo multifásico usado para escoamentos de fluidos 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).

Nesta abordagem, uma equação adicional de transporte advectivo, para a fração volumétrica f da resina, é necessária para definir a quantidade de resina em cada célula do domínio computacional. Esta equação de transporte é dada por (Hirt e Nichols, 1981):

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (f\vec{V}) = 0 \quad (4.5)$$

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):

$$\rho = f\rho + (1 - f)\rho \quad (4.6)$$

$$\mu = f\mu + (1 - f)\mu \quad (4.7)$$

4.1 Descrição do Problema

O presente problema consiste na inserção de canais de injeção ao longo de uma placa com meio poroso, simulando um processo de LRI. O escoamento de resina é gerado pela imposição de diferença de pressão entre a entrada da resina (região inferior do canal) e região de saída, conforme pode ser visto na Fig. 4.1. A Figura 4.1 ilustra um domínio que simula $\frac{1}{4}$ de uma placa porosa com entrada de resina pelo centro da placa e com saída pelas linhas superior e inferior da placa. No presente domínio computacional simplificado, a entrada da resina é realizada no canto inferior esquerdo do domínio, a saída ocorre na superfície superior e as linhas lateral esquerda e inferior (exceto a região do canal de injeção) possuem condição de simetria. Na Figura 4.1 o canal de injeção (construção elementar do canal) está representado pela região cinza-claro, enquanto a região porosa é representada com cinza-escuro.

No que diz respeito ao crescimento do canal de injeção, o domínio da placa é dividido em vários pequenos quadrados imaginários onde podem ser montados os elementos de canais de injeção. A Figura 4.1 ilustra um domínio com 5×5 divisões onde os elementos de canais de injeção podem ser posicionados. Estas regiões não possuem relação com a discretização espacial para solução do escoamento com o código de CFD. A construção começa com um canal de injeção elementar ($N = 1$)

colocado na região inferior e à esquerda do domínio da placa (ver região cinza claro na Fig. 4.1). Cada elemento montado no domínio é denominado aqui “Construtal Elementar” (EC – do inglês: *Elemental Constructal*) (VIANNA et al., 2018). As dimensões dos ECs são importantes para a geração da configuração geométrica dos canais de injeção e é chamada aqui de “Resolução do Canal” (CR – do inglês: *Channel Resolution*). O número de ECs montados e o tamanho dos CRs são os graus de liberdade do presente problema. Quanto maior o CR, menor é a área de cada EC, resultando em um maior número de possíveis configurações para montagem do Design final do canal de injeção (VIANNA et al., 2018).

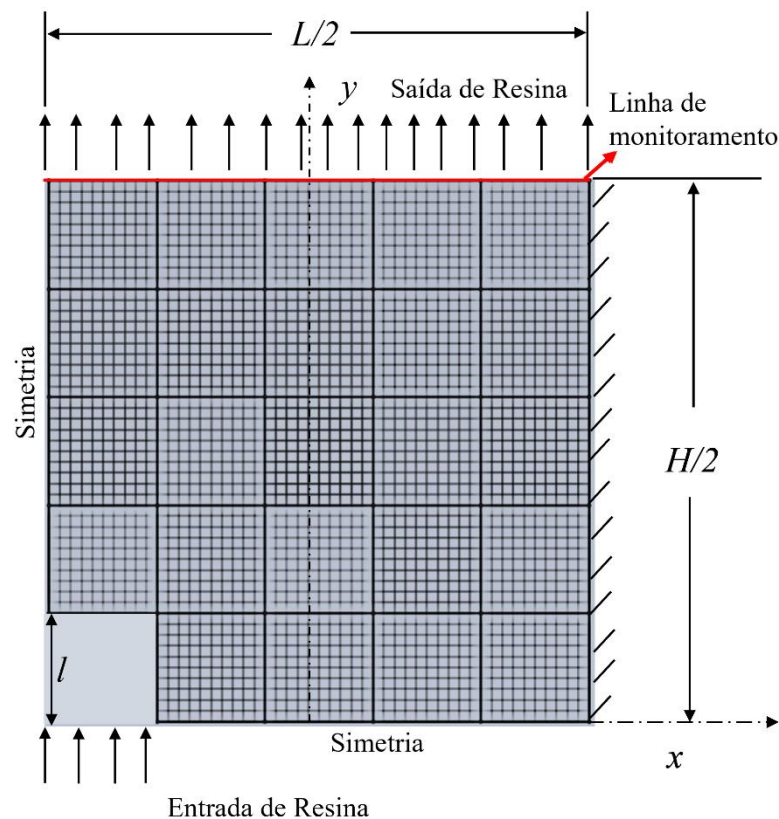


Figura 4.1 – Ilustração do domínio computacional do processo de LRI a ser simulado.

A superfície superior do domínio possui pressão manométrica nula imposta e derivada nula da fração volumétrica na direção do escoamento. Uma pressão de entrada de $P_{in} = 1,0 \times 10^5$ Pa e fração volumétrica igual a 1 são impostas na superfície inferior esquerda do domínio, enquanto a condição de contorno de simetria é adotada nas superfícies restantes. No que diz respeito às propriedades termofísicas 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 $K = 2,0 \times 10^{-11}$ m² e porosidade de $\varepsilon = 0,50$ (TRINDADE et al., 2019).

As dimensões do domínio externo com meio poroso são: $H = L = 0,5$ m, ou seja, a área externa é uma restrição geométrica do problema e considera-se $H/L = 1.0$. Considerou-se a dimensão da entrada da resina como sendo: $L_{in} = 0,1$ m ou $L_{in}/L = 0,2$. Ressalta-se que foi considerada uma condição de simetria do molde e é simulada apenas um quarto do domínio, conforme mostrado na Fig. 4.1.

Para avaliar o regime do escoamento calculou-se o número de Reynolds (Re), expressado como:

$$Re = \frac{\rho v_m L_{in}}{\mu} \quad (4.8)$$

onde v_m é velocidade média da resina na entrada do domínio e L_{in} a dimensão da entrada da resina.

Para obter o tempo de injeção e a massa de resina desperdiçada ao longo do processo LRI, a região de saída possui uma linha de monitoramento (Fig. 4.1) definida pelos seguintes pontos: P_1 ($x_1 = -0,125$ m, $y_1 = 0,25$ m) e P_2 ($x_2 = 0,125$ m, $y_2 = 0,25$ m). 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. A massa de resina desperdiçada (resina que sai do molde antes do processo LRI estar concluído) é calculada como

$$m = \int \dot{m} \cdot dt \quad (4.9)$$

onde $\dot{m}$ é a vazão instantânea da resina, dada por (ANSYS, 2013):

$$\dot{m} = \int \rho V_n \cdot dA \quad (4.10)$$

onde ρ é a massa específica da resina [kg/m^3], V_n é a componente da velocidade normal à secção de área transversal ao escoamento [m/s] e A é a secção de área transversal ao escoamento [m^2]. Analisa-se também a qualidade do preenchimento do molde, pois em alguns casos pode ocorrer a formação de vazios permanentes na placa, o que inviabiliza o processo.

No presente trabalho, foram realizadas as seguintes investigações:

Estudo de Caso 1 – Influência das condições de contorno no crescimento dos canais de injeção construídos, bem como, nos indicadores de performance do sistema. As condições de contorno analisadas foram: 1) as superfícies direita e superior com pressão manométrica nula prescrita, Fig. 4.2(a), 2) a superfície superior tem uma pressão manométrica nula prescrita e nas superfícies laterais é imposta a condição de não-deslizamento e impermeabilidade ($u = v = df/dy = 0$ m/s), Fig. 4.2(b).

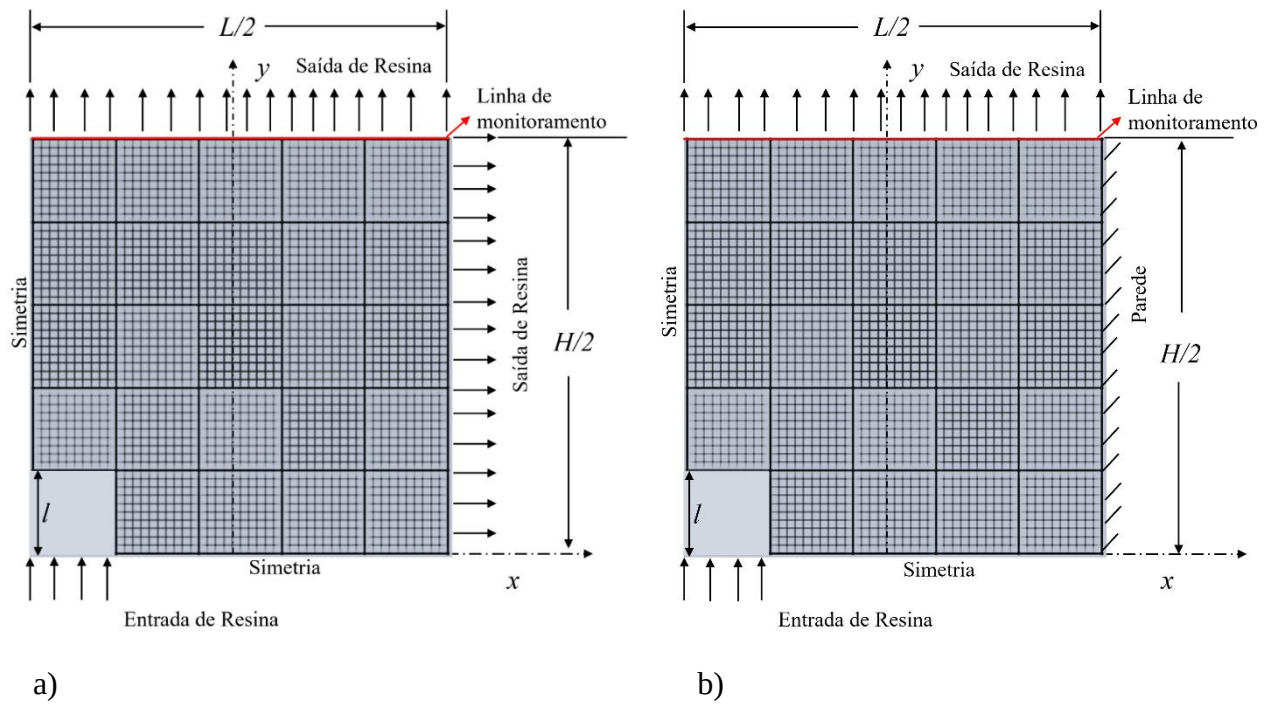


Figura 4.2 – Ilustração do domínio computacional para: a) molde sem paredes, b) molde com paredes laterais.

Estudo de Caso 2 – Influência da Resolução do Canal (CR) sobre os indicadores de performance e sobre o design gerado no domínio analisado. Aqui, é considerado o mesmo número de posições possíveis nas direções x e y para montagem de novos ECs e duas magnitudes diferentes de CR, sendo $CR = 5$, Fig. 4.1 e um domínio com 10×10 divisões onde os elementos de canais de injeção podem ser posicionados, ou seja, $CR = 10$, Fig. 4.3.

Estudo de Caso 3 – Comparação entre a montagem de novos elementos (ECs) em posições adjacentes aos canais de injeção com maior ou menor resistência (R_{maior} ou R_{menor}) ao escoamento de resina.

A resistência ao escoamento é definida como a razão entre o gradiente de pressão (diferença de potencial) de dois ECs adjacentes (nas direções horizontal ou vertical) e a vazão mássica da resina, conforme dado por (ERRERA e BEJAN, 1998):

$$R = \frac{\Delta P}{\rho V l W} \quad (4.11)$$

onde ΔP é o gradiente de pressão entre duas regiões ECs adjacentes [Pa], V é a velocidade no centro das regiões onde um novo EC pode ser montado [m/s], l é o tamanho do EC cruzado pela resina [m] e W é a dimensão no plano z , que no presente trabalho é tratada como unitária já que o domínio é bidimensional.

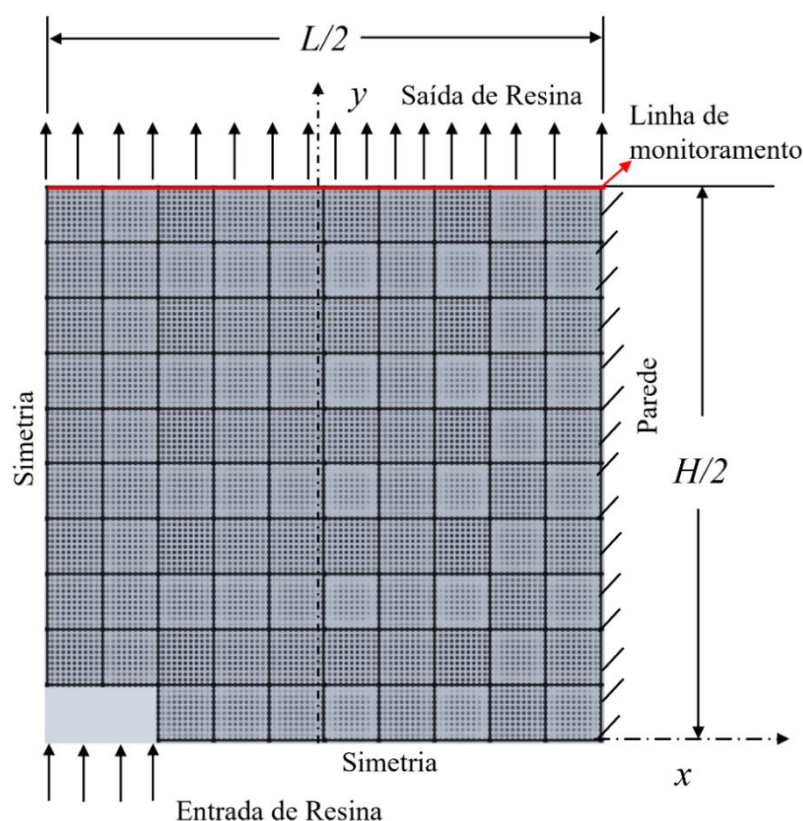


Figura 4.3 – Ilustração do domínio computacional com $CR = 10$.

Estudo de Caso 4 – Construção dos canais de injeção aplicando a Teoria Construtal utilizando como função de construção, para montagem dos novos ECs nos vizinhos, o menor tempo de infusão da resina em todo o domínio, investigando todas as possibilidades de vizinhos a algum EC com canal de injeção. Neste caso foi realizada uma comparação, considerando o efeito da evolução do design dos ECs sobre os indicadores de performance, para $CR = 5$ e 10 , entre a técnica construtiva com FC baseada na resistência ao escoamento de resina (FC: R) e a FC baseada na minimização do tempo de infusão (FC: t).

Estudo de Caso 5 – Construção dos canais de injeção aplicando a Teoria Construtal utilizando como FC a minimização da quantidade de massa desperdiçada (FC: m) no processo LRI. Comparou-se o desempenho das técnicas construtivas FC: R , FC: t e FC: m sobre os indicadores de performance e sobre a configuração geométrica dos canais de injeção, para $CR = 5$ e 10 .

Estudo de Caso 6 – Avaliação do efeito da razão geométrica H/L sobre os indicadores de performance e o design gerado para os canais de injeção, utilizando a metodologia com FC baseada na minimização do tempo de infusão. Estudou-se as razões geométricas $H/L = 1,0$, Fig. 4.1, $H/L = 0,5$, Fig. 4.4 (a) e $H/L = 2,0$, Fig. 4.4 (b).

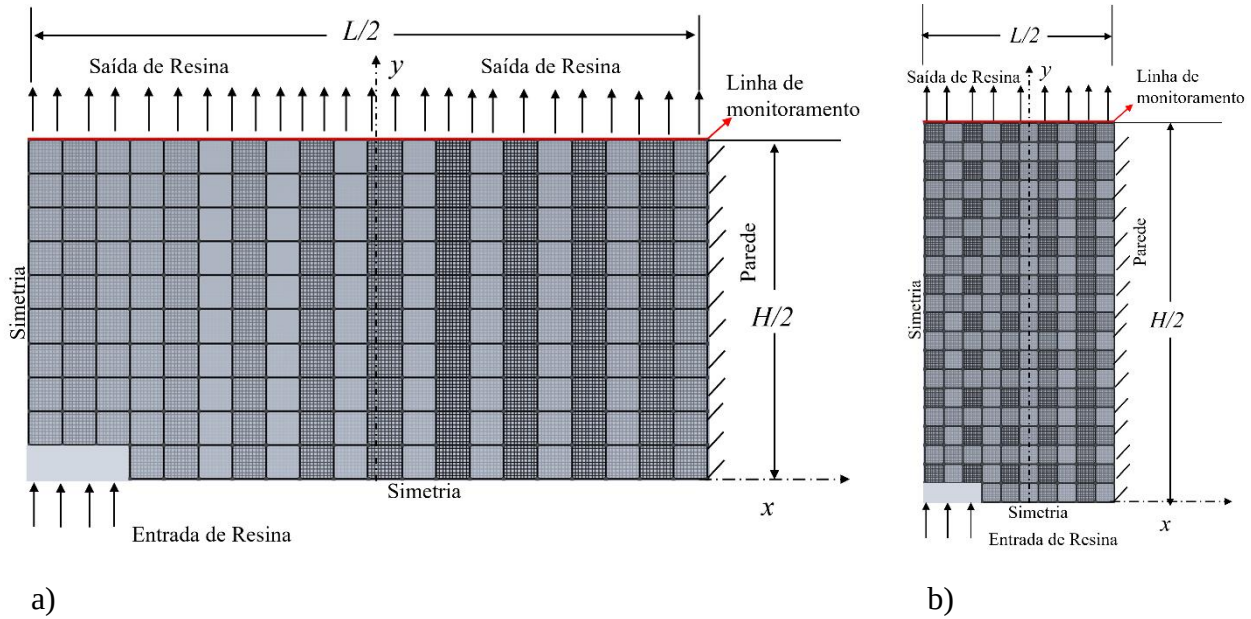


Figura 4.4 – Ilustração do domínio computacional para: a) $H/L = 0,5$, b) $H/L = 2,0$.

O problema em análise é submetido a duas restrições, a área total do domínio:

$$A = HL \quad (4.12)$$

e a ocupação de área pelos canais de injeção, dada pela variável ϕ (razão entre a área do canal e área da placa), que é dada como:

$$\phi = \frac{A_0}{A} \quad (4.13)$$

onde A é a área total da placa porosa [m^2], H é a altura da placa porosa [m], L é o comprimento da placa porosa [m], A_0 é a área do canal de injeção [m^2], dada por:

$$A_0 = l^2 N \quad (4.14)$$

onde N é número de ECs que constituem os canais de injeção.

Ressalta-se que para todos os casos estudados a área total do molde foi mantida constante e as Figs ilustrativas dos domínios analisados não estão em escala.

4.2 Construção dos canais de injeção com a Teoria Construtal

Com a definição da geometria e compreensão do método para solução do problema físico, é possível prever os indicadores de performance para cada configuração estudada. Realiza-se uma avaliação geométrica, buscando entender o efeito dos graus de liberdade sobre os indicadores de performance.

A metodologia proposta para a técnica de construção do canal de injeção com FC baseada na resistência ao escoamento da resina, pode ser vista esquematicamente na Fig. 4.5, para o domínio com $CR = 5$. Após a definição do primeiro caso com o canal de injeção elementar (primeiro EC), Fig. 4.5 (a), é realizada a simulação numérica para encontrar os campos de pressão e velocidade, bem como, os indicadores de performance. Em seguida, a resistência ao escoamento da resina é calculada nos possíveis ECs adjacentes, Fig. 4.5 (b). A região com a resistência mais baixa (no caso com montagem em regiões de menor resistência) é escolhida para ser a posição onde um novo EC de canal de injeção é montado. Em seguida, a região com menor resistência ao escoamento é alterada de um elemento do meio poroso para um elemento de canal de injeção, Fig. 4.5 (c), levando ao primeiro crescimento do canal de injeção. Posteriormente, o novo domínio é definido, uma nova simulação é realizada e o campo fluidodinâmico é calculado. A partir deste campo, a resistência ao escoamento é calculada para a nova configuração, Fig. 4.5 (d), e outra posição para inserção de um novo EC ao canal de injeção é definida, Fig. 4.5 (e), representando uma segunda etapa de crescimento do canal de injeção. Este procedimento é repetido, Fig. 4.5 (f), até que o canal de injeção atinja uma área de ocupação máxima (ϕ_{max}). Aqui, o processo de evolução pode ser interrompido quando inserção do novo EC ao canal de injeção leva a formações de vazios permanentes na placa. Além disso, no presente trabalho, apenas um elemento é montado por etapa de crescimento. Para cada etapa de crescimento, os indicadores de performance (tempo de preenchimento e massa de resina desperdiçada) são calculados para investigar como se configura o crescimento do canal de injeção e como isso afeta o desempenho do problema.

A metodologia de construção proposta pode ser resumida com o seguinte algoritmo:

- 1) definir a geometria e as condições de contorno;
- 2) definir a posição do primeiro EC com canal de injeção;
- 3) resolver numericamente o problema fluidodinâmico e calcular os indicadores de performance;
- 4) calcular a resistência ao escoamento nos possíveis ECs adjacentes ao canal de injeção existente;
- 5) substituir o EC, com menor resistência ao escoamento (para o caso de minimização da resistência ao escoamento da resina), por um canal de injeção;
- 6) definir um novo domínio computacional com o novo canal de injeção;
- 7) retornar ao passo 3 e repetir o laço até que o canal de injeção atinja um limite de área (ϕ_{max}) ou leve à geração de vazios permanentes.

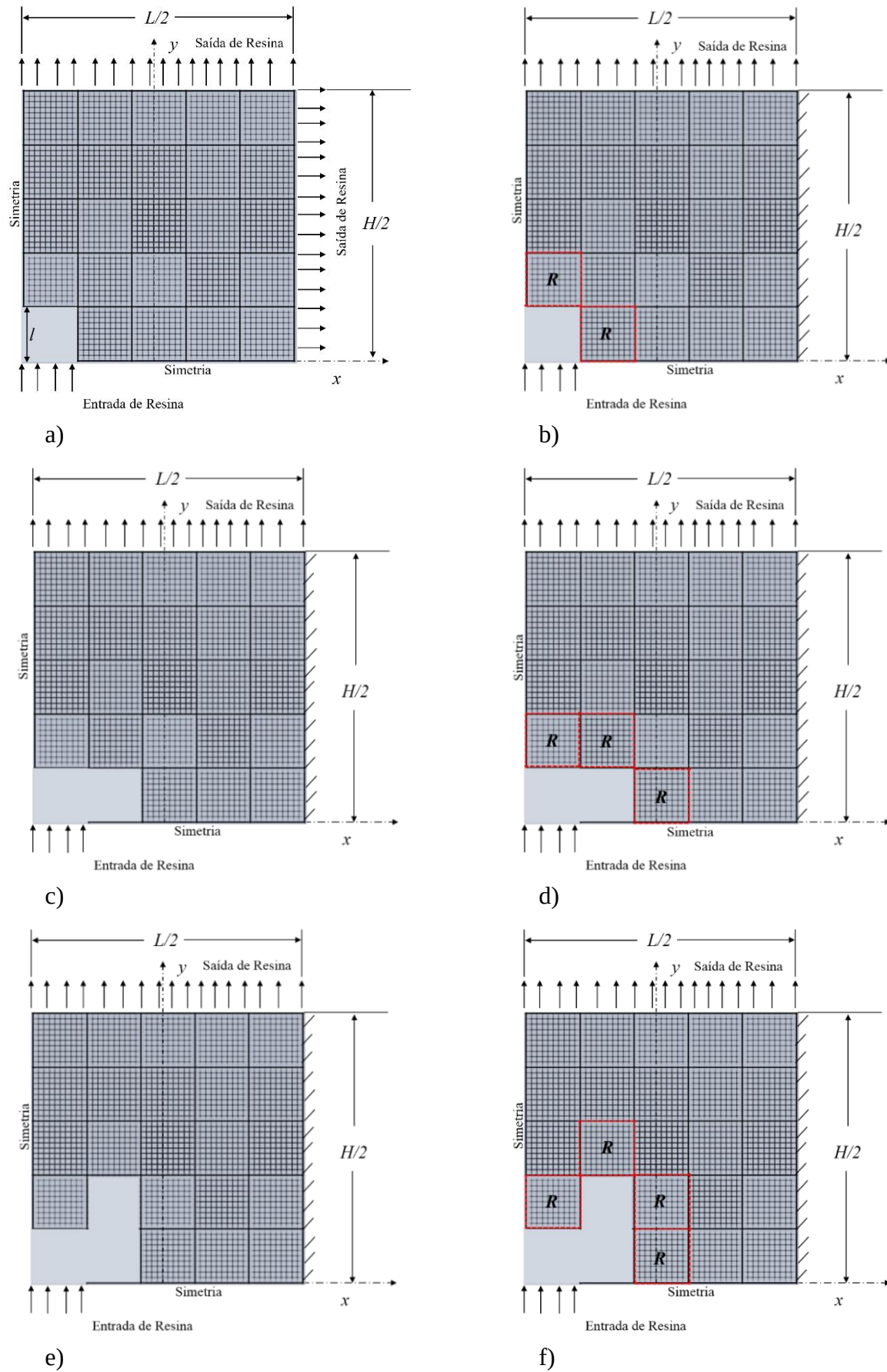


Figura 4.5 – Ilustração da técnica de construção com FC: R .

A fim de analisar a influência da resolução dos ECs na construção dos canais de injeção sobre o desempenho fluidodinâmico do problema, dois valores diferentes de CR são investigados (CR = 5 e 10). A construção dos canais de injeção está restrita a uma área de ocupação máxima de $\phi_{max} = 0,2$. Apesar deste valor ser muito alto para aplicações industriais, aqui trata-se de um problema teórico, onde o intuito é demonstrar a metodologia desenvolvida, limitada pela resolução (CR). Além disso, a parte superior da placa porosa também fica restrita à ocupação de canais de injeção para evitar grandes desperdícios de resina. Mais precisamente, os ECs adjacentes ao limite superior (saída) do molde não são considerados para a ocupação do canal de injeção. A cada etapa de crescimento, a área do canal aumenta na razão 1/25 e 1/100 de sua magnitude para CR = 5 e 10, respectivamente, em relação ao primeiro caso de construção elementar (visto que é considerada uma condição de simetria do molde e é simulada apenas um quarto do domínio). Para os casos de CR= 5 e 10, são necessárias 5 e 20 etapas para construção do canal de injeção da resina considerando a área de ocupação máxima estabelecida.

Outra técnica explorada para construção do canal de injeção é a aplicação da Teoria Construtal em associação com FC baseada nos próprios indicadores de performance. Este método testa todas as possíveis configurações dentro do espaço de busca delimitado para o problema. O espaço de busca foi determinado considerando a área de ocupação máxima do canal de injeção de $\phi_{max} = 0,2$ e de maneira análoga a metodologia de FC considerando a resistência ao escoamento, foi definido também um limite superior para restringir a ocupação do canal de injeção na placa porosa, ou seja, os ECs que são adjacentes à região superior da placa não foram considerados para efeito de ocupação do canal de injeção.

A metodologia proposta para a construção do canal de injeção aplicando a Teoria Construtal com FC baseada na minimização do tempo de infusão está ilustrada esquematicamente na Fig. 4.6. O processo de otimização inicia-se com a configuração elementar, Fig. 4.6 (a), em seguida define-se novos domínios, onde cada região adjacente ao EC elementar é incorporada ao canal de injeção, ou seja, é considerada sem meio poroso. A Figura 4.6 (b) ilustra as possibilidades para definição dos domínios a serem simulados. Posteriormente, são realizadas as simulações numéricas para encontrar os campos fluidodinâmicos, bem como, os indicadores de performance, Fig. 4.6 (c), para todas as possibilidades de montagem do novo EC de canal de injeção. Nesta primeira etapa, são duas as possibilidades (ECs delimitado pelas cores amarelo e vermelho). A configuração que levar ao menor valor para o tempo de infusão da resina no molde (t_m) é considerada como a configuração ótima para cada etapa, definindo a posição onde o novo canal de injeção será montado, Fig. 4.6 (d). Este procedimento é repetido, Figs. 4.6 (e) - (f), até que o canal de injeção atinja uma área de ocupação máxima (ϕ_{max}) ou até que ocorra uma limitação na liberdade do problema imposta pelo limite superior

de avanço do canal de injeção ou por formações de vazios permanentes na placa. Nestes dois últimos casos é feita uma reavaliação geométrica para a otimização. É importante destacar que a cada nova etapa, o número de configurações aumenta, aumentando assim o número de simulações necessárias para determinar a configuração ótima do canal de injeção, ou seja, a posição onde o canal irá evoluir (crescer). Como exemplo, observa-se na Fig. 4.6 (e) (segunda construção) que são três as possibilidades de crescimento do canal de injeção: ECs amarelo, verde e vermelho.

O algoritmo proposto para a aplicação da FC baseada na minimização do tempo de infusão pode ser resumido como:

- 1) definir a geometria e as condições de contorno;
- 2) definir a posição do primeiro EC com canal de injeção;
- 3) definir domínios provisórios alterando cada EC adjacente ao canal de injeção existente, de meio poroso para um elemento de canal de injeção;
- 4) resolver numericamente e encontrar a solução fluidodinâmica do problema, para todas as configurações provisórias, bem como, os indicadores de performance;
- 5) identificar a configuração que conduz ao menor tempo de infusão de resina (t_m);
- 6) construir o próximo elemento de canal de injeção na posição do EC identificado no passo 5;
- 7) definir novo domínio com o novo canal de injeção;
- 8) retornar ao passo 3 e repetir o laço até que o canal de injeção atinja um limite de área (ϕ_{max}).

De maneira análoga, aplicou-se também a FC baseada na minimização da quantidade de massa de resina desperdiçada no processo LRI.

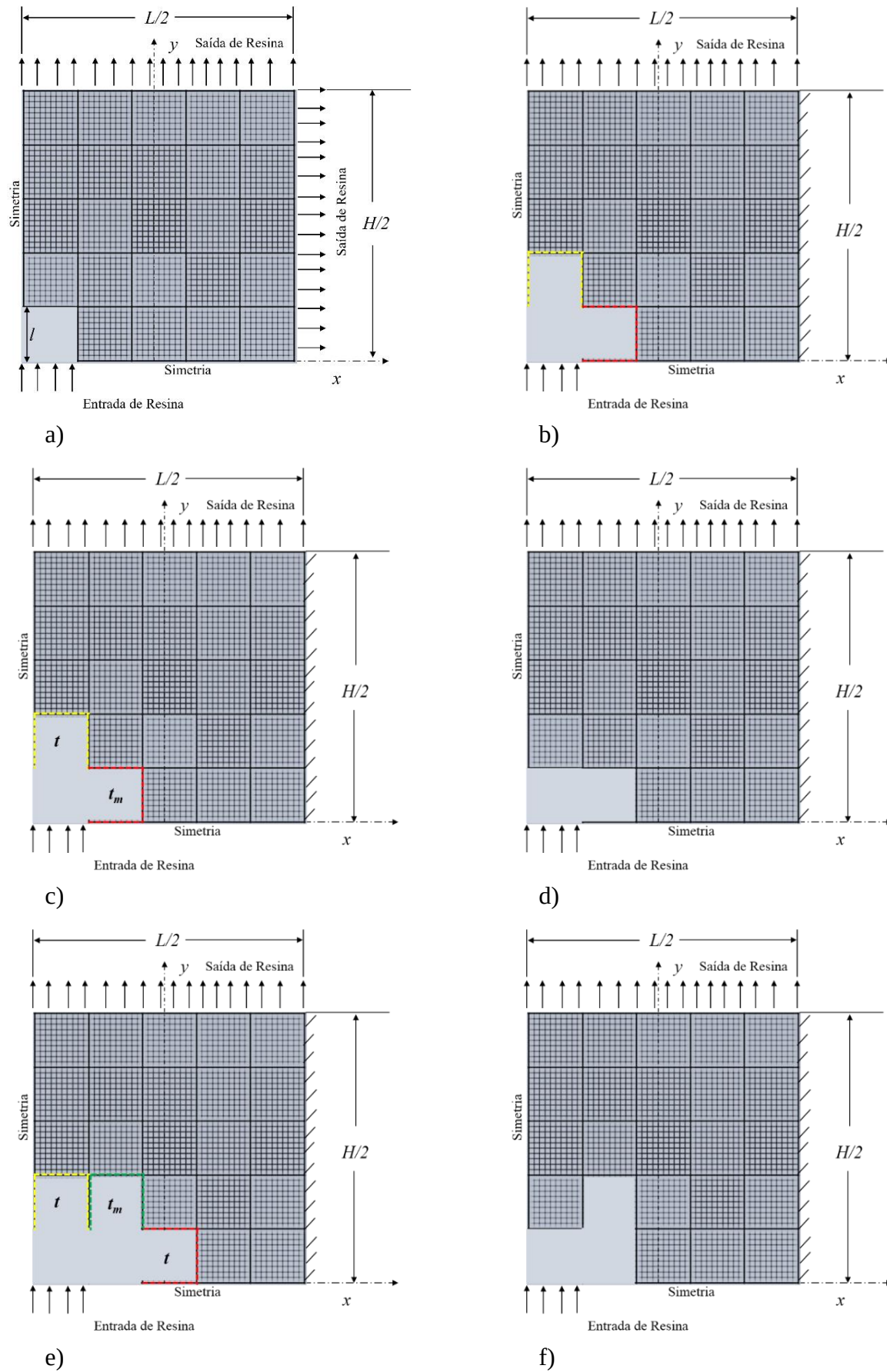


Figura 4.6 – Ilustração da técnica de construção com FC: t .

5 MODELAGEM NUMÉRICA

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. Basicamente, o usuário de CFD está interessado em obter as distribuições de velocidades e pressões na região do escoamento. Com esses dados, é possível otimizar projetos de engenharia, reduzindo substancialmente o tempo e os custos operacionais melhorando o desempenho do item desejado. Além disso, os códigos de CFD permitem estudar sistemas onde análises experimentais são complexas ou impossíveis e com um nível praticamente ilimitado de detalhamento de resultados (FORTUNA, 2000; VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

O uso de métodos numéricos de forma alguma implica que a mecânica dos fluidos experimental e as análises teóricas estejam sendo postas de lado. É muito comum as três técnicas se complementarem durante um projeto que envolva escoamento de fluidos e no estudo de modelos teóricos para algum fenômeno particular. No primeiro caso, podem-se utilizar os resultados de simulações numéricas para orientar o projetista na escolha dos experimentos a serem realizados. Já no segundo caso, as equações de novos modelos teóricos para problemas de mecânica dos fluidos são resolvidas numericamente, e os resultados comparados com experimentos, confirmando ou não a validade desses novos modelos. Por fim, pode-se avaliar a precisão do modelo numérico adotado, comparando-se seus resultados com experimentos, ou com valores assintóticos previstos pela teoria da mecânica dos fluidos (FORTUNA, 2000).

Mesmo que os resultados fornecidos pela técnica computacional sejam limitados pelos parâmetros utilizados na simulação, o usuário tem grande facilidade para alterar parâmetros como geometria, temperatura e velocidade, já que esses são apenas “dados de entrada” para o simulador (FORTUNA, 2000). 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, 2007).

No contexto dos pacotes comerciais, o Método dos Volumes Finitos (MVF) tem sido a metodologia mais empregada para a construção dos códigos CFD disponíveis, principalmente naqueles com maior penetração industrial. A preferência é em função da robustez, devido às características conservativas do MVF. Em escoamentos de fluidos, é muito importante satisfazer os princípios de conservação em nível discreto, característica do MVF, pois o que se busca com um

método numérico é a solução da equação diferencial, que é a representação da conservação da propriedade em nível de volume. Dessa forma, não há a possibilidade da existência de gerações/sumidouros de quantidades, como massa, quantidade de movimento e energia, no interior do domínio de cálculo. Por outro lado, se a conservação das propriedades é satisfeita apenas via condições de contorno, podem existir gerações/sumidouros das propriedades de origem numérica dentro do domínio, o que modificará o perfil da solução na região (MALISKA, 2004).

Entre os softwares comerciais que utilizam o MVF, é possível citar o código comercial FLUENT empregado neste estudo. Nesse sentido, as simulações numéricas do processo de infusão são realizadas através de dois softwares. O GMSH 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 Noções do 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. O fluxo de uma determinada grandeza, como massa ou energia, é a quantidade dessa grandeza que atravessa a área de uma fronteira, por unidade de tempo. A quantidade líquida desta grandeza que atravessa as fronteiras do 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 (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 que representam os fenômenos físicos, é necessário primeiro realizar um balanço em um volume finito, 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 e explícitos (MALISKA, 2004). Os esquemas implícitos são incondicionalmente estáveis e permitem um maior passo de tempo em relação aos demais. Por outro lado, os esquemas explícitos apresentam fortes restrições de estabilidade numérica, limitando o passo de tempo a ser adotado (DOS SANTOS, 2011; GRESHO e SANI, 1999).

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 empregado é variável, alterando automaticamente, no intervalo de $\Delta t = 1,0 \times 10^{-3}$ s a $\Delta t = 1,0$ s.

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 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. 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.

É importante destacar que a existência de coeficientes negativos não significa a impossibilidade total de obter a solução. O uso de métodos robustos para resolver o sistema linear e a forma de avançar a solução permitem a obtenção da solução, mesmo com coeficientes negativos. 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 (MALISKA, 2004; PATANKAR, 1980).

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 ausentes de oscilações numéricas

e a outra é a simplicidade de sua aplicação em programas de CFD (DOS SANTOS, 2011; MALISKA, 2004; VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

5.1.3 Acoplamento Pressão-Velocidade

Para o MVF, métodos de acoplamento pressão-velocidade têm sido empregados para o tratamento dos escoamentos incompressíveis. Existem, atualmente, diversos métodos para tratar desse acoplamento. O objetivo de todos eles é determinar um campo de pressões que, quando inserido nas equações do movimento, origine um campo de velocidades que satisfaça a equação da conservação da massa (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 (do inglês: *Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) (PATANKAR, 1980; VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

Praticamente em todos os métodos para tratamento do acoplamento pressão-velocidade, a sequência de cálculo envolve dois passos distintos: no primeiro, as velocidades são corrigidas de maneira a satisfazer a equação da conservação massa; no segundo, as pressões são avançadas para completar o ciclo iterativo. No presente estudo, é empregado o algoritmo de acoplamento pressão-velocidade PISO. 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 com um passo a mais de correção das variáveis (MALISKA, 2004; VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

5.2 Procedimentos Numéricos

Para a simulação numérica das Eqs. (4.1) - (4.5) utiliza-se o Método dos Volumes Finitos (MVF) (PATANKAR, 1980; VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007). Mais precisamente, emprega-se o código comercial FLUENT, versão 14 (ANSYS, 2013). Em todas as simulações utiliza-se o esquema de discretização *upwind* de primeira ordem para o tratamento dos termos advectivos. Para interpolação dos termos difusivos utiliza-se o método de Mínimos Quadrados. Para a interpolação da pressão é 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 é realizado com o método PISO, enquanto o método de Geo-

Reconstruction é empregado para a reconstrução da interface entre os dois fluidos. O esquema de interpolação de reconstrução geométrica (*Geo-Reconstruction*) do FLUENT torna-se disponível na interface quando o modelo VOF é utilizado. Esse método é normalmente utilizado quando se tem interesse no comportamento transiente com precisão de tempo da solução VOF (ANSYS, 2013).

As simulações são realizadas utilizando um computador com processador Intel(R) Core(TM) i7-5930K CPU @ 3.50GHz e 16 GB de memória RAM. As simulações são consideradas convergentes quando os resíduos são menores que $R < 10^{-6}$. Para a discretização temporal, o passo de tempo empregado é variável no intervalo de $\Delta t = 1,0 \times 10^{-3}$ s a $\Delta t = 1,0$ s. O passo de tempo variável é baseado no número máximo de Courant próximo à interface VOF. Neste caso, é utilizado o número máximo de Courant igual a 2,0. No que diz respeito à discretização espacial, o domínio é dividido em vários volumes finitos quadrados e foi feito um teste de independência de malha para definir o número de volumes usados em todas as simulações. 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 espacial, foi realizado um estudo de independência de malha. A malha criada é regular, com volumes quadrados, e cada EC é discretizado, com $n_R \times n_R$ volumes finitos, onde n_R é a divisão de um EC em volumes finitos quadrados. A Tabela 5.1 mostra o número de divisões em cada EC (n_R), o número de volumes para a discretização de todo o domínio, o tempo de injeção para o preenchimento do molde e a diferença entre duas soluções (discretizações) sucessivas. O problema resolvido para analisar a independência de malha foi o caso com CR = 10 e apenas um EC com canal de injeção ($N = 1$). A solução é considerada independente de malha quando a diferença relativa entre o tempo de infusão obtido com duas malhas sucessivas obedece a um critério de refinamento de malha, que é dado por:

$$Diferença\ Relativa = \frac{100(t^j - t^{j+1})}{t^j} < 0,5\% \quad (5.1)$$

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 0,5%. Além do critério descrito na Eq. (5.1) analisou-se a qualidade do preenchimento do molde. Para os casos com $n_R < 8$ percebeu-se a formação de vazios permanentes levando à desconsideração destes casos, uma vez que a geração de vazios é um problema crítico no

processo de LRI. Neste sentido, é empregada uma malha com 2.500 volumes finitos retangulares como malha independente.

Tabela 5.1 - Teste de independência de malha para o caso com paredes nas superfícies laterais e $N = 1$.

n_R	Número de volumes	Tempo de Injeção (s)	Diferença (%)
2	100	895,78	1,23
4	400	884,78	0,23
6	900	882,78	0,14
8	1.600	881,55	0,18
10	2.500	883,19	0,03
12	3.600	883,45	-----

A modelagem computacional do processo de infusão, realizada com o software FLUENT foi verificada 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 Rudd et al. (1997). Essa comparação é possível através de casos onde o escoamento da resina no interior do molde acontece com comportamentos retilíneos. Para obtenção do escoamento retilíneo da resina, os ECs foram montados de maneira que a largura do canal é igual à largura do domínio simulado ($L/2$), com $\phi = 0,2$, $CR = 5$ e $N = 5$.

Uma solução analítica para a posição da linha de frente da resina em função do tempo é dada por (RUDD et al., 1997):

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

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 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, conforme ilustra a Fig. 5.1, que se sobrepõe ao eixo y . A linha foi definida pelos seguintes pontos: P_1 ($x_1 = 0,125$ m, $y_1 = 0,05$ m) e P_2 ($x_2 = 0,125$ m, $y_2 = 0,25$ 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 de injeção 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 2,87%, apresentando assim uma excelente concordância. Com isso verifica-se o modelo numérico adotado aqui. Ressalta-se que o presente modelo computacional também foi verificado em trabalhos anteriores (MAGALHÃES et al., 2016, 2020).

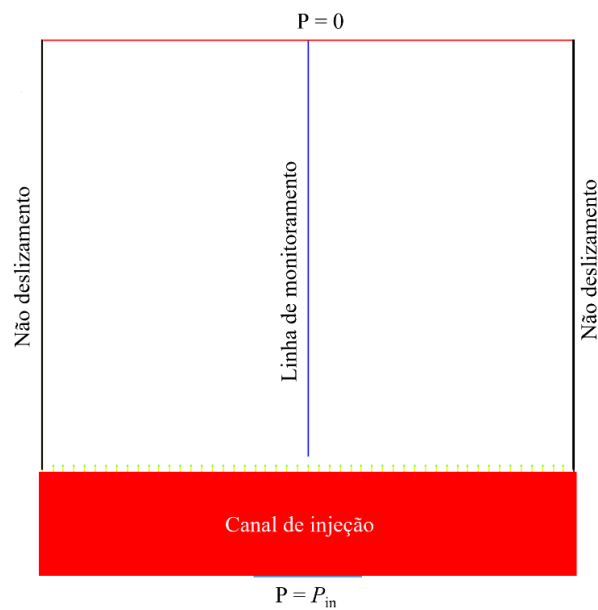


Figura 5.1 – Ilustração da linha de monitoramento.

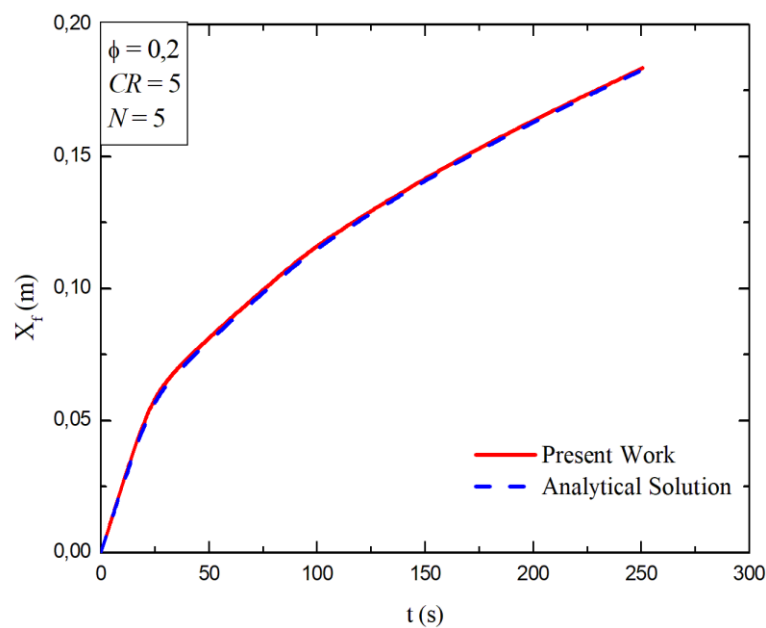


Figura 5.2 – Comparação entre a posição da linha de frente da resina em função do tempo obtida no presente trabalho e a solução analítica.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados dos casos estudados no presente trabalho.

6.1 Investigação da influência das condições de contorno no crescimento do canal e nos indicadores de performance

Foi investigada a influência de duas diferentes condições de contorno sob a forma dos canais de injeção construídos, bem como, sob os indicadores de performance do sistema (tempo de preenchimento de resina para impregnação em todo o domínio poroso e a massa de resina que é desperdiçada no processo de infusão de resina). Para o presente estudo, a placa foi dividida em 100 regiões quadradas, sendo quatro delas ocupadas inicialmente com o canal de injeção, conforme ilustradas na Fig. 6.1.

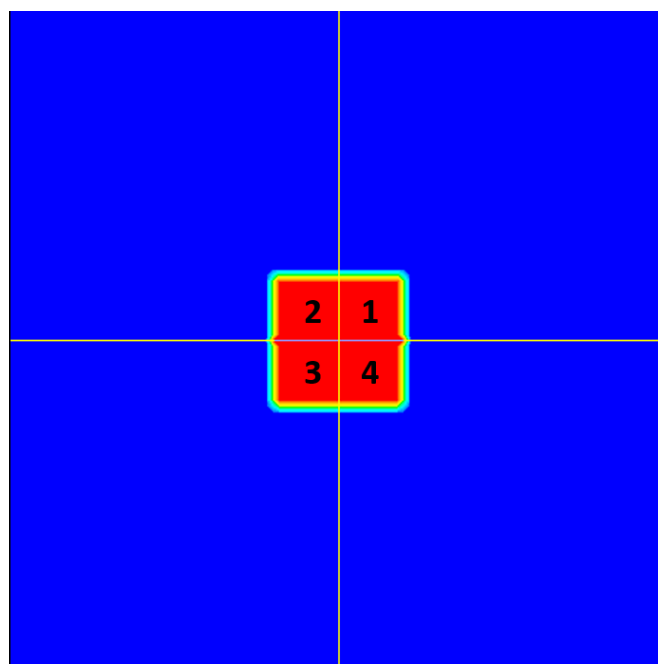


Figura 6.1 – Ilustração da construção inicial dos ECs.

Cada novo EC pode ser montado em pontos adjacentes ao canal de injeção com menor resistência ao escoamento, até uma fração de área máxima de $\phi_{max} = 0,20$. Portanto, a cada etapa de crescimento, a área do canal aumenta 1/25 de sua magnitude em comparação com o primeiro caso de construção elementar (visto que é considerada uma condição de simetria do molde e é simulada apenas um quarto do domínio), sendo considerada então a Resolução do Canal (CR) igual à 5. Aqui,

são montados cinco elementos com canais de injeção ao longo do domínio simulado, considerando a fração de área máxima.

A Figura 6.2 mostra as configurações da geometria em cada etapa de crescimento do canal de injeção, uma vez que o aspecto mais importante neste trabalho é a construção do canal de injeção a partir de vários ECs. Os resultados indicaram que as quatro primeiras etapas levaram às mesmas configurações geométricas, com uma espécie de retângulo para $N = 1, 2$ e 4 e o canal em forma de H para $N = 3$ e 5. Para a última etapa, pode-se observar o crescimento de novos ramos do canal em forma de H para o caso do molde sem paredes laterais, Fig. 6.2 (a) e a formação de uma configuração em I para o caso do molde com paredes nas superfícies laterais, 6.2 (b).

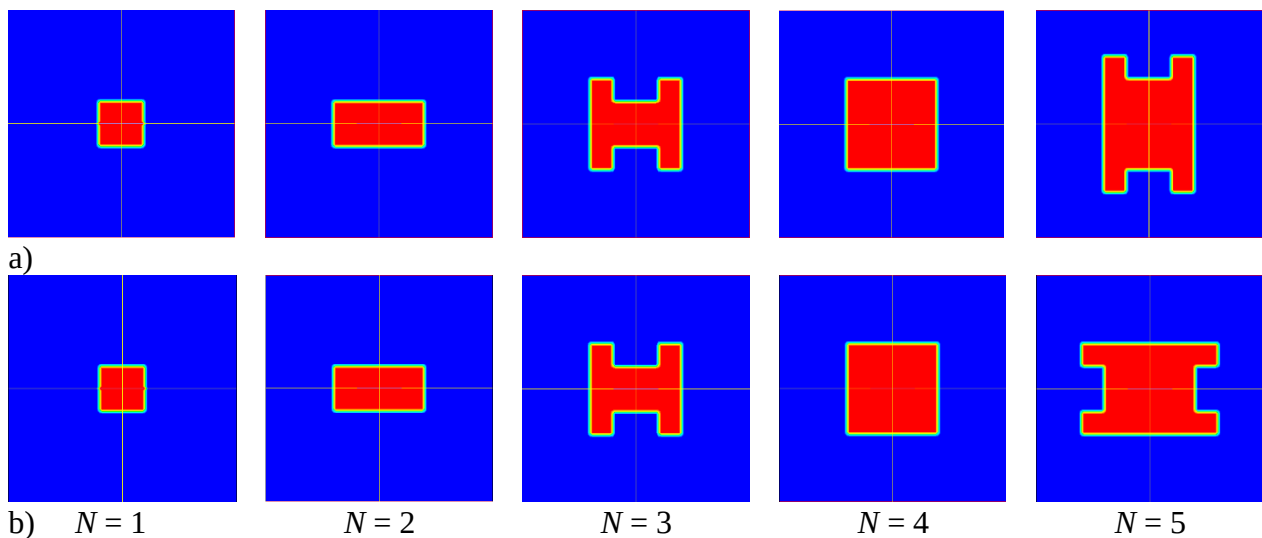


Figura 6.2 – Esquema da montagem dos ECs para os dois casos estudados: a) molde sem paredes, b) molde com paredes nas superfícies laterais.

As Figuras 6.3 e 6.4 ilustram o efeito do número de canais de injeção inseridos sobre o tempo (t) de preenchimento para impregnação da resina no domínio poroso e a quantidade de massa (m) de resina desperdiçada no processo. É considerado desde a construção elementar ($N = 1$) até o número máximo de ECs ($N = 5$) limitado pela fração de área máxima ϕ_{max} . A Figura 6.3 mostra a investigação para o caso com pressão atmosférica na superfície lateral e a Fig. 6.4 apresenta os resultados para o caso com condição de contorno de não-deslizamento e impermeabilidade na superfície lateral. Nos resultados obtidos, é possível notar que no caso do molde sem paredes nas bordas, os valores de t e m são consideravelmente maiores do que no molde com paredes nas superfícies laterais. Para ambos os casos, pode-se notar que o maior número de ECs ($N = 5$), que formam os canais de injeção, leva ao melhor desempenho, independentemente do indicador de performance investigado (t ou m).

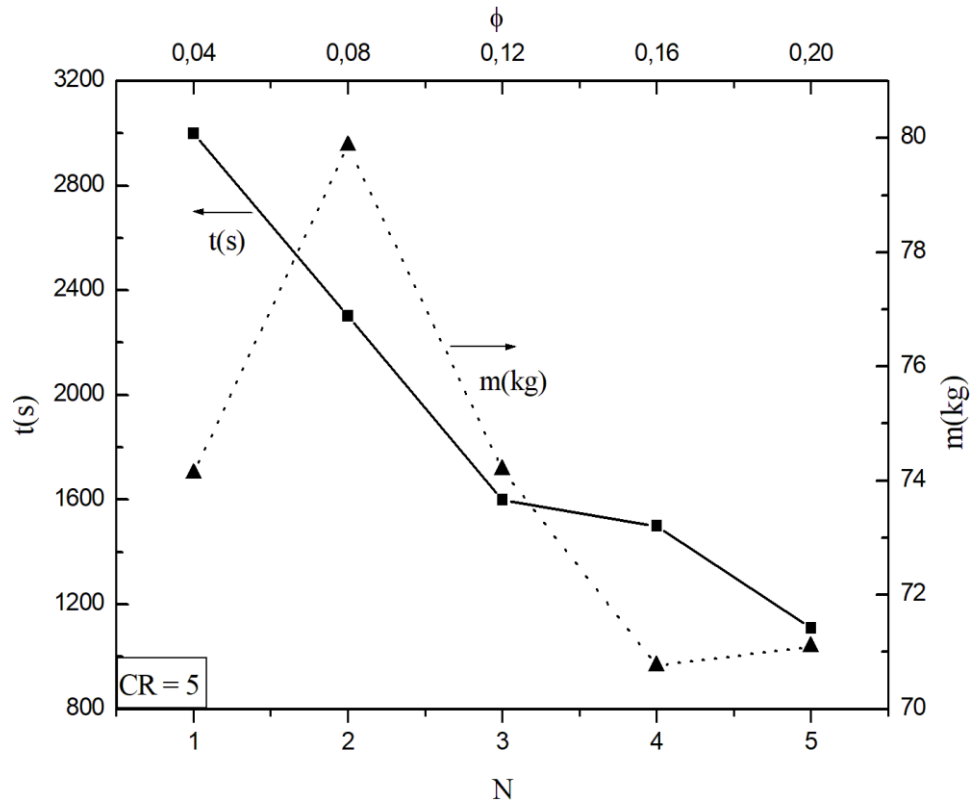


Figura 6.3 – Efeito do número de ECs e da razão ϕ sobre o tempo (t) de infusão e desperdício de massa (m) para o molde sem paredes laterais.

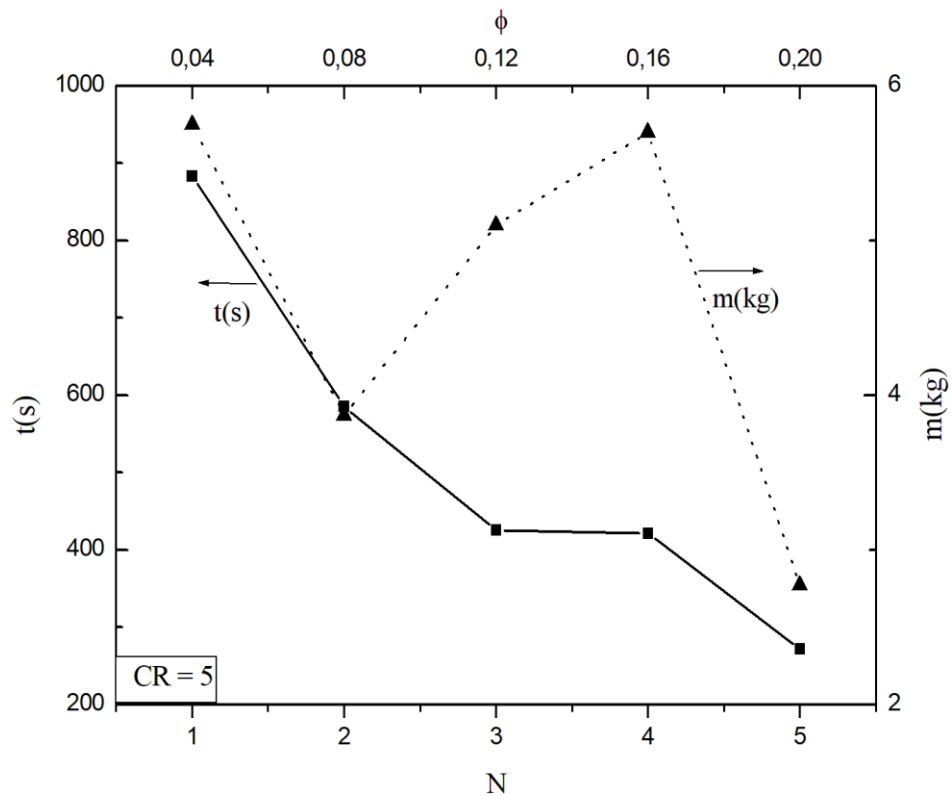


Figura 6.4 – Efeito do número de ECs e da razão ϕ sobre o tempo (t) de infusão e desperdício de massa (m) para o molde com paredes nas superfícies laterais.

No que diz respeito ao efeito do número de ECs (ou magnitude de ϕ) sobre os indicadores de performance, apesar das diferentes magnitudes, as diferentes condições de contorno não afetaram o comportamento do tempo (t) de preenchimento do molde. Por outro lado, o efeito de N ou ϕ sobre m muda para diferentes condições de contorno impostas, o que é esperado uma vez que a influência da vizinhança no sistema de escoamento também é diferente. Na Figura 6.3, para o caso sem paredes laterais, nota-se um aumento de m na primeira etapa seguido de uma diminuição de m de $N = 2$ até $N = 4$, e uma estabilização de m para $N = 5$. Para a configuração mais elementar, também é notado um ponto de ótimo local. Para o caso da Fig. 6.4, placa porosa com paredes laterais, o padrão de m em função de N muda e a segunda construção ($N = 2$) tornou-se o ótimo local. Além disso, uma forte diminuição é observada em m entre $N = 4$ e $N = 5$, ao contrário do que é observado para a outra condição de contorno. Portanto, os resultados indicaram que a condição de contorno foi importante para a definição do efeito do crescimento do canal de injeção sobre os indicadores de performance do processo. Uma possível explicação para o alcance da menor magnitude de m para $N = 5$ pode estar relacionada à rápida conclusão do processo.

A Figura 6.5 ilustra o avanço da linha de frente da resina no molde poroso para as melhores configurações encontradas nas Figs. 6.3 e 6.4 ($N = 5$ ou $\phi = 0,20$). Mais precisamente, as Figs. 6.5(a) e 6.5(b) mostram respectivamente o avanço da resina para a configuração ótima obtida para o caso sem paredes laterais e para o caso com paredes laterais, respectivamente, para dois instantes de tempo diferentes ($t = 90,0$ s e $190,0$ s). 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, $0,0 < f < 1,0$. Os canais construídos são identificados com as linhas pontilhadas dentro da região vermelha. Ressalta-se que esta descrição vale para todas as figuras apresentadas ilustrando a fração volumétrica da resina.

Na Figura 6.5 pode-se observar que, independentemente da condição de contorno, a resina se espalhou em um padrão quase radial. A única diferença é a direção em que a resina avança com maior velocidade, na direção y para o caso sem parede lateral e na direção x para o caso com parede lateral, isso ocorre devido ao formato de H e I dos canais de injeção. Os resultados também indicaram que não há nenhum vazio importante gerado no domínio poroso, o que inviabilizaria a produção da peça. Para o molde com parede lateral, Fig. 6.5(b), para $t = 190,0$ s é possível observar a geração de pequenos vazios permanentes próximos à superfície lateral. Essa geração é causada pela tensão de cisalhamento na linha de frente da resina, restando um pouco de ar na resina. Apesar disso, este tipo de projeto pode ser considerado válido, pois a peça pode receber um acabamento (como a aplicação de lixa na superfície) evitando danos à peça final.

Como os resultados demonstraram que o uso das paredes laterais diminuiu significativamente o tempo de preenchimento do molde e a massa desperdiçada no processo de LRI, adotou-se então o domínio com a condição de contorno de não-deslizamento e impermeabilidade para demais estudos, acerca da configuração dos canais de injeção, que serão apresentados adiante.

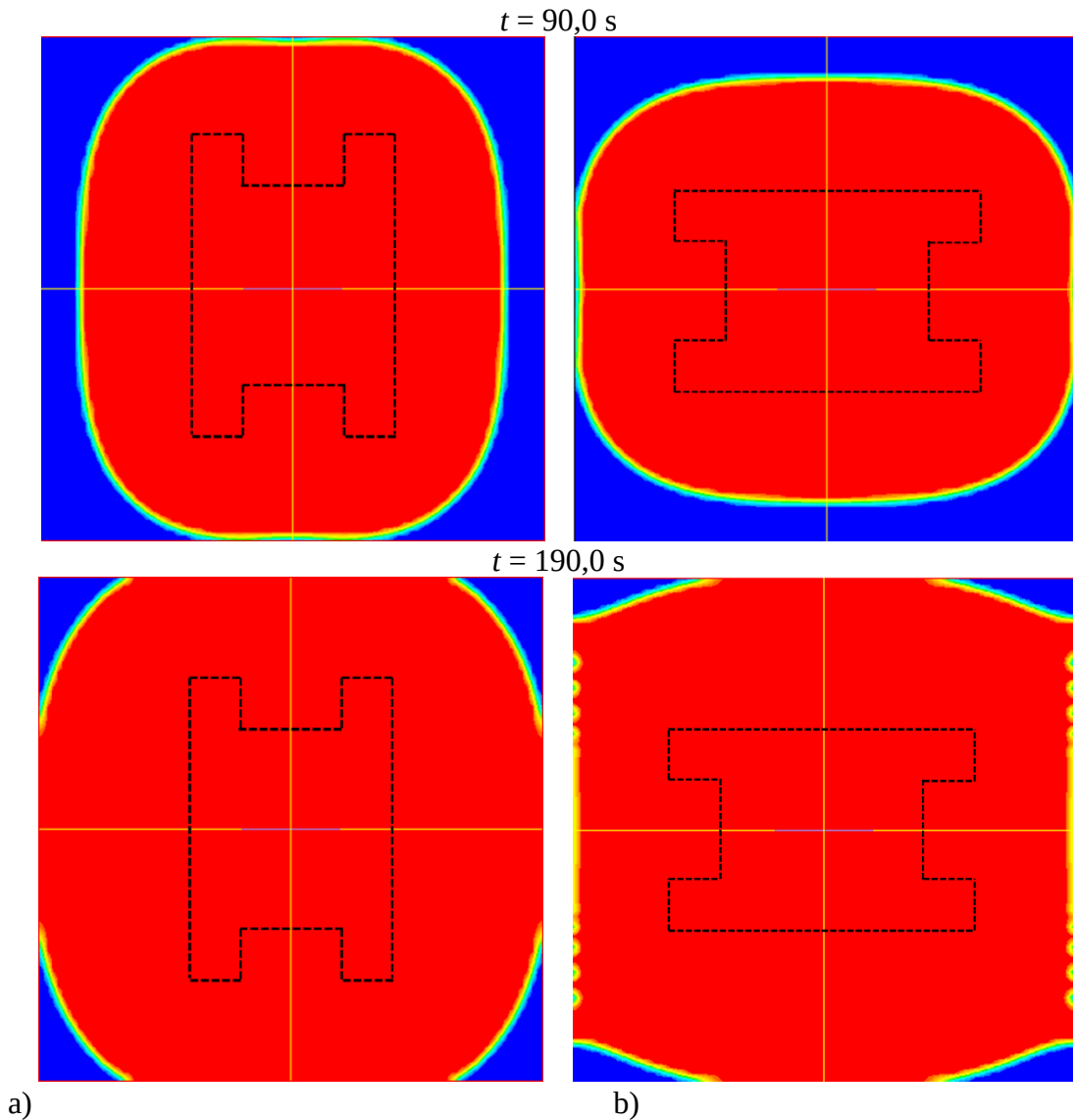


Figura 6.5— Fração volumétrica da resina em função do tempo para $N = 5$ e $\phi = 0,05$, com duas diferentes condições de contorno: a) molde sem paredes, b) molde com paredes nas superfícies laterais.

6.2 Resultados do Refinamento da Resolução do Canal (CR = 10)

Para avaliar a influência da Resolução do Canal (CR), estudou-se o efeito da $CR = 10$ sobre o os indicadores de performance e sobre o design gerado no domínio analisado. Para o domínio simulado (1/4 do molde), a placa foi dividida em 100 regiões quadradas, sendo duas delas ocupadas

inicialmente pelo canal de injeção, visto que a magnitude da entrada da resina no molde não deve ser alterada. Aqui, foi necessário montar 20 elementos para a construção do canal de injeção da resina, considerando a área de ocupação máxima do canal de injeção de $\phi_{max} = 0,2$. A montagem dos ECs foi feita no sentido de menor resistência ao escoamento de resina.

A Figura 6.6 mostra as configurações da geometria em cada etapa de crescimento do canal de injeção, ilustrando a evolução geométrica da configuração do canal, para $CR = 10$. Em termos de construção da forma, os resultados indicaram que as sete primeiras etapas levaram a configurações geométricas simples, com uma espécie de retângulo para $N = 2, 4$ e 6 e o canal em forma de H para $N = 5$ e 7. Para $N > 7$, pode-se observar a bifurcação de novos ramos com o indicativo que a geometria evolui para uma configuração mais complexa, na forma de X do centro para a periferia do meio poroso.

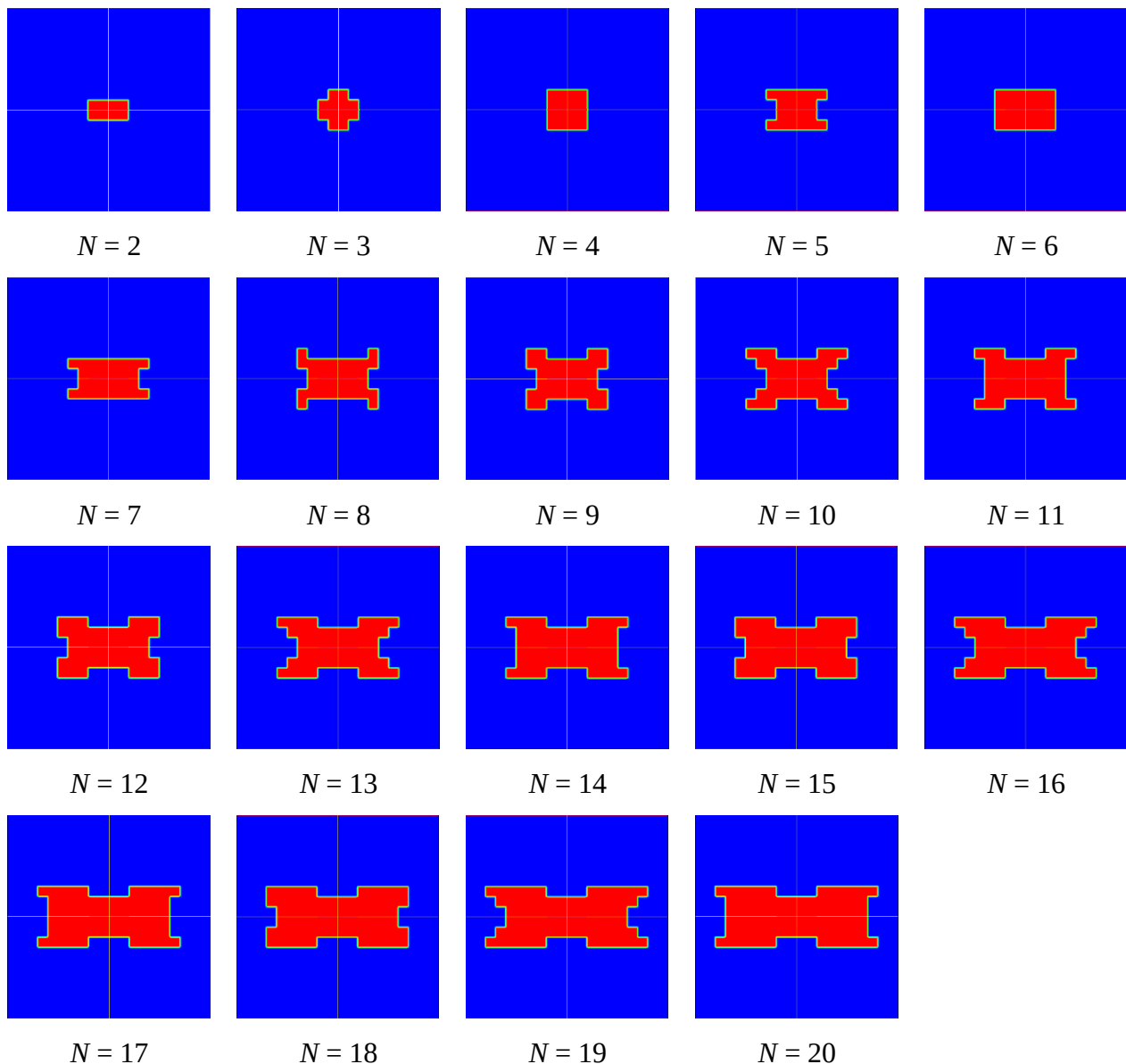


Figura 6.6 – Esquema da montagem dos ECs para $CR = 10$ e $\phi_{max} = 0,20$.

A Figura 6.7 ilustra o efeito do número de canais de injeção inseridos sobre o tempo de injeção da resina no domínio poroso e a quantidade de massa de resina desperdiçada no processo. É considerado desde a construção elementar ($N = 2$) até o número máximo de ECs ($N = 20$) limitado pela fração de área máxima ϕ_{max} . De uma forma geral, os resultados da Fig. 6.7 mostram que, o maior número de elementos para o canal de injeção ($N = 20$) levou ao melhor desempenho dos indicadores de performance analisados (t e m). No entanto, pode-se notar que há uma mudança na taxa de decréscimo entre $N = 16$ e $N = 20$, o que pode indicar uma saturação da geometria caso se tenha um aumento do ϕ_{max} .

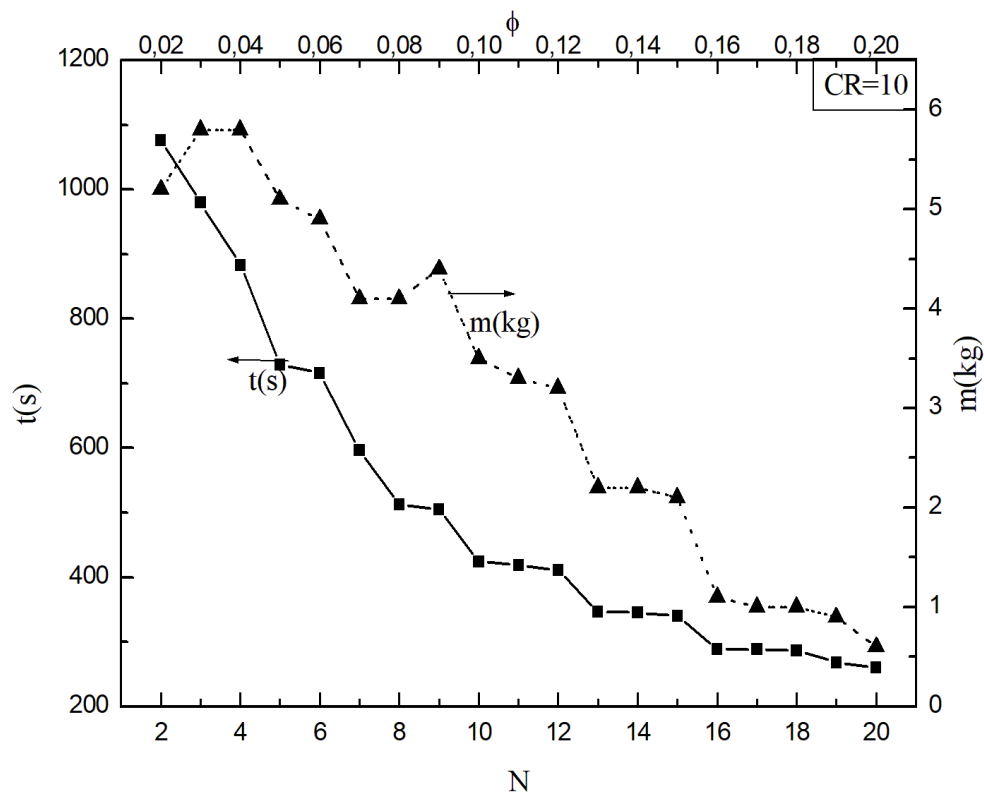


Figura 6.7 – Efeito do número de ECs e da razão ϕ ao longo do tempo (t) de infusão e desperdício de massa (m) para $CR = 10$.

Analisando o efeito do número de ECs (ou magnitude de ϕ) sobre os indicadores de performance, os resultados da Fig. 6.7 indicam que, conforme esperado, o tempo de injeção é minimizado para as maiores magnitudes de N (ou ϕ). Para o tempo (t) de preenchimento do molde, a construção geométrica levou a um intervalo de ótimo global, situado em $N = [16;20]$ (ou $\phi = [0,16; 0,20]$) que conduzem aos menores tempos de injeção no meio fibroso. Nota-se também que para menores frações de área do canal ($\phi \leq 0,08$ ou $N \leq 8$) a queda de t com o aumento de N ou ϕ é bastante elevada, enquanto para $N > 8$ ou $\phi > 0,08$ a taxa de decréscimo de t é suavizada. Por outro lado, para a massa (m) desperdiçada no processo, observa-se um aumento de m em $N = 2$ para $N = 3$, seguido

de uma estabilização até $N = 4$ e um decaimento de m de forma mais acentuada até $N = 7$, a próxima etapa ($N = 8$) segue estável e logo após nota-se um leve acréscimo de m em $N = 9$, enquanto para $N \geq 10$ ocorre novamente um decréscimo de m , e uma estabilização para $N \geq 16$. Além disso, constata-se um ponto de ótimo local, para a configuração mais elementar ($N = 2$), e para as construções geométricas no intervalo em $N = [7;8]$.

Para corroborar o entendimento acerca da massa (m) de resina desperdiçada no processo LRI, a Fig. 6.8 mostra o efeito do tempo (t) de infusão para o preenchimento do molde sobre a vazão instantânea ($\dot{m}$) da resina desperdiçada ao longo do processo, dada pela Eq. (4.9), para cada EC construído como canal de injeção. Destaca-se que há um intervalo inicial onde a linha de frente da resina não alcançou a região de saída. Após esse instante de tempo (por exemplo, até $t = 620,2$ s para $N = 2$), o primeiro ponto de contato da resina na linha de saída é observado e a saída da resina é contabilizada até o último ponto da linha de frente sair do domínio. Então, as curvas em forma de “S” ilustram o intervalo de tempo entre o primeiro contato da resina com a linha de saída e a passagem completa da linha de frente da resina, conduzindo ao desperdício de resina necessário para conclusão do processo de preenchimento.

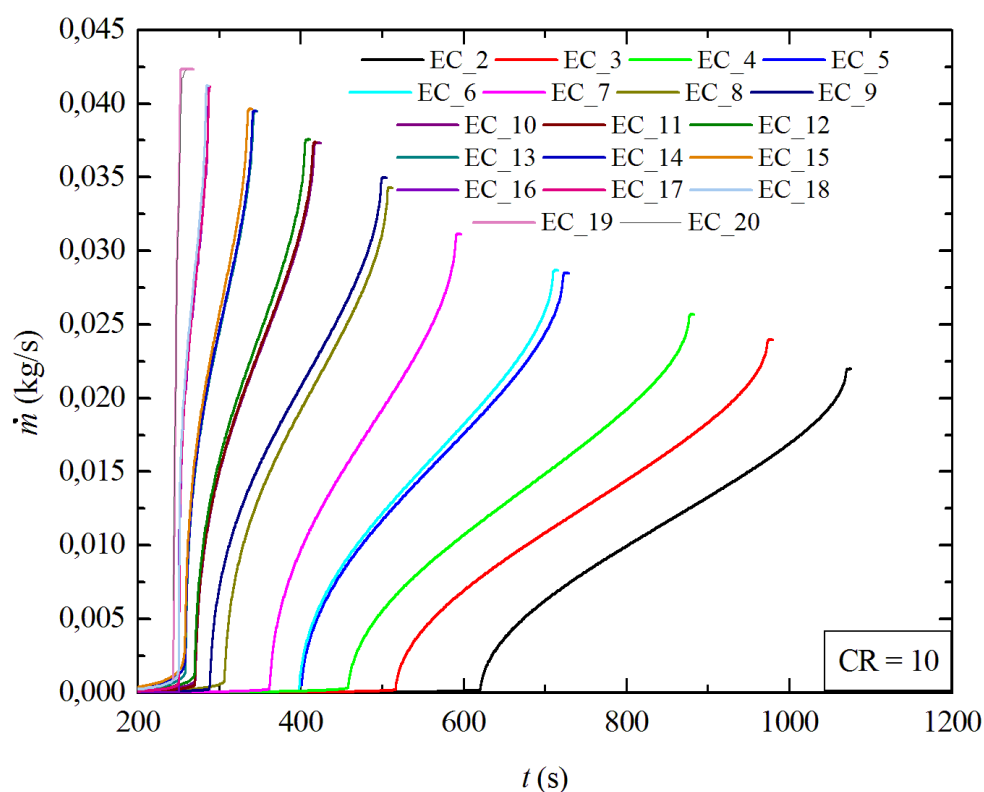


Figura 6.8 – Efeito do tempo de preenchimento do molde sobre a vazão instantânea da resina desperdiçada, para cada EC construído como canal de injeção.

De uma forma geral, observa-se na Fig. 6.8 que existe um crescimento quase assintótico da vazão instantânea em função do tempo de injeção. Nota-se ainda que para os primeiros ECs construídos o escoamento da resina apresenta menor intensidade ($N \leq 6$), porém para estes casos, a resina escoava pela região de saída por um intervalo de tempo maior. Por exemplo, para a configuração mais elementar ($N = 2$) a resina que é perdida no processo escoava no intervalo de $t = [620,2; 1076,2]$ s, atingindo uma vazão instantânea máxima de $\dot{m}_{m\acute{a}x} = 0,022$ kg/s. Enquanto para $N > 6$ a vazão instantânea da resina desperdiçada é maior ao longo do tempo, mas num intervalo de tempo menor. Para exemplificar, pode-se citar o caso da construção geométrica para $N = 16$, onde o escoamento da resina desperdiçada ocorre no intervalo de $t = [250,8; 288,8]$ s e tem-se $\dot{m}_{m\acute{a}x} = 0,041$ kg/s no intervalo considerado. Então, uma possível explicação para o alcance da menor magnitude de m para $N \geq 16$ pode estar relacionada ao curto intervalo de tempo que a resina é desperdiçada.

Com o intuito de ilustrar o comportamento transiente do escoamento da resina no molde a Fig. 6.9(a) mostra a distribuição da fração volumétrica da resina em função do tempo para a construção geométrica mais elementar, $N = 2$ e $\phi = 0,02$, e a Fig. 6.9(b) mostra o avanço da linha de frente da resina para a construção $N = 20$ ou $\phi = 0,20$, considerada como uma configuração ótima global encontrada na Fig. 6.7. As topologias são apresentadas para os seguintes instantes de tempo: $t = 30,0$ s, $80,0$ s e $130,0$ s, respectivamente. Na Figura 6.9(a) é possível notar que o comportamento da resina é quase radial, já na Fig. 6.9(b) há um maior avanço da resina na direção x (do centro para a periferia do meio poroso). No entanto, o escoamento na direção y (direção da saída da placa) ocorre mais lentamente. Com o decorrer do tempo, o escoamento da resina torna-se praticamente retilíneo, para a configuração $N = 20$, o que acaba facilitando o avanço da resina ao longo do tempo.

Comparando o desempenho entre as resoluções estudadas, $CR = 5$ e $CR = 10$, para $\phi_{max} = 0,20$, sobre os indicadores de performance, observa-se que o efeito de CR sobre o tempo de infusão não apresenta variação significativa. No entanto, o efeito de EC sobre a massa de resina desperdiçada foi bastante sensível à resolução empregada. A Figura 6.10 ilustra a configuração ótima encontrada para $CR = 5$ e $CR = 10$, respectivamente. Nota-se que a melhor configuração encontrada para $CR = 5$ ($N = 5$ ou $\phi = 0,20$), ilustrada na Fig. 6.10(a), levou a um desperdício de resina de $m = 2,77$ kg, enquanto a geometria ótima para $CR = 10$ ($N = 20$ ou $\phi = 0,20$), representada na Fig. 6.10(b), conduziu a um desperdício de resina de $m = 0,6$ kg, ou seja, para esse indicador de performance, o desempenho do sistema é melhorado em cerca de 361,7% com o aumento da resolução do domínio.

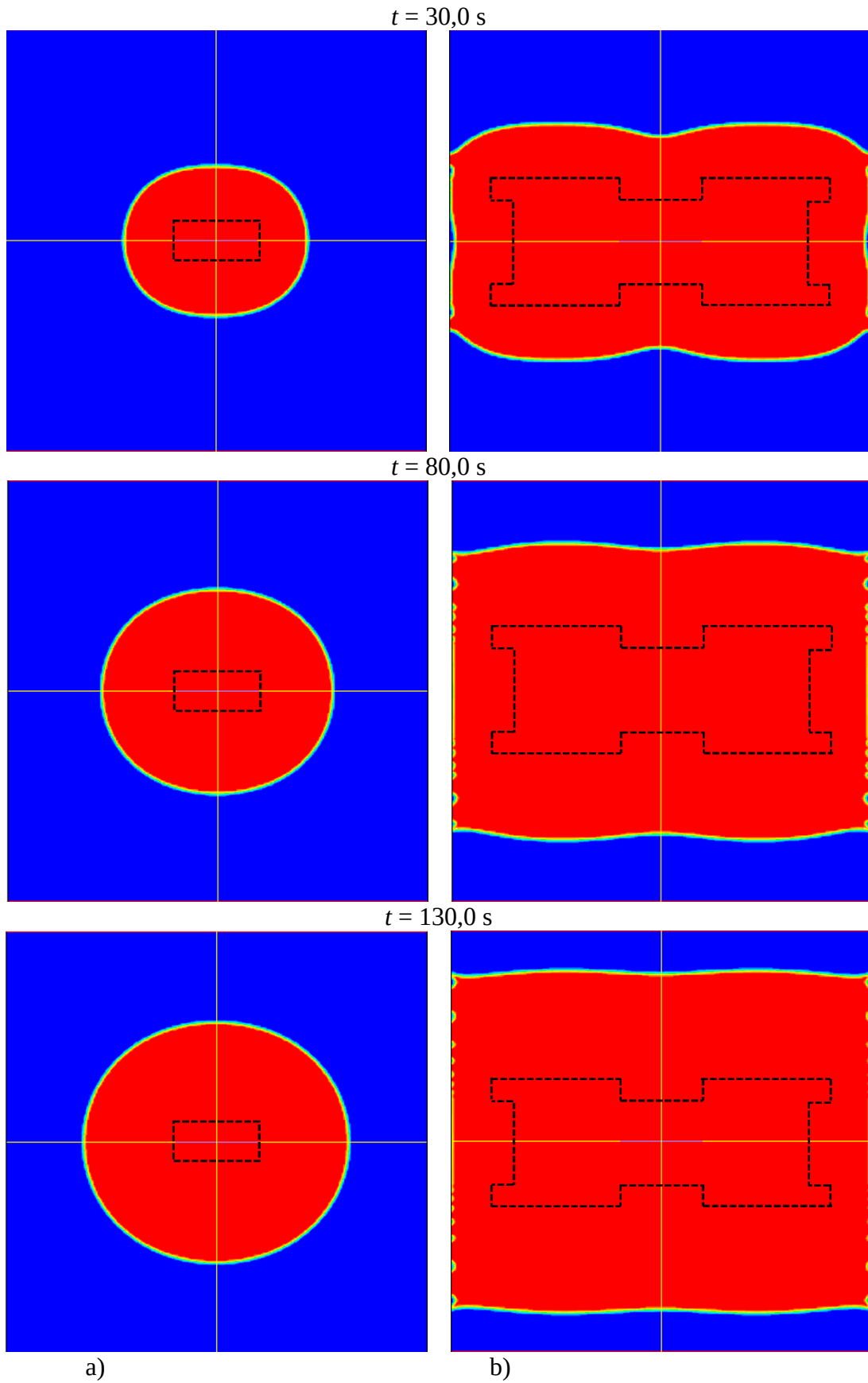


Figura 6.9 – Fração volumétrica da resina em função do tempo para $CR = 10$, com duas diferentes configurações: a) $N = 2$ e $\phi = 0,02$, b) $N = 20$ e $\phi = 0,20$.

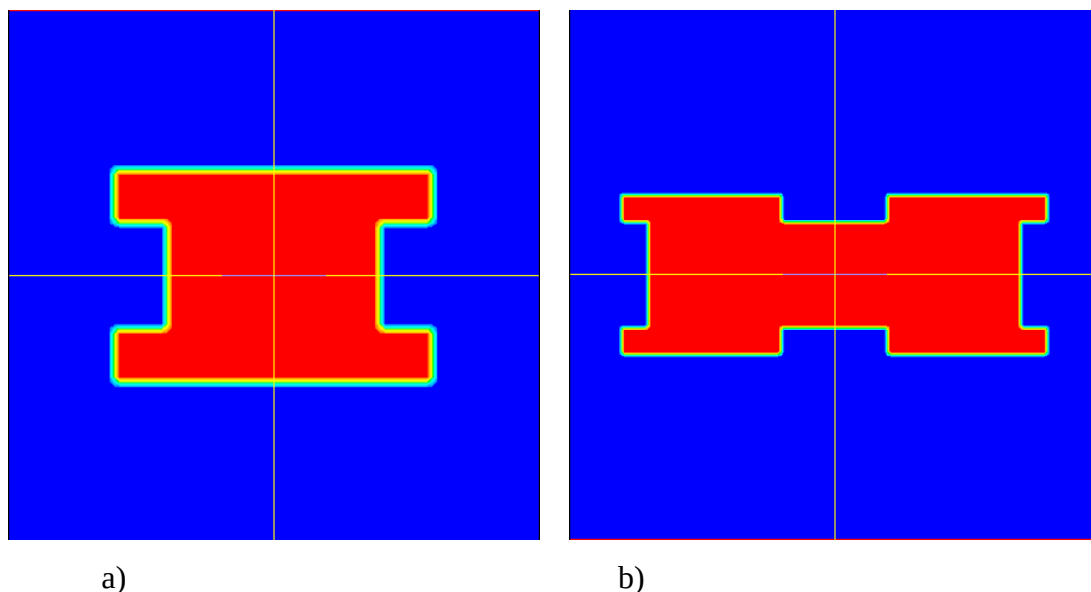


Figura 6.10 – Configurações ótimas: a) $CR = 5$ ($N = 5$ ou $\phi = 0,20$), b) $CR = 10$ ($N = 20$ ou $\phi = 0,20$).

No estudo realizado, os resultados, em termos de construção do design, foram bem mais promissores para o $CR = 10$ do que com o $CR = 5$, sendo observado que a geometria mais complexa conduziu a um melhor desempenho do processo de infusão. Os melhores resultados para $CR = 10$ podem ser explicados pela maior liberdade dada ao sistema, o que está de acordo com a Lei Construtal. Provavelmente, o uso de resoluções mais refinadas pode levar a um aumento de desempenho até o ponto em que a resolução não afete mais a configuração gerada. No entanto, o aumento da resolução leva a muitos casos a serem simulados, sendo necessária uma estratégia computacional para realizar o estudo, o que não é escopo deste trabalho. Neste sentido, os resultados mostraram a importância da avaliação geométrica para o processo de infusão de resina líquida e a aplicação da Teoria Construtal para racionalizar a configuração desse tipo de processo.

6.3 Comparação entre a montagem de novos ECs em pontos adjacentes aos canais de injeção com maior ou menor resistência ao escoamento

Esta seção apresenta os resultados de um estudo, onde se realiza a comparação entre a montagem de novos ECs em pontos adjacentes aos canais de injeção com maior ou menor resistência ao escoamento de resina. Para ambas as construções, a resistência ao escoamento da resina é definida pela Eq. (4.11). Investiga-se a influência da construção para R_{menor} ou R_{maior} sobre a configuração geométrica dos canais de injeção, bem como, os indicadores de performance do sistema (tempo de preenchimento de resina para impregnação em todo o domínio poroso e a massa de resina que é

desperdiçada no processo LRI). Para a construção dos canais de injeção foram realizadas conjuntos de 5 e 20 simulações, com $CR = 5$ e 10, respectivamente, para cada tipo de construção (R_{menor} e R_{maior}).

A Figura 6.11 mostra as configurações geométricas em cada etapa de construção do canal de injeção para $CR = 5$ com R_{menor} e R_{maior} . A montagem do canal de injeção considerando a FC no sentido de R_{menor} é a mesma vista na Fig. 6.2(b). Como visto na Fig. 6.2(b) ou 6.11(a) a inserção de novos elementos nas regiões de R_{menor} levou a configurações crescentes na direção x do domínio ($N = 2$) seguidas por uma configuração H para $N = 3$, uma configuração quadrada para $N = 4$ e uma configuração em forma de I para $N = 5$. A Figura 6.11(b) mostra que a construção de novos ECs em regiões de R_{maior} conduziu ao crescimento dominante na direção y (na direção da seção de saída) até $N = 5$. Neste caso, a restrição local para montagem dos novos elementos nas proximidades da linha de saída evitou uma nova construção na direção y , levando à geração de uma configuração em forma de I . Os esquemas apresentados na Fig. 6.11 indicaram que a consideração da montagem de novos ECs em regiões de R_{menor} ou R_{maior} afetou a construção do canal de injeção.

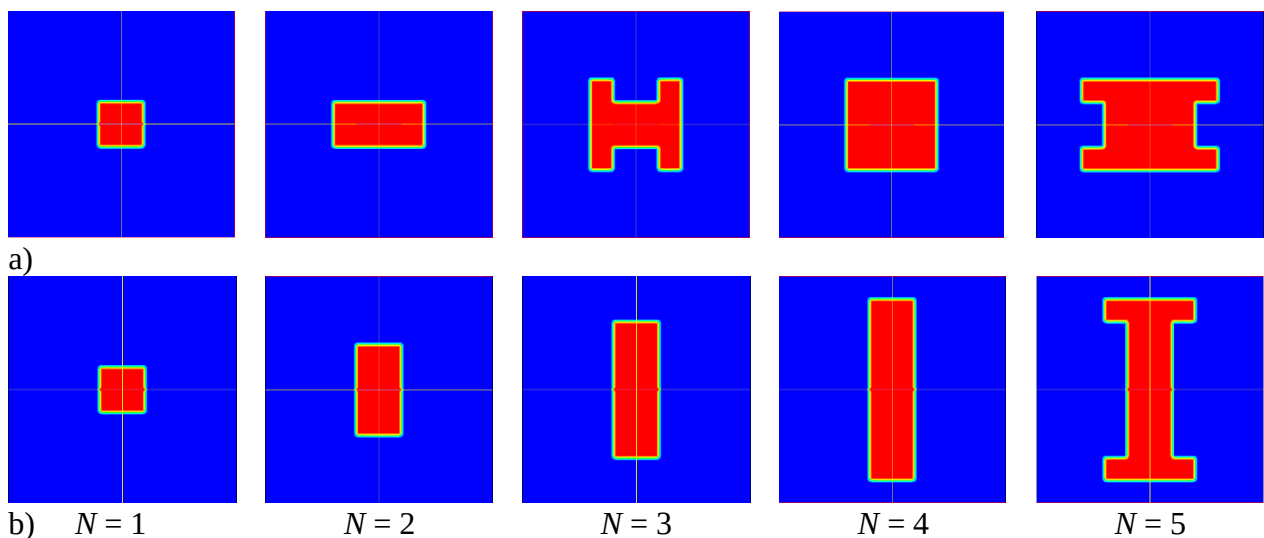


Figura 6.11 – Esquema da montagem dos ECs para $CR = 5$ e $\phi_{\text{max}} = 0,20$: a) construção no sentido de R_{menor} , b) construção no sentido de R_{maior} .

A Figura 6.12 mostra o efeito do número de ECs inseridos sobre o tempo de infusão da resina no domínio poroso e a quantidade de massa de resina desperdiçada nos processos obtidos com a forma de construção no sentido de menor resistência e com a construção no sentido de maior resistência ao escoamento de resina, para $CR = 5$. De uma forma geral, os resultados da Fig. 6.12 mostram que a construção de novos canais de injeção nas regiões de R_{menor} do escoamento de resina levou aos melhores resultados, em comparação com a montagem nas regiões do R_{maior} , tanto para os indicadores de performance analisados (t e m) quanto para todos os números de ECs inseridos no domínio.

Na Figura 6.12, pode-se observar também que o efeito do número de ECs inseridos no domínio

(N) sobre o tempo (t) de preenchimento tem comportamento semelhante para ambas as estratégias de construção, com vantagem de quase 40% para $N = 5$ quando a R_{menor} é aplicada para construir o arranjo de canais de injeção. Para a massa de resina desperdiçada, o efeito de N sobre m também mudou para diferentes estratégias de construção do arranjo dos canais de injeção. Para $N = 5$, a magnitude da massa de resina desperdiçada para a construção nas regiões de R_{maior} é quase 25 vezes superior à alcançada para a construção nas regiões de R_{menor} . Este comportamento pode ser explicado pelas configurações vistas na Fig. 6.11(b), onde os canais de injeção aumentaram na direção da superfície de saída levando a uma forte variação da linha de frente da resina na direção y do domínio.

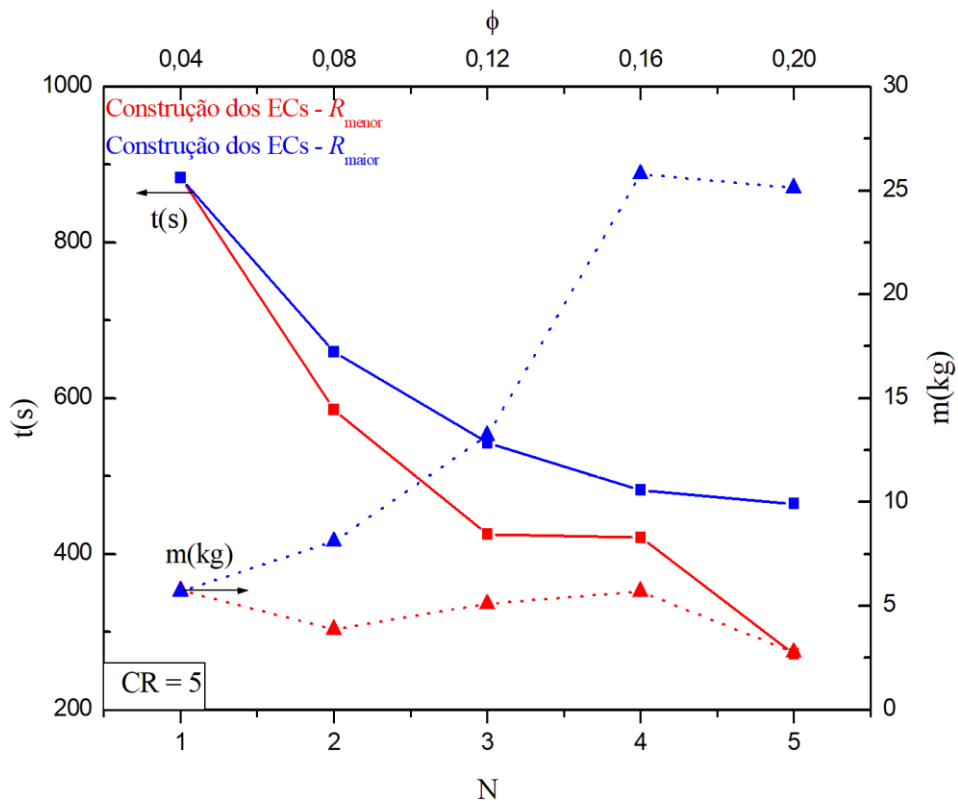


Figura 6.12 – Comparação entre o desempenho dos indicadores de performance obtidos com a construção dos ECs no sentido de R_{menor} versus R_{maior} ao escoamento, para $CR = 5$.

Para investigar a influência da Resolução do Canal (CR) no crescimento do canal de injeção e no desempenho do processo de infusão, um estudo semelhante ao realizado para $CR = 5$ é repetido para $CR = 10$. As Figuras 6.6 e 6.13 mostram as configurações geométricas em cada estágio de crescimento do canal de injeção com $CR = 10$ para as duas diferentes estratégias de construção estudadas. Na Figura 6.6, em termos de construção geométrica, os resultados indicaram que os ECs montados nas regiões R_{menor} crescem do centro para a periferia do meio poroso, levando a uma configuração final semelhante a um canal em forma de X. A Figura 6.13, por outro lado, mostra que a construção do canal de injeção a cada novo EC na posição R_{maior} leva a uma configuração circular.

Portanto, mesmo utilizando a mesma FC, a definição da montagem de cada novo EC na posição das regiões R_{menor} ou R_{maior} tem forte influência na configuração geométrica do canal de injeção construído.

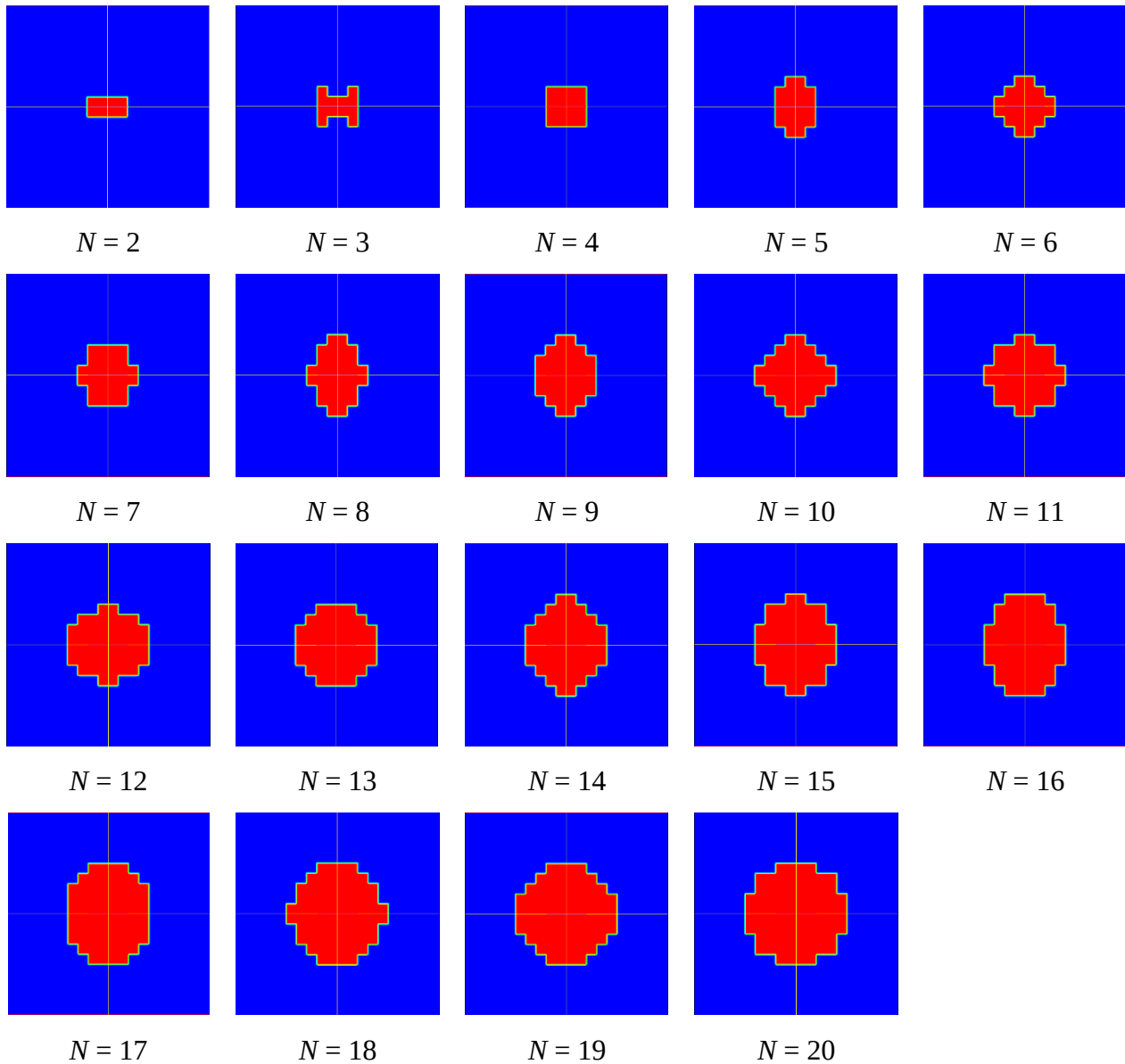


Figura 6.13 – Esquema da montagem dos ECs para construção no sentido de maior resistência ao escoamento, para $CR = 10$ e $\phi_{\text{max}} = 0,20$.

A Figura 6.14 mostra o efeito do número de ECs inseridos sobre tempo de infusão da resina e a quantidade de massa de resina desperdiçada no processo, para $CR = 10$, obtido com a FC nas regiões R_{menor} ou R_{maior} . Analogamente aos resultados obtidos para $CR = 5$, a Fig. 6.14 mostra que, para $CR = 10$, a FC aplicada na região R_{menor} levou aos melhores resultados. Ou seja, a construção do canal de injeção nas regiões R_{menor} levou ao melhor desempenho para ambos os indicadores de desempenho

analisados (t e m) em comparação com a construção nas regiões R_{maior} . Portanto, os resultados recomendam que a construção dos novos canais de injeção nas regiões de R_{menor} é a escolha mais adequada para maximizar o desempenho do problema estudado, o que já era esperado, uma vez que a Lei Construtal afirma que o sistema irá expandir com resistência mínima.

Analisando o efeito do número de ECs (ou magnitude de ϕ) nos indicadores de performance, os resultados da Fig. 6.14 indicam que, como esperado, o tempo de injeção é minimizado para as maiores magnitudes de N (ou ϕ). Nota-se ainda que para a técnica construtiva de montagem dos novos ECs na região de R_{menor} , os melhores resultados de m foram obtidos para os maiores números de ECs ($N \geq 16$). Por outro lado, para a técnica de construção que se baseia na inserção de novos canais vazios nas regiões R_{maior} , observa-se uma oscilação de m , sendo o melhor resultado obtido com a configuração mais elementar ($N = 2$). Provavelmente, com aumento do número de ECs, ou seja, maiores valores de CR, conduziria à minimização dessas oscilações. Portanto, no presente problema, a escolha da estratégia correta é importante para construir uma configuração de canais de injeção próxima da ótima. A comparação entre as diferentes resoluções (CR = 5 e 10) mostrou que o tamanho dos ECs tem grande influência no desempenho fluidodinâmico do problema e é um fator determinante para a adequada predição da configuração geométrica dos canais de injeção.

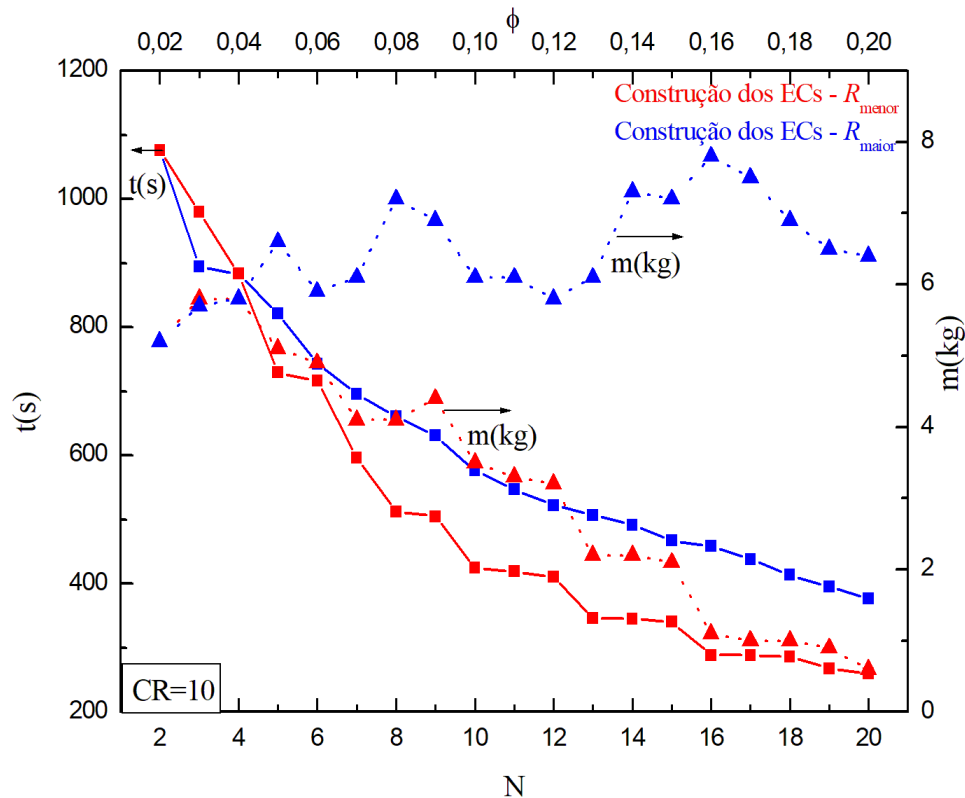


Figura 6.14 – Comparação entre o desempenho dos indicadores de performance obtidos com a construção dos ECs no sentido de R_{menor} versus R_{maior} ao escoamento, para CR = 10.

Ao comparar as duas técnicas de construção, ou seja, a construção de ECs nas regiões R_{menor} versus a construção nas regiões R_{maior} , os resultados para $CR = 5$ indicaram que a construção ótima com R_{menor} levou a um desempenho 41,5% e 89% superior, no tempo de injeção e no desperdício de resina, respectivamente, em comparação com a construção R_{maior} . Analisando as geometrias ótimas para $CR = 10$ em ambas as técnicas construtivas utilizadas, observou-se uma melhora de 30,8% no tempo de injeção e 88% no desperdício de resina quando a construção é realizada em ECs adjacentes da estratégia R_{menor} . Assim, os resultados comprovaram que os novos canais de injeção devem ser inseridos nas regiões R_{menor} para facilitar o acesso do escoamento de resina ao longo do meio poroso, o que está em concordância com a Lei Construtal.

6.4 Construção dos canais de injeção aplicando a Teoria Construtal com a Função de Construção baseada na minimização do tempo de infusão (FC: t)

Em um segundo momento foi realizado um estudo considerando o crescimento dos canais de injeção aplicando a Teoria Construtal com a FC baseada na minimização do tempo de infusão. Na aplicação da FC baseada na minimização do tempo de infusão para $CR = 5$ foram realizadas um conjunto de 15 simulações. Já para o caso com $CR = 10$ foram totalizadas 238 simulações para o processo de otimização geométrica. Adotou-se como critério de avaliação somente o tempo de injeção da resina em cada etapa de evolução do design dos ECs, já a massa de resina desperdiçada no processo foi analisada apenas para as configurações ótimas em cada passo de crescimento do canal de injeção.

As Figuras 6.15 e 6.16(a) mostram a performance (considerando t como indicador) de todas as possíveis configurações exploradas dentro do espaço de busca delimitado para o problema, para $CR = 5$ e 10, respectivamente. A Figura 6.15 traz um mapa ilustrando a posição das possíveis configurações para a construção de cada EC como canal de injeção no molde. As cores no mapa representam as possibilidades para as posições dos ECs, como canal de injeção, em cada etapa de crescimento. Por exemplo, o mosaico de cores em alguns ECs sugere que determinada posição poderia ser ocupada em mais de uma etapa de crescimento do canal. Devido ao elevado número de possibilidades das configurações para a construção dos ECs, como canal de injeção, para $CR = 10$, a Fig. 6.16(b) traz um mapa ilustrando apenas a posição das configurações ótimas encontradas em cada etapa do processo.

Na Figura 6.15 pode-se observar que a primeira etapa do processo de construção geométrica dá-se pelo EC elementar ($N = 1$), representada pela cor preta no mapa, a partir de então testa-se todas as possibilidades de construção para o canal de injeção. Por exemplo, para a posição de $N = 2$ nota-se que existe duas possibilidades para a evolução do canal, essas possibilidades estão ilustradas com

a cor vermelha, sendo os ECs 2 ou 6, que levam a um tempo de injeção da resina de aproximadamente $t = 585,7$ s e $660,1$ s, respectivamente. Para essa etapa ($N = 2$) os resultados mostram que o desempenho fluidodinâmico (tempo de injeção) obtido para a configuração ótima (EC 2) é aproximadamente 13% superior ao pior caso (EC 6). A partir da constatação da configuração ótima para $N = 2$, evolui-se para a terceira etapa do processo. Para essa etapa de construção as possibilidades de crescimento do canal de injeção são no sentido dos ECs = 3, 6 ou 7, ilustradas com a cor verde. Para $N = 3$, a configuração ótima é obtida para EC 3 e leva a um tempo de injeção mínimo de aproximadamente $t_m = 410,6$ s, enquanto para o EC 6 foi obtido um tempo de injeção de $t = 516,8$ s e para a configuração com EC = 7 foi obtido um tempo de injeção de $t = 425,7$ s. Dessa forma a configuração geométrica com o EC = 3 conduz a um desempenho de aproximadamente, 26% e 4% superior em relação aos ECs 6 e 7, respectivamente. As etapas de otimização geométrica para $N = 4$ e 5 seguem a metodologia exemplificada acima e estão ilustradas no mapa com as cores azul escuro e azul celeste, respectivamente. Ressalta-se que esse sistema de construção possui memória, ou seja, uma vez construído o canal de injeção, ele não se desfaz. A linha tracejada em rosa indica a construção dos 5 ECs de canais de injeção inseridos no meio poroso nas posições 1, 2, 3, 8 e 13, respectivamente.

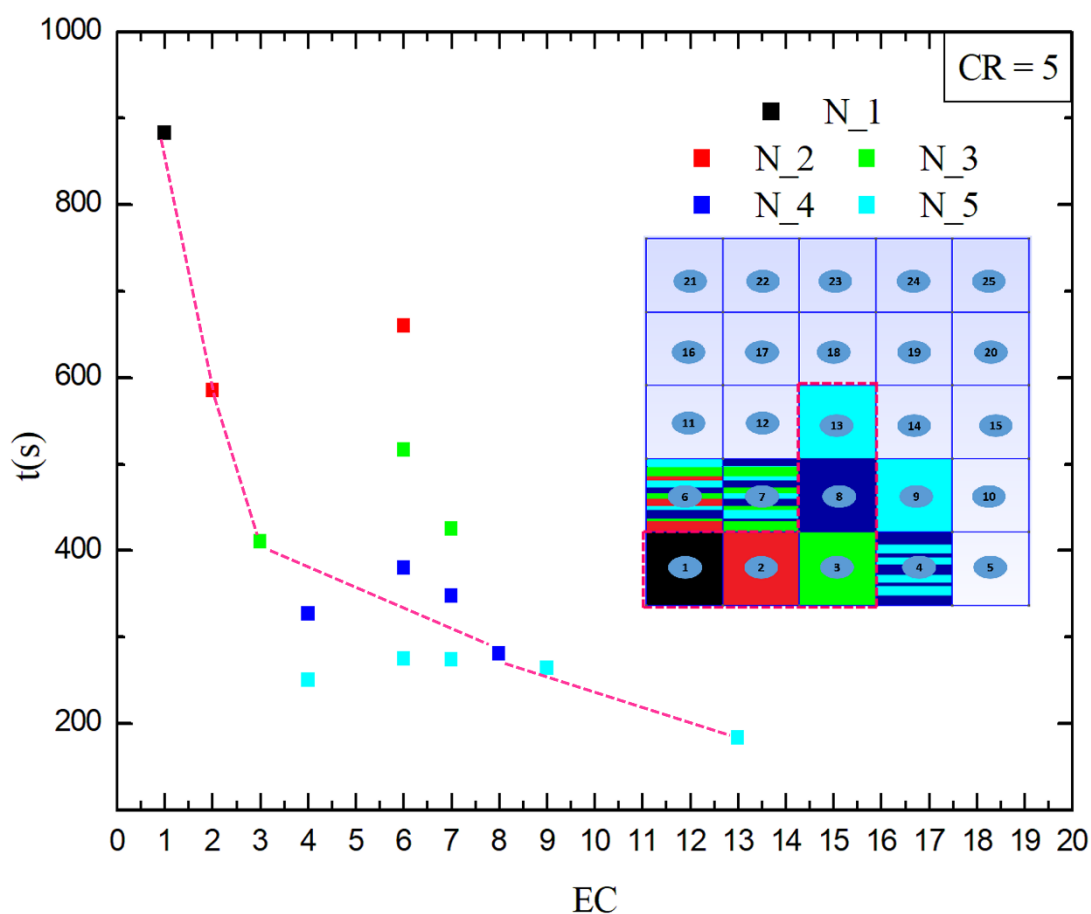
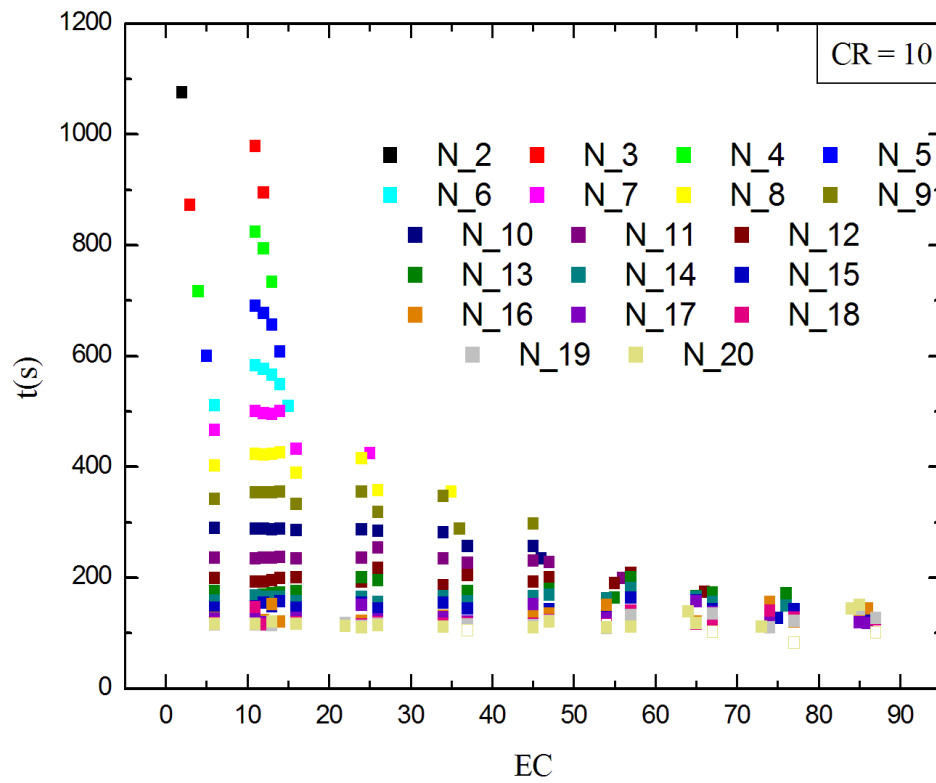
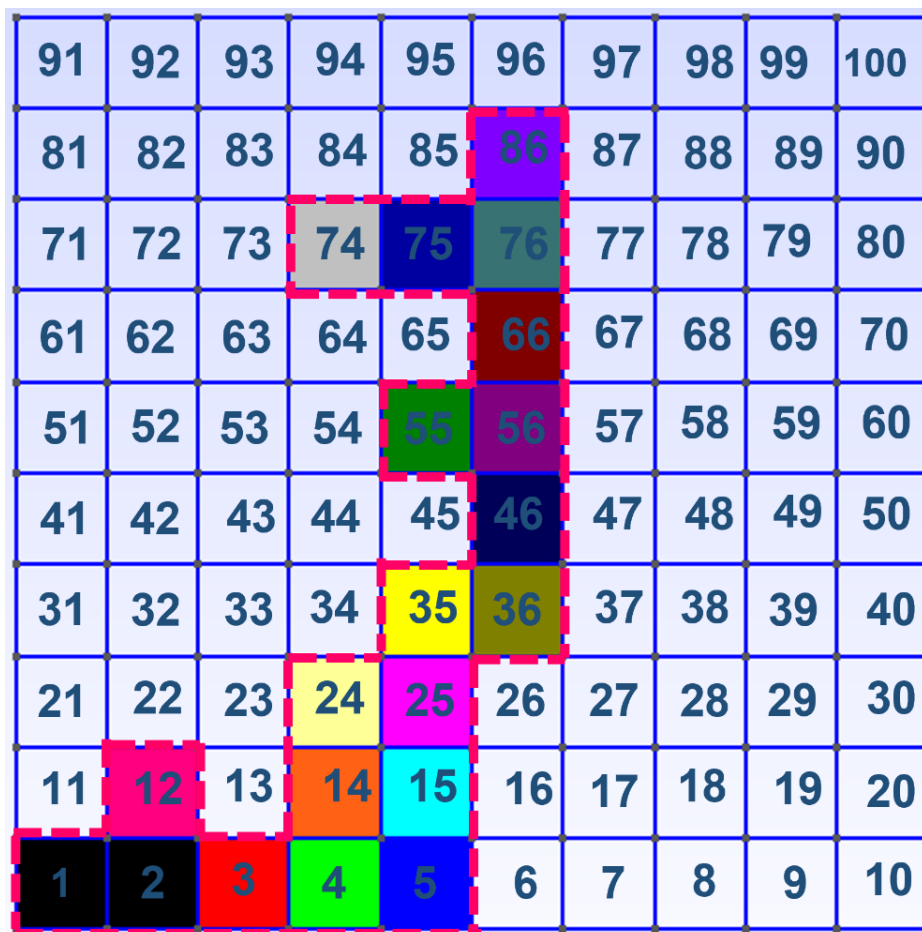


Figura 6.15 – Tempo de injeção para todas as possibilidades exploradas pela FC baseada na minimização do tempo de infusão, para CR = 5.



a)



b)

Figura 6.16 – a) Tempo de injeção para todas as possibilidades exploradas pela FC baseada na minimização do tempo de infusão, para CR = 10, b) Configurações ótimas obtidas com a FC: t .

Na Figura 6.16(a) os retângulos com preenchimento interno representam as configurações válidas, ou seja, as que não tiveram formação de vazios permanentes no interior do meio fibroso. Os retângulos sem preenchimento interno representam os casos em que os espaços vazios formados ocorrem de forma permanente, mesmo que a linha de monitoramento indique um preenchimento do molde (ou seja, $f = 1,0$ em toda linha de monitoramento). Neste sentido, considera-se aqui uma injeção de resina com tempo infinito e estes casos são descartados de construção do canal, 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.

Um exemplo da formação de vazios pode ser visto na Fig. 6.17 para o caso com $CR = 10$, $N = 18$, $\phi = 0,18$ e $EC = 54$ para dois instantes de tempo diferentes, $t = 20,0$ s e $t = 70,0$ s, respectivamente. Os vazios formados representam irreversibilidades no sistema de escoamento 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. Observa-se na Fig. 6.17 que no decorrer do tempo alguns vazios se espalham pelo meio fibroso e se desfazem, restando apenas alguns pontos secos no molde. O caso apresentado leva a um menor tempo de injeção de resina no molde para a etapa de construção $N = 18$, no entanto, o processo é ineficiente e a configuração geométrica não é considerada para projeto devido à restrição de preenchimento de todo o molde. Assim, cabe destacar que no caso da otimização geométrica é necessário não somente observar o tempo de injeção como também avaliar 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.

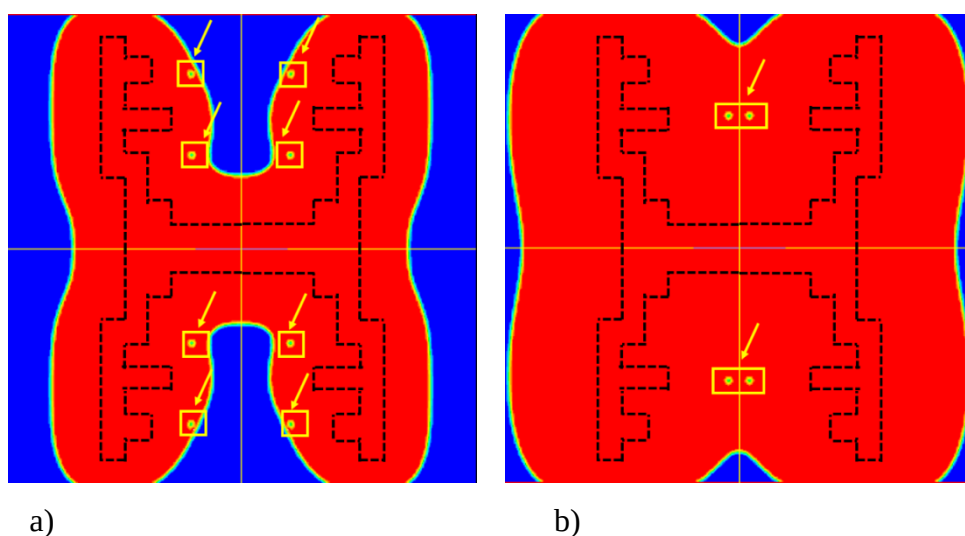


Figura 6.17 – Escoamento de resina com formação de vazios permanentes para $CR = 10$, $N = 18$, $\phi = 0,18$ e $EC = 54$ para dois instantes de tempo diferentes: a) $t = 20,0$ s, b) $t = 70,0$ s.

As Figuras 6.18 e 6.19 mostram as configurações da geometria em cada etapa de crescimento do canal de injeção com a FC: t , para CR = 5 e 10, respectivamente, ilustrando a evolução geométrica da configuração do canal. Fazendo uma comparação entre a técnica construtiva com FC: R e a FC: t , em termos de construção do design, ilustrada nas Figs 6.2(b), 6.6, 6.18 e 6.19, é possível perceber que as construções de canais de injeção com as metodologias analisadas conduzem a designs diferentes. Por exemplo, nas Figs. 6.2(b) e 6.18, para CR = 5, fica evidente uma diferença nas razões L_0/H_0 (relação entre a largura e o comprimento do ramo principal) e L_1/H_1 (relação entre a largura e o comprimento do ramo bifurcado). A Tabela 6.1 apresenta as magnitudes dessas razões, para cada EC construído como canal de injeção, para evidenciar a diferença no design gerado entre as metodologias de construção com diferentes tipos de função.

Comparou-se, considerando o efeito da evolução do design dos ECs sobre os indicadores de performance, para CR = 5 e 10, para técnica construtiva com FC baseada na resistência ao escoamento de resina e a FC baseada na minimização do tempo de infusão. As Figuras 6.20 e 6.21 mostram o efeito do número de ECs inseridos sobre o tempo de infusão da resina no domínio poroso e a quantidade de massa de resina desperdiçada no processo obtidos com as configurações ótimas da FC baseada na minimização de t e a FC baseada em R , para CR = 5 e 10, respectivamente. De uma forma geral, os resultados das Figs. 6.20 e 6.21 mostram que, apesar das diferentes magnitudes, ambas as técnicas de construção não afetaram a tendência do efeito do número de canais de injeção sobre o tempo (t) de preenchimento do molde, sendo que o tempo de injeção é minimizado para as maiores magnitudes de N ($N = 5$ para CR = 5 e $N = 20$ para CR = 10). No entanto, pode-se notar que, para CR = 10, em ambas as técnicas de construção utilizadas, a partir da construção $N = 16$ o tempo (t) de infusão torna-se praticamente estável, o que sinaliza uma saturação da geometria nesse estágio de construção. Comparando as magnitudes do tempo de infusão para as melhores configurações, os resultados mostraram que a otimização geométrica com FC baseada em t conduziu a tempos de infusão 48% e 141%, para CR = 5 e 10, respectivamente, menores do que os obtidos com a metodologia com FC baseada em R .

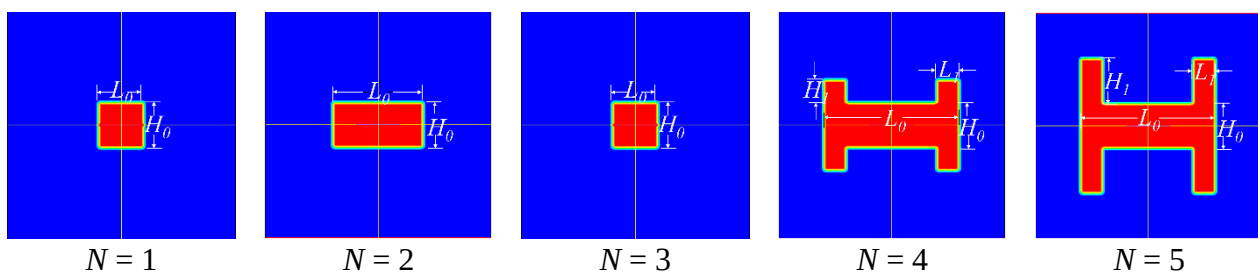


Figura 6.18 – Esquema da montagem dos ECs com FC: t , para CR = 5.

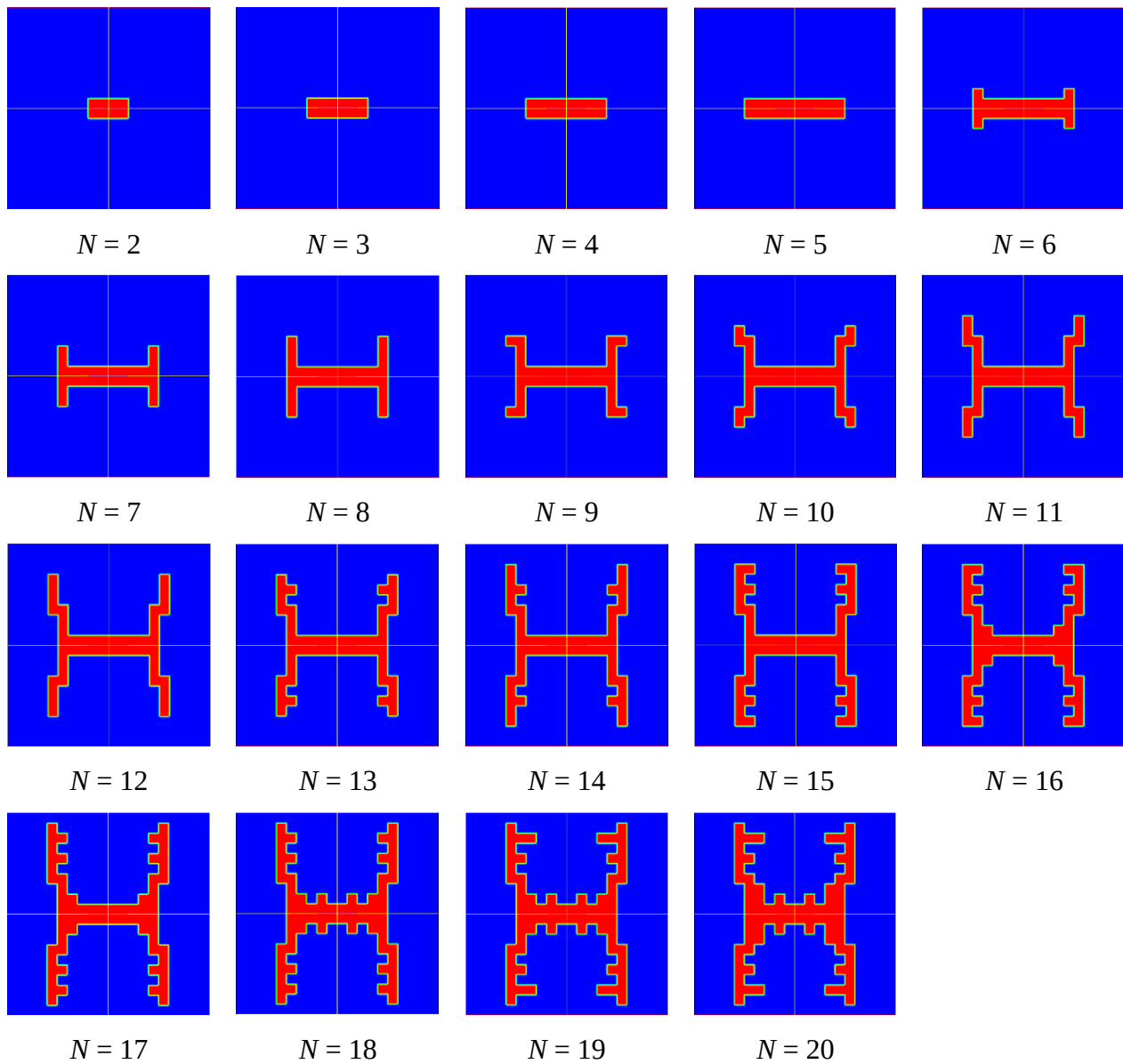


Figura 6.19 – Esquema da montagem dos ECs com FC: t , para $CR = 10$.

Tabela 6.1 – Relação das razões L_0/H_0 e L_1/H_1 para as diferentes estratégias e funções de construção, para $CR = 5$.

N	L_0/H_0		L_1/H_1	
	FC: t	FC: R	FC: t	FC: R
1	1	1	Não possui	Não possui
2	2	2	Não possui	Não possui
3	3	2	Não possui	1
4	3	1	1	Não possui
5	3	1	0,5	1

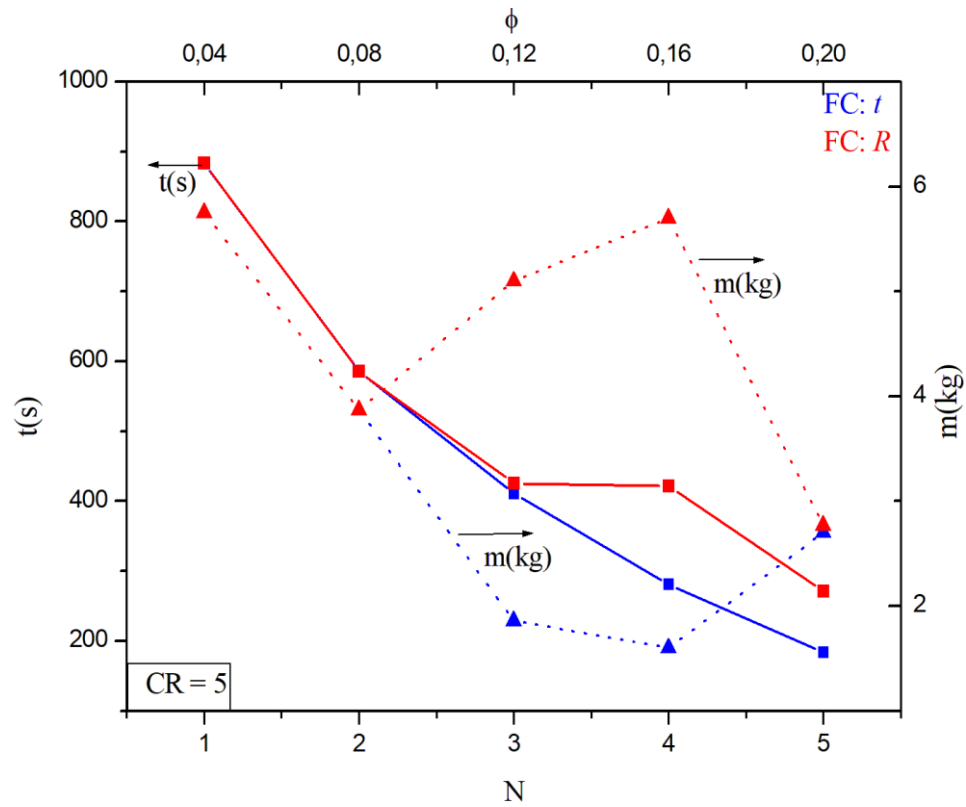


Figura 6.20 – Comparação entre o desempenho dos indicadores de performance obtidos com a FC: t e com a FC: R , para $CR = 5$.

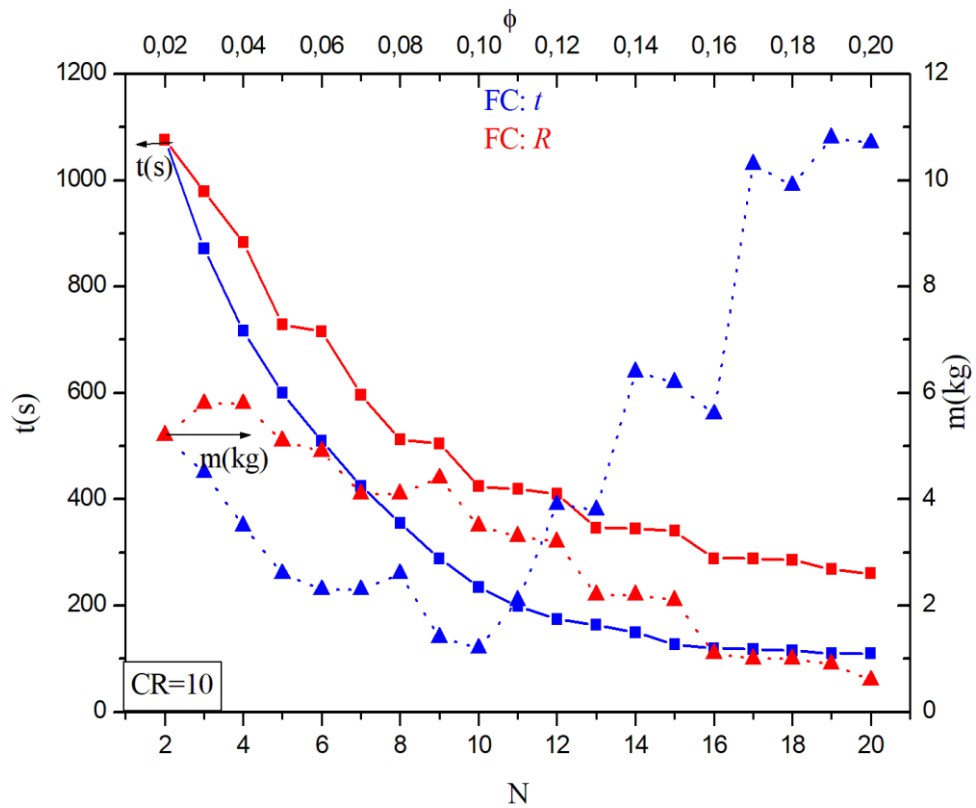


Figura 6.21 – Comparação entre o desempenho dos indicadores de performance obtidos com a FC: t e com a FC: R , para $CR = 10$.

Analizando o efeito do número de ECs (ou magnitude de ϕ) sobre m , os resultados das Figs. 6.20 e 6.21 indicam que, a performance de m muda para as diferentes metodologias de construção estudadas. Na Figura 6.20, para $CR = 5$, nota-se que para ambas as técnicas de construção, o comportamento de m é o mesmo até $N = 2$. A partir de então, observa-se que, para o caso utilizando a FC baseada na minimização de t , ocorre uma forte diminuição em m de $N = 2$ para $N = 4$, seguido de um aumento de m na última etapa de construção do canal, ao contrário do que é observado para técnica construtiva com FC baseada em R . Desse modo destaca-se que a massa desperdiçada mínima obtida em ambas as metodologias (FC: t e FC: R) foram diferentes. Para $CR = 5$, a melhor configuração obtida foi $N = 4$ com a FC: t e $N = 5$ com a FC: R , sendo que a perda com FC: t foi um pouco menor do que com a FC: R .

Para o caso da Fig. 6.21, $CR = 10$, nota-se que para a FC: t , ocorre um decaimento de m em função de N até $N = 10$ ou $\phi = 0,1$, observando apenas uma pequena oscilação de $N = 7$ para $N = 8$. Observa-se ainda que para $N > 10$ o comportamento de m muda e ocorre um aumento na magnitude de m , sendo que a partir da construção $N = 16$ não vale mais a pena inserir novos canais de injeção pois m aumenta demasiadamente e o tempo de infusão não diminui de forma significativa. Já para a metodologia de FC: R , a curva de m em função de N apresenta algumas oscilações nas primeiras construções, depois tende a diminuir e apresenta uma certa estabilização para $N \geq 16$, levando aos melhores resultados. Outro aspecto importante é que, como os designs construídos são diferentes, acaba se tendo uma influência sobre os indicadores de performance, especialmente a massa (que não é utilizada na FC: t para a construção).

Percebe-se que com a evolução do design, as construções com FC: t levam a uma ramificação maior na direção y (na direção de saída da resina da placa), o que possivelmente explica o melhor desempenho para a obtenção de menores tempos de infusão (para os CR estudados), indicando que a construção do design usando o próprio indicador de performance pode ser uma técnica promissora frente à metodologia de construção com FC: R . Por outro lado, essa tendência na evolução do design dos ECs leva a uma mudança brusca no comportamento de m , uma vez que o escoamento de resina aproxima da região de saída desde o início do processo de infusão. Esse fato fica claramente evidenciado para $CR = 10$, conforme pode ser visto na Fig. 6.19. Por outro lado, a metodologia utilizando FC: R conduziu a uma magnitude de m menor do que com a FC: t para o caso $CR = 10$ e conduziu à redução simultânea dos dois indicadores de performance, o que não acontece com a FC: t . Além disso, a técnica de FC: R permite uma redução do tempo de processamento, pois requer menos casos a serem simulados (isso é importante do ponto de vista de aplicação).

6.5 Construção dos canais de injeção aplicando a Teoria Construtal com a Função de Construção baseada na minimização da massa de resina desperdiçada (FC: m) no processo LRI

Com o intuito de explorar ainda mais o algoritmo de construção, analisou-se o comportamento da configuração geométrica dos canais de injeção e os indicadores de performance usando a função de construção baseada na minimização do desperdício de massa da resina (FC: m). Estudou-se a evolução geométrica da configuração dos canais de injeção. Para isso, foram necessários conjuntos de 13 e 150 simulações, para $CR = 5$ e 10, respectivamente. A Figura 6.22 ilustra as configurações da geometria em cada etapa de crescimento do canal de injeção com a FC: m , para $CR = 5$. A Figura 6.22 mostra que a montagem dos ECs como canal de injeção conduziu ao crescimento dominante na direção x (do centro para a periferia do meio poroso).

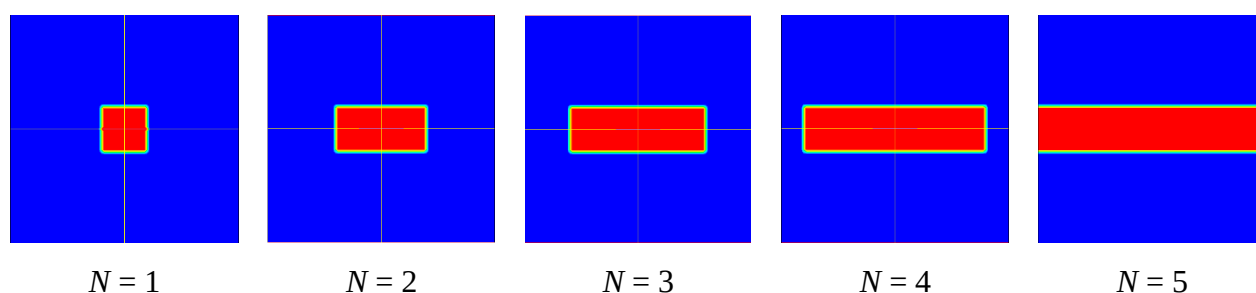


Figura 6.22 – Esquema da montagem dos ECs com FC: m , para $CR = 5$.

Comparou-se o desempenho das técnicas construtivas FC: R , FC: t e FC: m sobre os indicadores de performance e sobre a configuração geométrica dos canais de injeção, para $CR = 5$ e 10. As Figuras 6.23 e 6.24 ilustram, respectivamente, o efeito do número de ECs inseridos sobre o tempo de preenchimento (t) para impregnação de resina no domínio poroso e a quantidade de massa (m) de resina desperdiçada no processo, para $CR = 5$, obtido com ambas as formas de construção estudadas. De uma forma geral, os resultados das Figs. 6.23 e 6.24 mostram que as FC baseada nos indicadores de performance levaram aos melhores resultados dos próprios indicadores, ou seja, quando analisado o efeito de N sobre t , a FC: t obteve o melhor desempenho (Fig. 6.23), analisando o efeito de N sobre m , a FC: m levou a resultados expressivamente melhores (Fig. 6.24).

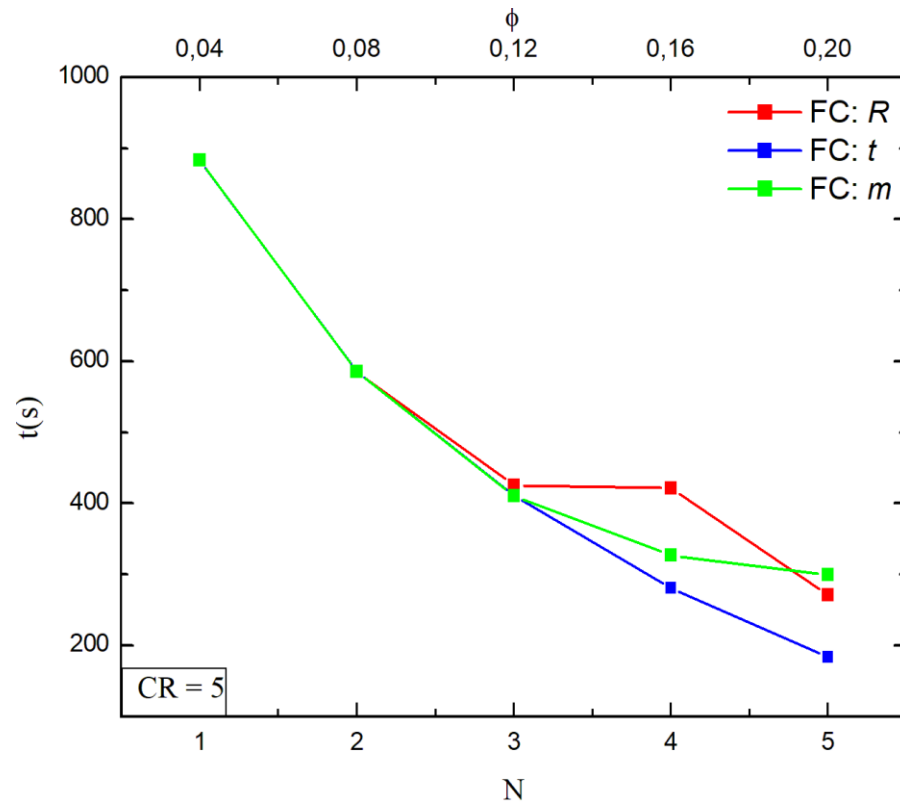


Figura 6.23 – Comparação entre o desempenho de t obtido com a FC: R, FC: t e FC: m , para $CR = 5$.

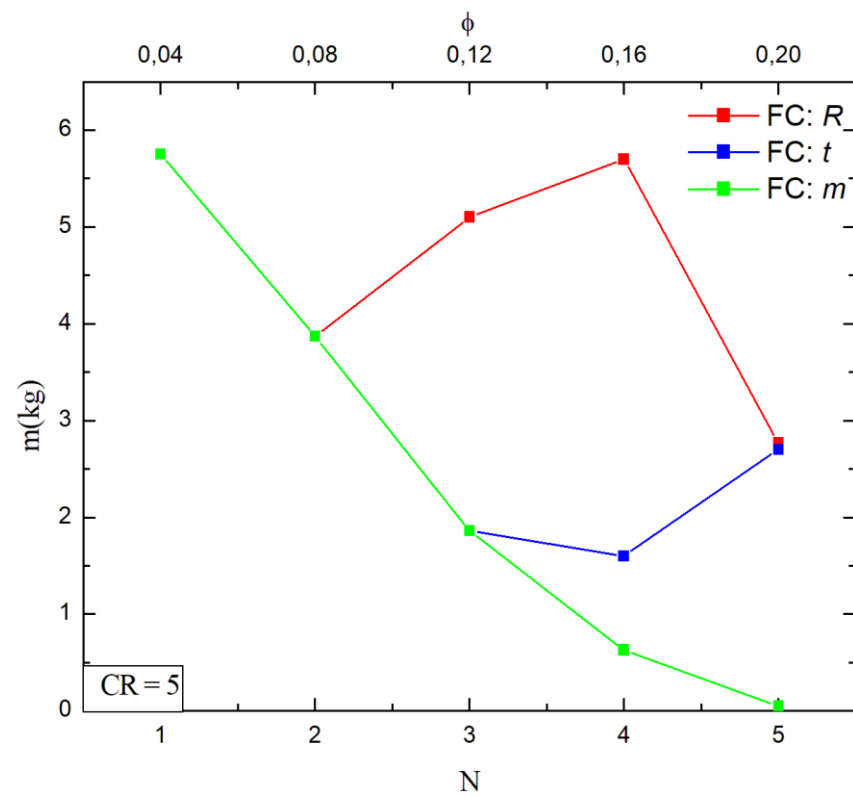


Figura 6.24 – Comparação entre o desempenho de m obtido com a FC: R, FC: t e FC: m , para $CR = 5$.

Na Figura 6.23, pode-se observar também que o efeito de N sobre t tem comportamento semelhante para ambas as estratégias de construção, com vantagem de quase 63% e 48%, para $N = 5$, quando a FC: t é aplicada em comparação com FC: m e FC: R , respectivamente. Neste caso, a FC: R apresentou um desempenho intermediário, sendo cerca de 10% superior a FC: m . Para a massa de resina desperdiçada, Fig. 6.24, o efeito de N sobre m mudou para diferentes estratégias de construção do arranjo dos canais de injeção. Nota-se que para a FC: m a quantidade de massa de resina desperdiçada diminui significativamente com o aumento de N , tornando-se praticamente desprezível em relação aos valores de m para FC: R e FC: t , devido à configuração do canal de injeção. Por exemplo, para $N = 5$, a magnitude da massa de resina desperdiçada para FC: R e FC: t é cerca de 50 vezes superior à alcançada para a FC: m . Este comportamento pode ser explicado pelas configurações vistas na Fig. 6.22, onde os canais de injeção crescem na direção x , levando a um escoamento retilíneo com pouca variação na linha de frente da resina na direção y do domínio, fazendo com que a resina alcance a região de saída praticamente com todo o molde impregnado de resina.

Para corroborar com as observações levantadas a Fig. 6.25 ilustra o avanço da linha de frente da resina no meio poroso para $N = 5$ ou $\phi = 0,2$ quando a montagem é realizada utilizando a FC: R , Fig. 6.25 (a), FC: t , Fig. 6.25 (b) e FC: m , Fig. 6.25 (c). Três diferentes instantes de tempo são apresentados ($t = 30$ s, 60 s e 120 s) para ilustrar o avanço do escoamento de resina para as diferentes configurações alcançadas para as três estratégias de construção investigadas. Na Figura 6.25 é possível notar uma diferença na direção em que a resina avança com mais intensidade. Para a construção baseada na FC: R , Fig. 6.25 (a), o comportamento da resina é praticamente radial, com maior avanço na direção x . Já para FC: t , Fig. 6.25 (b), nota-se que a resina avança com maior intensidade na direção y , o que possivelmente explica o melhor desempenho do escoamento da resina, em termos do tempo de infusão. Por outro lado, percebe-se ainda que, com o decorrer do tempo, o escoamento da resina alcança a região de saída sem ter preenchido os cantos do molde, ocasionando um baixo desempenho para a quantidade de massa de resina desperdiçada. Para FC: m , Fig. 6.25 (c), o molde é completamente impregnado na direção x antes de ser preenchido na direção y . O comportamento de impregnação observado para a estratégia de montagem de novos elementos baseada na FC: m explica o excelente desempenho em relação a m .

A Figura 6.26 mostra as configurações geométricas em cada etapa de crescimento do canal de injeção com $CR = 10$ para a FC: m . Em termos de construção geométrica, os resultados indicaram que os ECs montados com a FC: m aumentaram do centro para a periferia do meio poroso. Percebe-se que a construção leva a um canal de injeção principal (até $N = 7$) e com a evolução da construção surge canais de injeção secundários ($N \geq 8$). É possível notar uma variação no comprimento e as distâncias entre os canais secundários e o canal principal, sendo que as últimas construções levaram

a diminuição dessa distância, fazendo com que os canais secundários sejam incorporados ao canal principal. Por exemplo, para $N = 20$, não existe nenhuma ramificação de canais secundários, uma vez que a construção final levou a um único canal principal. Tal configuração é convencionalmente indicada na literatura para infusão de pequenas estruturas, como exemplificado na Fig. 2.3.

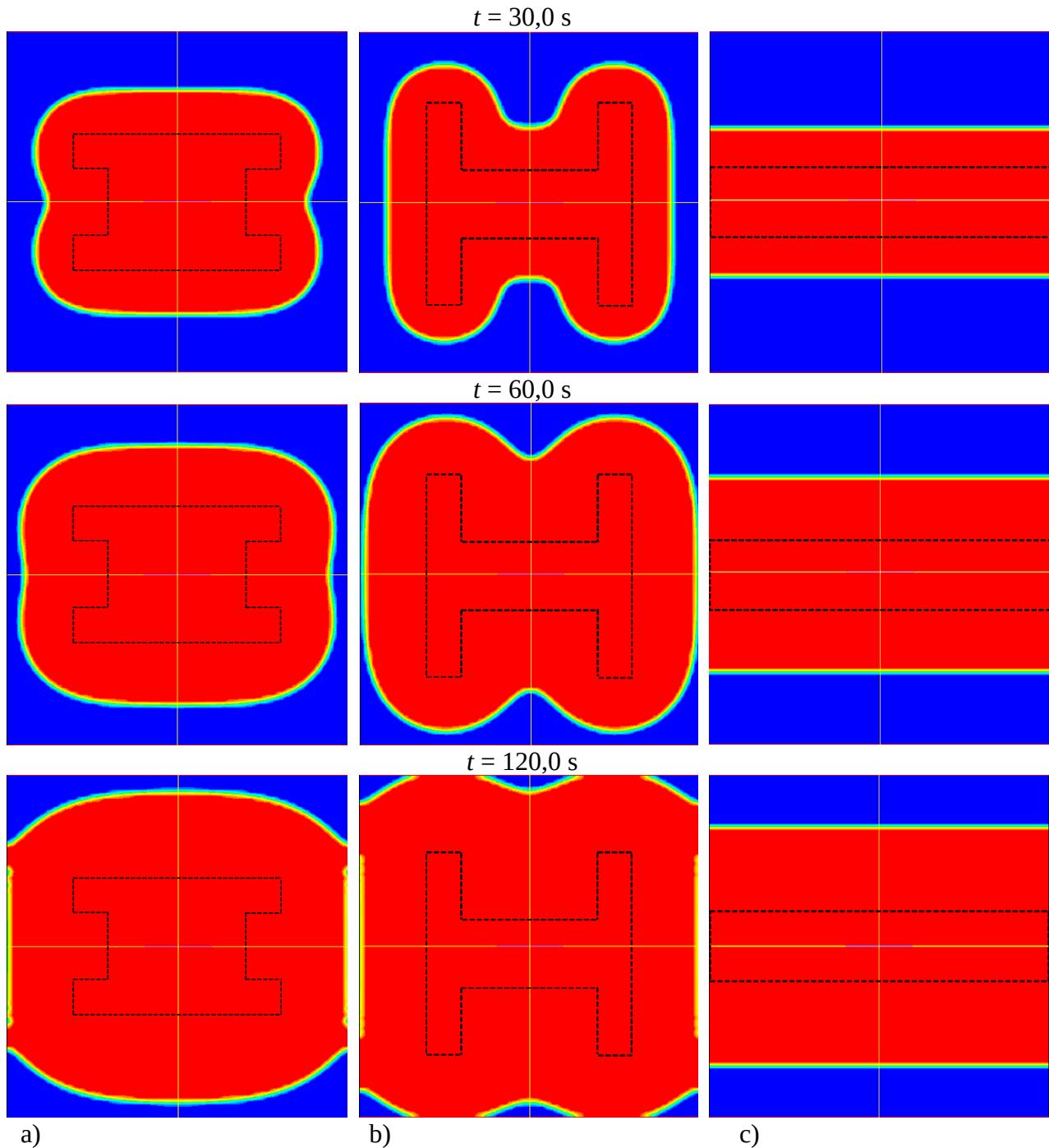


Figura 6.25 – Posição da linha de frente do escoamento de resina para três instantes de tempo, $CR = 5$ e $N = 5$, para as três estratégias de construção: a) FC: R , b) FC: t e c) FC: m .

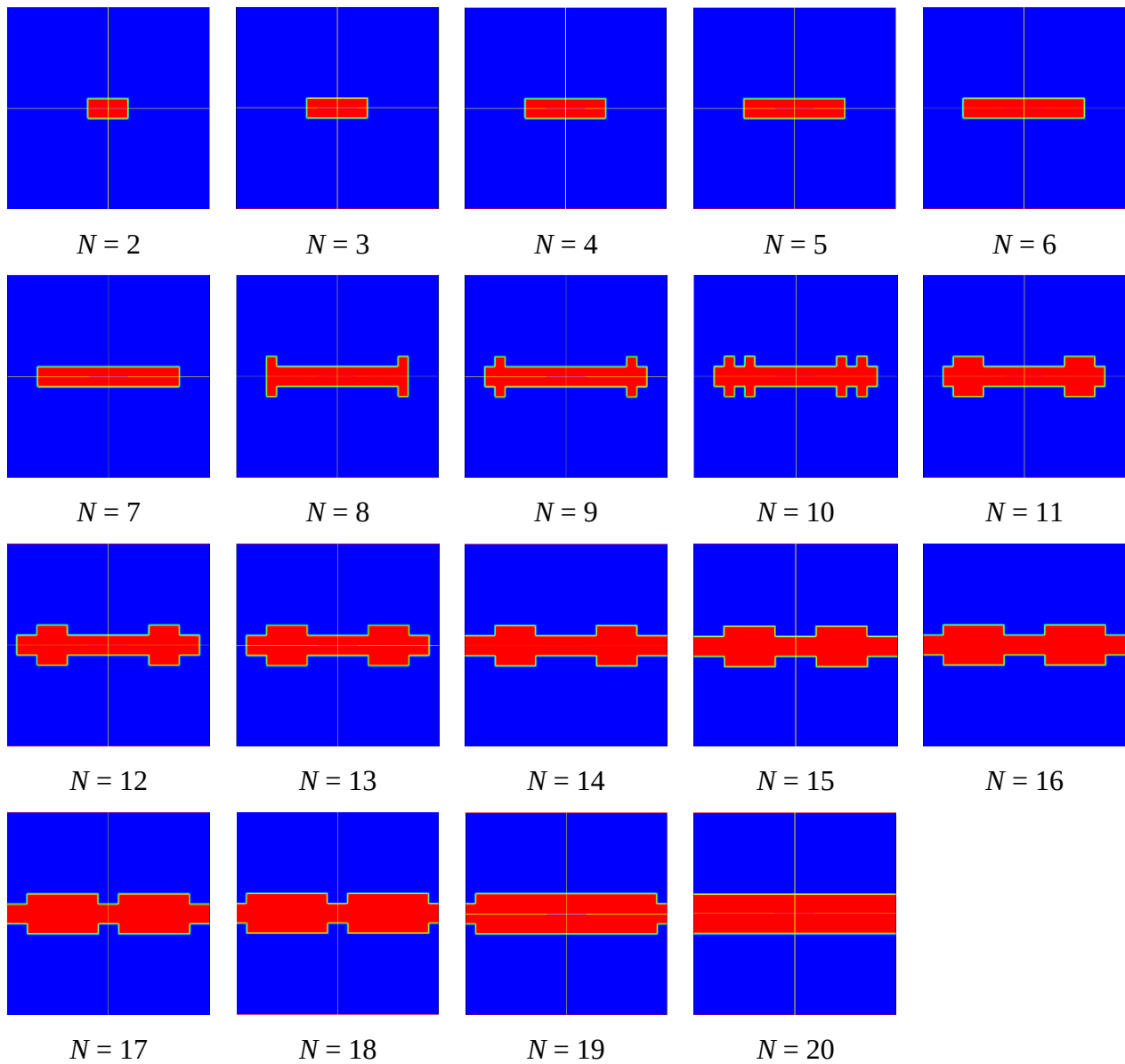


Figura 6.26 – Esquema da montagem dos ECs com FC: m , para CR = 10.

As Figuras 6.27 e 6.28 mostram, respectivamente, o efeito do número de ECs inseridos sobre o tempo de injeção da resina e a quantidade de massa de resina desperdiçada no processo, para CR = 10, obtido com as estratégias de construção baseadas em FC: R , FC: t e FC: m . Analogamente aos resultados obtidos para CR = 5, as Figs. 6.27 e 6.28 mostram que, para CR = 10, as FC baseada nos indicadores de performance levaram aos melhores resultados dos próprios indicadores. Analisando o efeito do número de ECs (ou magnitude de ϕ) nos indicadores de performance, os resultados da Fig. 6.27 indicam que, conforme esperado, o tempo de injeção é minimizado para as maiores magnitudes de N (ou ϕ). Comparando o desempenho das diferentes técnicas construtivas estudadas, para $N = 20$, a FC: t conduziu a resultados 174% e 137% superiores a FC: m e FC: R , respectivamente. A FC: R

apresentou um desempenho intermediário, sendo os resultados de t cerca de 15% superior aos encontrados com a FC: m .

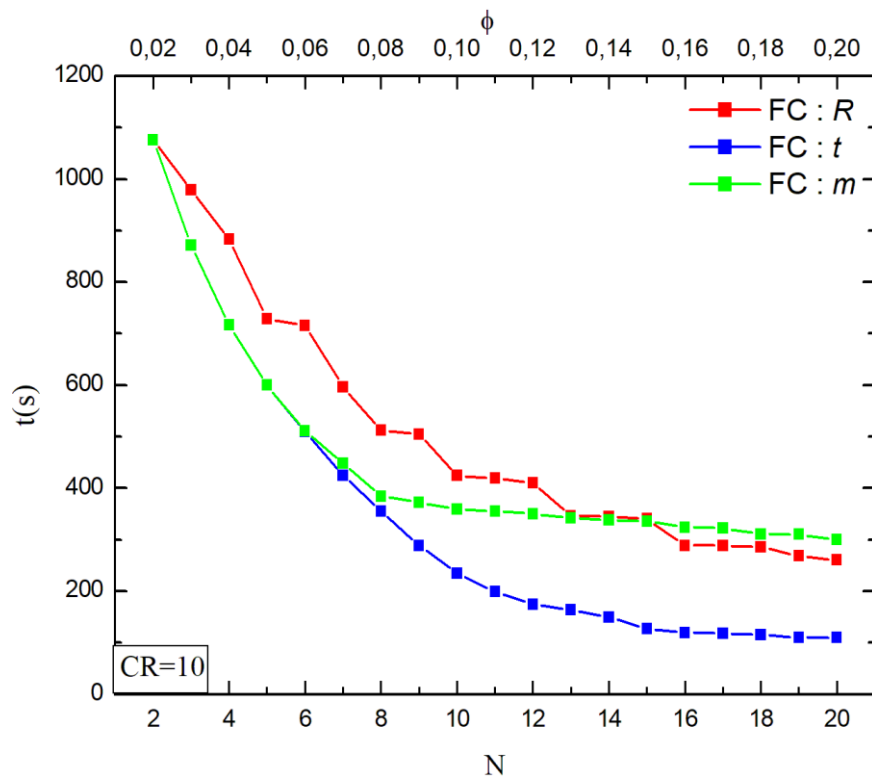


Figura 6.27 – Comparação entre o desempenho de t obtido com as FC: R , t e m , para $CR = 10$.

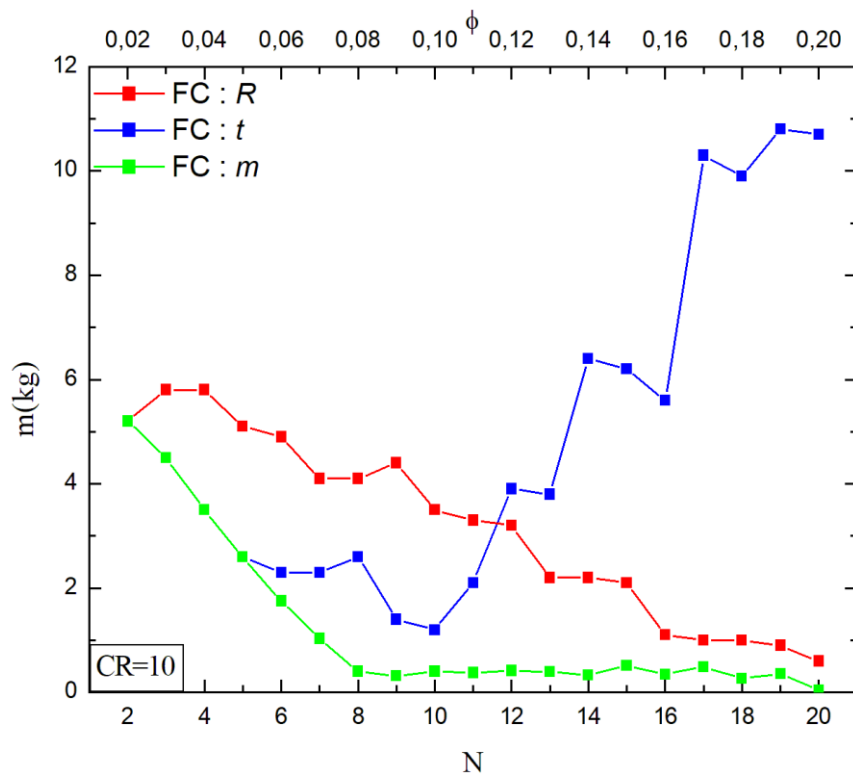


Figura 6.28 – Comparação entre o desempenho de m obtido com as FC: R , t e m , para $CR = 10$.

Analisando o efeito do número de ECs (ou magnitude de ϕ) sobre m , os resultados da Fig. 6.28 indicam que, a performance de m tem a mesma tendência para as FC: R e FC: m , com diferentes magnitudes, sendo que os melhores resultados foram alcançados para os maiores valores de N . Essa tendência muda para a FC: t , uma vez que m é minimizada até $N = 10$ ou $\phi = 0,1$ e partir deste valor ocorre um aumento muito significativo na magnitude de m , sendo que os maiores valores de N levaram aos piores resultados. Por exemplo, para $N = 20$, a FC: m conduziu a resultados cerca de 240 e 13 vezes superiores a FC: t e FC: R , respectivamente. A FC: R apresentou um desempenho intermediário, sendo os resultados de m cerca de 18 vezes superiores aos encontrados com a FC: t .

Quando comparado às diferentes resoluções (CR = 5 e 10) os resultados mostraram que o tamanho dos ECs teve grande influência no desempenho de t com a FC: t , sendo que, para CR = 10, as configurações ótimas são 67% melhores do que para CR = 5. Já para FC: R e FC: m a CR não teve influência significativa nos resultados de t . Analisando a influência de CR sobre m para as estratégias de construção estudadas, para $\phi = 0,2$, observou-se que para FC: R o desempenho do sistema é melhorado em cerca de 362% com o aumento da resolução do domínio. Já para FC: t o aumento da resolução não levou a melhores resultados de m , uma vez que fornecida maior liberdade para a formação da geometria do canal de injeção, as construções com essa FC levaram a uma maior ramificação de canais secundários na direção y , fazendo com a resina chegasse na região de saída antes de preencher todo molde, causando maior desperdício. Para FC: m o aumento em CR melhorou em cerca de 16% o desempenho de m , porém não influenciou no design dos canais de injeção.

Para ilustrar o comportamento transiente do escoamento de resina no molde, a Fig. 6.29 mostra a distribuição da fração volumétrica da resina em função do tempo para a construção geométrica com maior número de ECs, $N = 20$ e $\phi = 0,2$, para as três técnicas de construção abordadas. Os campos de fração volumétrica são apresentados para os seguintes instantes de tempo: $t = 30$ s, 60 s e 90 s, respectivamente. Na Fig. 6.29 (a) é possível notar que há um avanço maior da resina na direção x (do centro para a periferia do meio poroso) em comparação ao avanço na direção y . Na Figura 6.29 (b) observa-se um padrão de avanço majoritário na direção y , levando ao menor tempo de preenchimento, mas, porém, ao aumento significativo do desperdício de resina. Já a Figura 6.29 (c) mostra que o escoamento da resina é retilíneo, o que acaba retardando o avanço da resina ao longo do tempo, mas, por outro lado, contribui para o não desperdício de resina no processo, uma vez que a resina só alcança a região de saída com o molde praticamente preenchido.

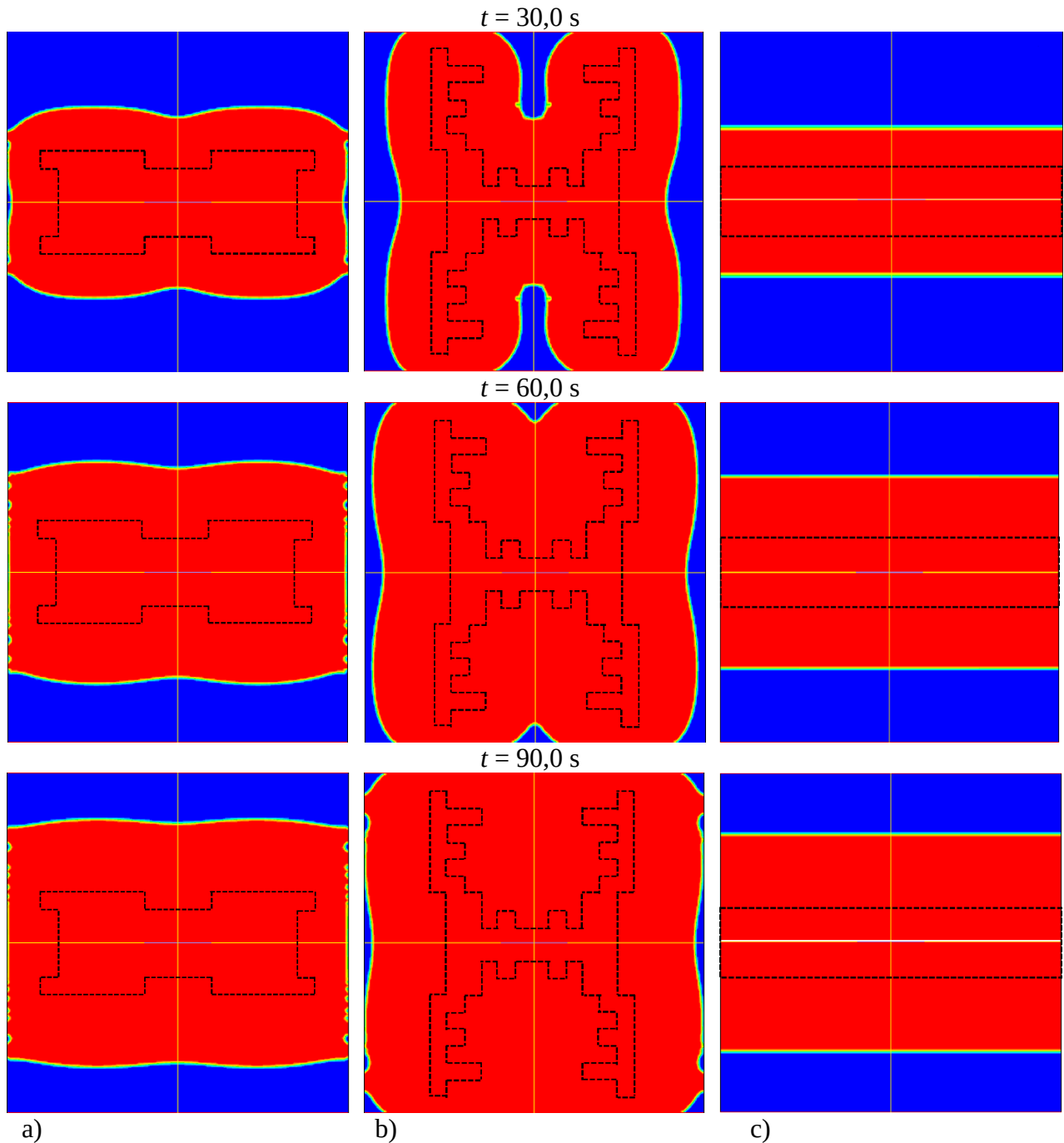


Figura 6.29 – Posição da linha de frente do escoamento de resina para três instantes de tempo, $CR = 10$ e $N = 20$, para as três estratégias de construção: a) FC: R , b) FC: t e c) FC: m .

Analisando as estratégias de construção propostas, tem-se que as metodologias com FC: R e FC: m conduziram uma redução simultânea dos dois indicadores de performance no decorrer da evolução da construção geométrica dos canais de injeção. Por outro lado, quando analisado os indicadores de forma individual, as funções de construção a partir do próprio indicador performance (FC: t e FC: m) melhoram significativamente o desempenho do indicador utilizado na FC. Dessa forma o problema deve ser analisado de uma perspectiva mais próxima do real, levando em

consideração os objetivos do construtor. Em síntese, do ponto de vista de aplicação computacional a técnica de FC: *R* permite uma redução do tempo de processamento, pois requer menos casos a serem simulados. Já a FC: *m* levou à configuração indicada na literatura em casos de pequenas infusões (utilização de um canal principal). Em casos de grandes aplicações industriais vale a pena uma investigação aprofundada da técnica FC: *t*, uma vez que o design dos canais de injeção aparece com vários *branches* (canais secundários). Para se ter um panorama da similaridade dessa técnica com o processo de LRI em estruturas de grande porte, a Fig. 6.30 ilustra a duplicação do molde simulado e os canais de injeção formado com a FC: *t*, Fig. 6.30 (a), e a ilustração do processo industrial de infusão de um casco de barco, Fig. 6.30 (b). Percebe-se que a Fig. 6.30 (a) é a representação de um modulo da estrutura ilustrada na Fig. 6.30 (b), indicando que técnica de construção com a FC: *t* pode ser muito promissora para aplicações em estruturas com geometrias grandes e complexas.

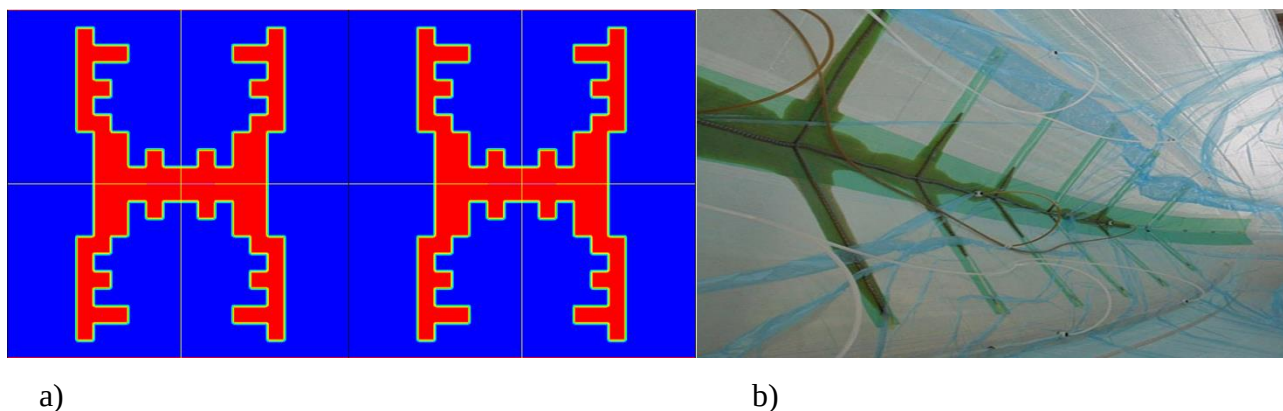


Figura 6.30 – Similaridade da técnica utilizando a FC: *t* com o processo de LRI em estruturas de grande porte.

6.6 Avaliação do efeito da razão geométrica H/L

A fim de analisar a metodologia de construção para outras condições de restrição do problema e investigar ainda mais a estratégia com FC: *t*, avaliou-se o efeito da razão geométrica H/L sobre os indicadores de performance estudados e sobre a configuração geométrica dos canais de injeção. Além da razão geométrica $H/L = 1,0$, Fig. 4.1, estudada a priori, avaliou-se as razões geométricas $H/L = 0,5$, Fig. 4.4 (a) e $H/L = 2,0$, Fig. 4.4 (b). Destaca-se que as condições de contorno e físicas do problema permaneceram as mesmas definidas anteriormente. Para efeito de comparação alguns critérios foram estabelecidos, como por exemplo, a área total do molde foi mantida constante, a magnitude da entrada da resina no molde não sofreu alterações significativas, a discretização da região dos ECs permaneceu como sendo elementos quadrados e a construção dos canais de injeção ficou restrita a uma área de ocupação máxima de $\phi_{max} = 0,2$ para todos os casos.

Neste sentido, para o caso $H/L = 0,5$, onde a placa tem comprimento $L = 2H$ e largura H , Fig. 4.4 (a), o domínio possui 20×10 divisões onde os elementos de canais de injeção podem ser posicionados. Para manter a magnitude da entrada da resina no molde, o processo começou com a geometria elementar contendo $N = 3$ ECs. Aqui, foi necessário montar 40 elementos para a construção do canal de injeção da resina, considerando a área de ocupação máxima do canal de injeção de $\phi_{max} = 0,2$. Foram necessárias 832 simulações aplicando a FC: t de forma a rastrear a configuração geométrica que levou à minimização do tempo de infusão dentre todas as possibilidades de evolução para os canais de injeção.

A Figura 6.31 mostra as configurações da geometria em cada etapa de crescimento do canal de injeção, ilustrando o crescimento da geometria do canal para $H/L = 0,5$. Em termos de construção da forma, os resultados indicaram que até $N = 16$ as etapas de crescimento levaram a um canal de injeção principal na direção x . Para $N > 16$, pode-se observar canais secundários sendo adicionados primeiramente nas extremidades do canal principal, depois na região central, e ramificados ao longo do comprimento do canal principal. É possível notar ainda, uma variação no comprimento e as distâncias entre os canais secundários e o canal principal de forma a otimizar o avanço da resina com a geometria $H/L = 0,5$ e a FC: t .

No caso, $H/L = 2,0$, a placa tem comprimento L e largura $H = 2L$, Fig. 4.4 (b), com 10×20 divisões onde os ECs formadores dos canais de injeção podem ser montados. De maneira análoga ao caso $H/L = 0,5$, o processo de construção começou com a geometria elementar contendo $N = 3$ ECs e foram totalizadas 40 etapas para a construção do canal de injeção da resina. Neste processo de avaliação geométrica, realizou-se um conjunto de 1052 simulações. A Figura 6.32 ilustra a evolução geométrica do canal de injeção, para $H/L = 2,0$. Em termos de configuração geométrica, os resultados indicaram que a partir da construção elementar, existe uma bifurcação do canal na direção y , com uma configuração semelhante a uma forma de H . A partir de $N = 10$ nota-se o surgimento de canais secundários ao canal principal. Com a evolução da construção geométrica dos canais de injeção, observa-se ainda que a ramificação dos canais secundários avança na direção y até a restrição imposta ao limite superior de ocupação dos canais de injeção. Com a restrição de liberdade em evoluir na direção de saída, é explorado a ramificação dos canais de injeção perpendicular a essa direção, evoluindo para uma configuração em forma de H , porém mais complexa, com uma inclinação dos canais próximos às superfícies de saída.

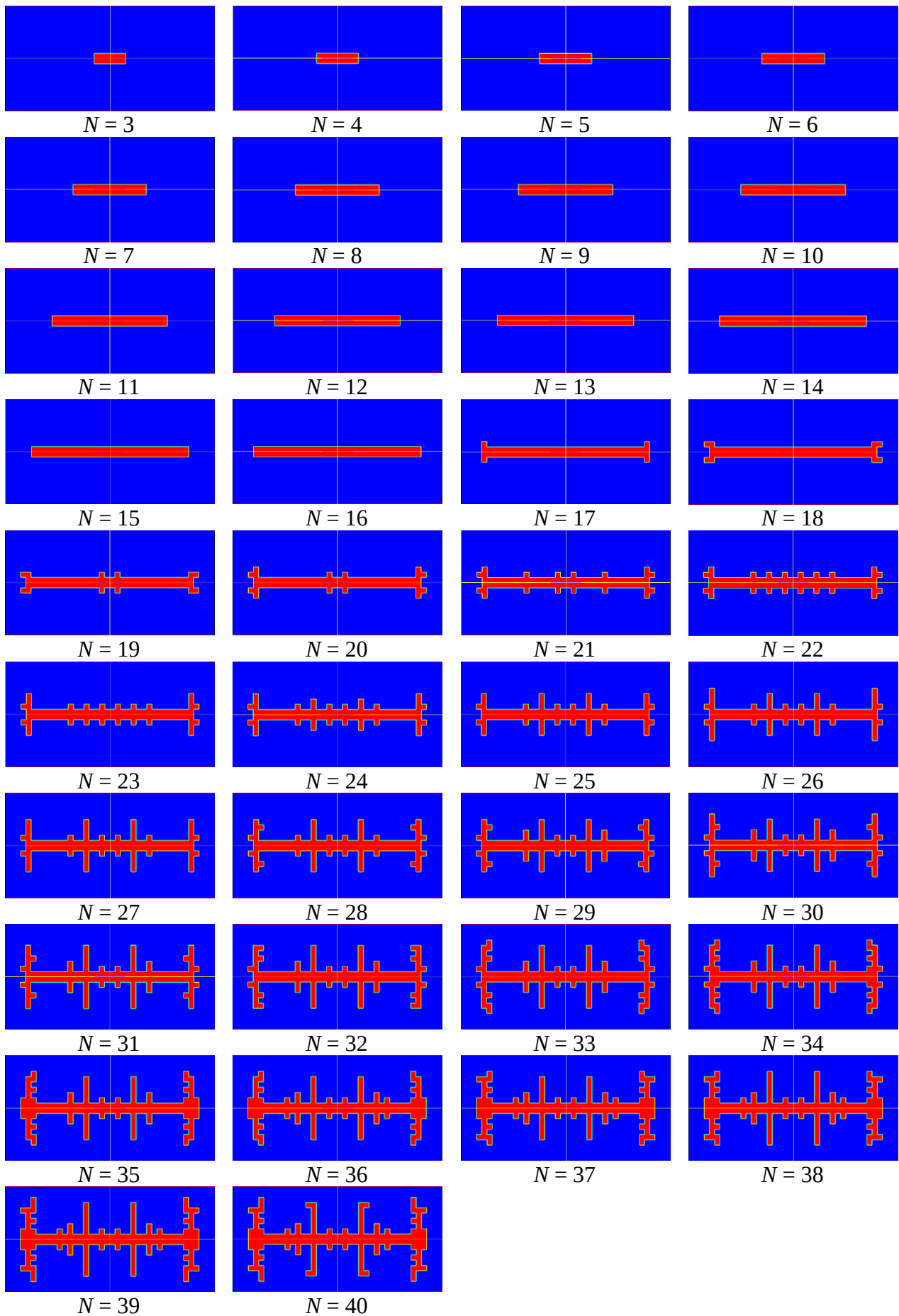


Figura 6.31 – Esquema da montagem dos ECs com FC: t , para $H/L = 0,5$.

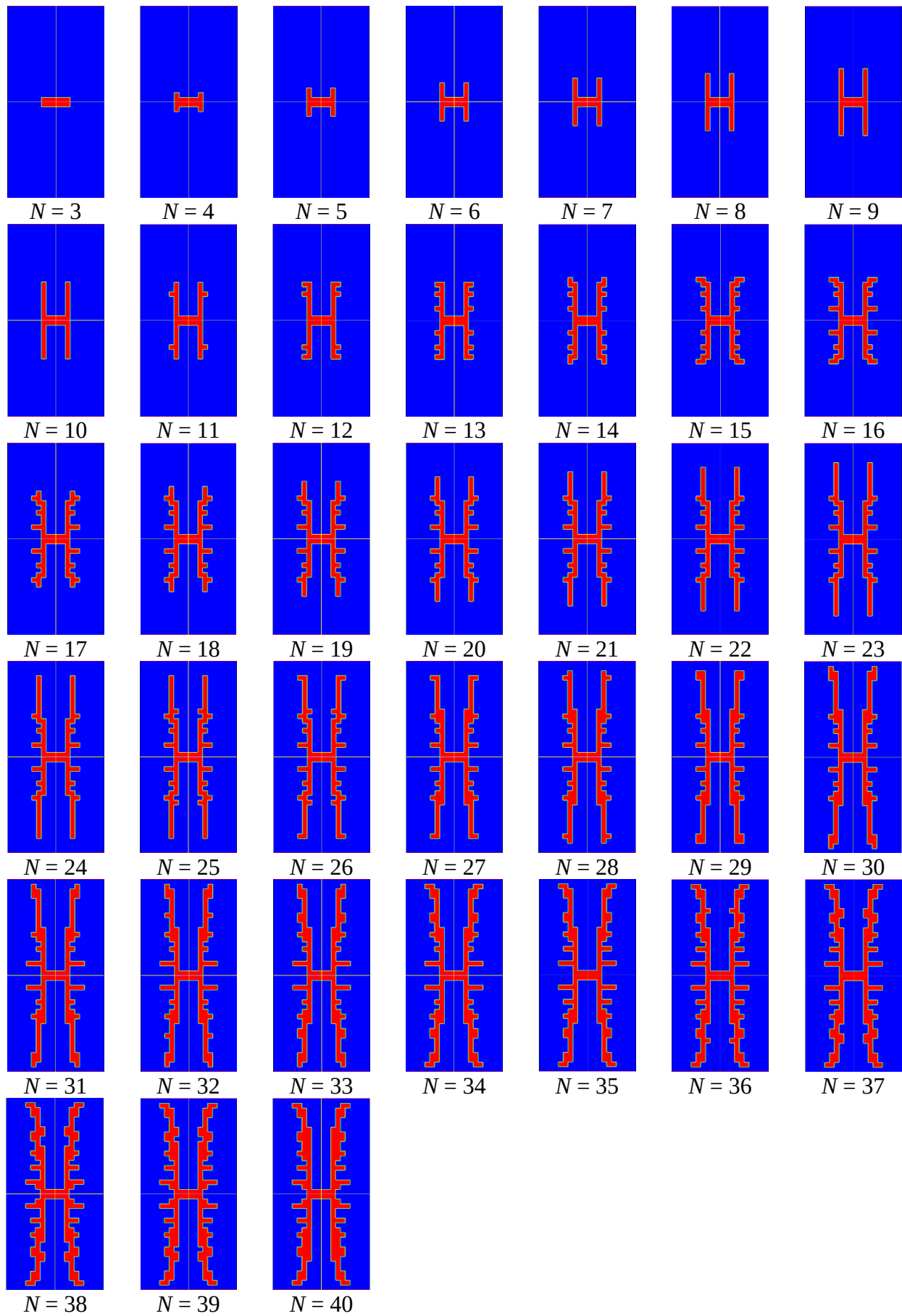


Figura 6.32 – Esquema da montagem dos ECs com FC: t , para $H/L = 2.0$.

As Figuras 6.33 e 6.34 ilustram, respectivamente, o efeito da fração de área ϕ sobre o tempo (t) de preenchimento para impregnação da resina no domínio poroso e a quantidade de massa (m) de resina desperdiçada no processo, para $H/L = 0,5, 1,0$ e $2,0$, obtido com FC: t . De uma forma geral, os resultados mostram que a razão $H/L = 0,5$ conduziu aos melhores resultados para os maiores valores de ϕ , ou seja, existe uma minimização nos indicadores de performance quando o comprimento da placa é o dobro da largura. Observa-se ainda que, as razões $H/L = 1,0$ e $2,0$ tiveram a mesma tendência de comportamento. Na Figura 6.33, pode-se observar que o efeito de ϕ sobre t tem comportamento semelhante para todas as razões de H/L analisadas, sendo que os maiores valores de ϕ , conduziram aos melhores resultados de t , com vantagem de aproximadamente 58% e 18%, para $N = 20$, quando a FC: t é aplicada, no molde com $H/L = 0,5$ em comparação com $H/L = 1,0$ e $2,0$, respectivamente. O molde representado com $H/L = 2,0$ tem um desempenho de quase 34% superior ao representado por $H/L = 1,0$.

Analisando o efeito da magnitude de ϕ sobre m , os resultados da Fig. 6.34 indicam que, a performance de m não segue o mesmo padrão para as diferentes razões de H/L estudadas. Por exemplo, nota-se que para $H/L = 0,5$ há um decaimento de m quase assintótico até valores próximos de $\phi = 0,1$ e a partir deste valor de ϕ , existe uma variação nos valores de m , com um aumento significativo de sua magnitude. Para $H/L = 1,0$ os valores de m são minimizados de forma mais suave até $\phi = 0,1$ e partir deste valor também ocorre um aumento muito significativo na magnitude de m , sendo que os maiores valores de ϕ levaram aos piores resultados. Já para $H/L = 2,0$ os menores valores ϕ apresentaram os melhores resultados para m , com o aumento de ϕ acontece um aumento gradual de m , sendo que, de maneira análoga as razões $H/L = 0,5$ e $1,0$, os valores de m aumentam significativamente para $\phi > 0,1$. Observa-se então que $\phi = 0,1$ é uma referência no padrão de comportamento das razões geométricas avaliadas. Neste sentido, fazendo uma comparação, tem-se que para $\phi = 0,1$, a razão $H/L = 0,5$ levou a resultados de m cerca de 75% e 105% superiores a $H/L = 1,0$ e $2,0$, respectivamente.

Para contribuir com as observações levantadas a Fig. 6.35 ilustra os campos de pressão em função do tempo para as razões $H/L = 0,5, 1,0$ e $2,0$, respectivamente, para $\phi = 0,1$. Os campos de pressão são apresentados para os seguintes instantes de tempo: $t = 50$ s, 100 s e 150 s, respectivamente. Para mostrar a distribuição dos campos de pressões nas configurações mais complexas do canal de injeção a Fig. 6.36 ilustra os campos de pressão em função do tempo para $\phi = 0,2$ e as razões $H/L = 0,5, 1,0$ e $2,0$, respectivamente. Três diferentes instantes de tempo são apresentados ($t = 20$ s, 40 s e 60 s) para ilustrar o avanço do campo de pressão para os diferentes valores de H/L analisados.

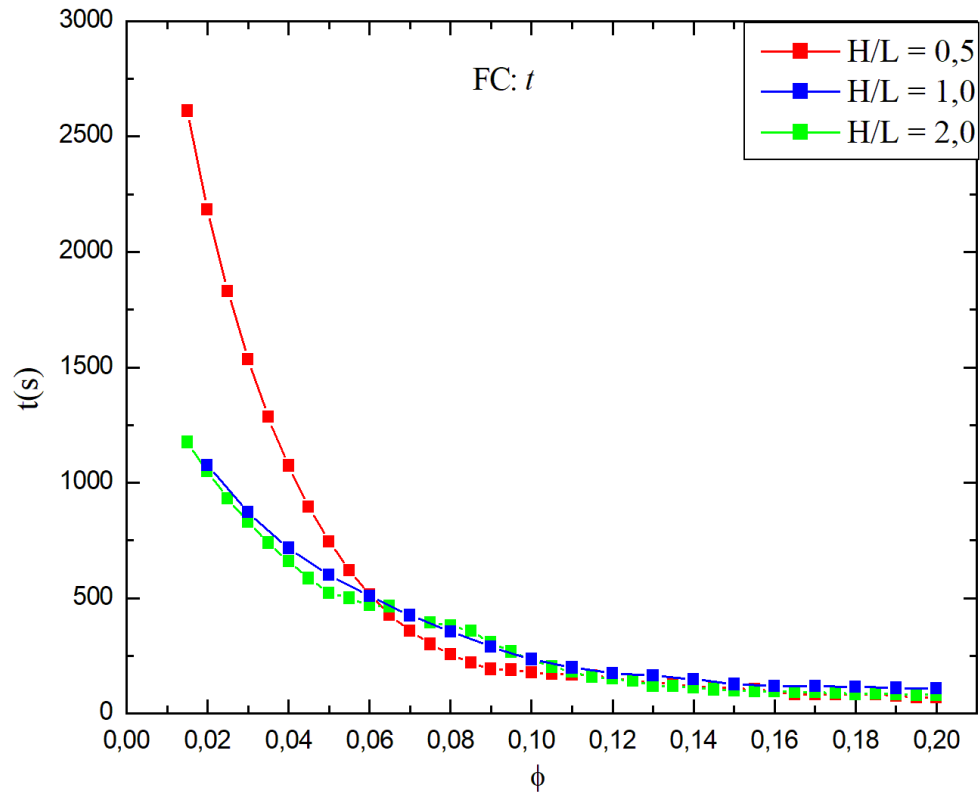


Figura 6.33 – Efeito de ϕ sobre t , para $H/L = 0,5$, $1,0$ e $2,0$.

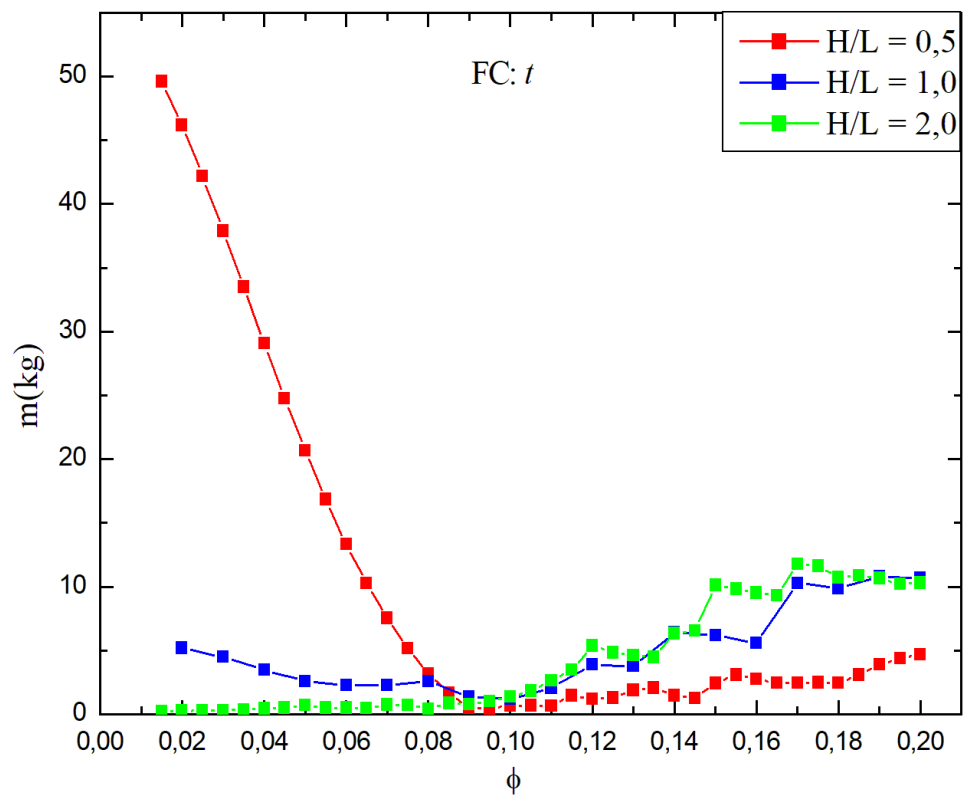


Figura 6.34 – Efeito de ϕ sobre m , para $H/L = 0,5$, $1,0$ e $2,0$.

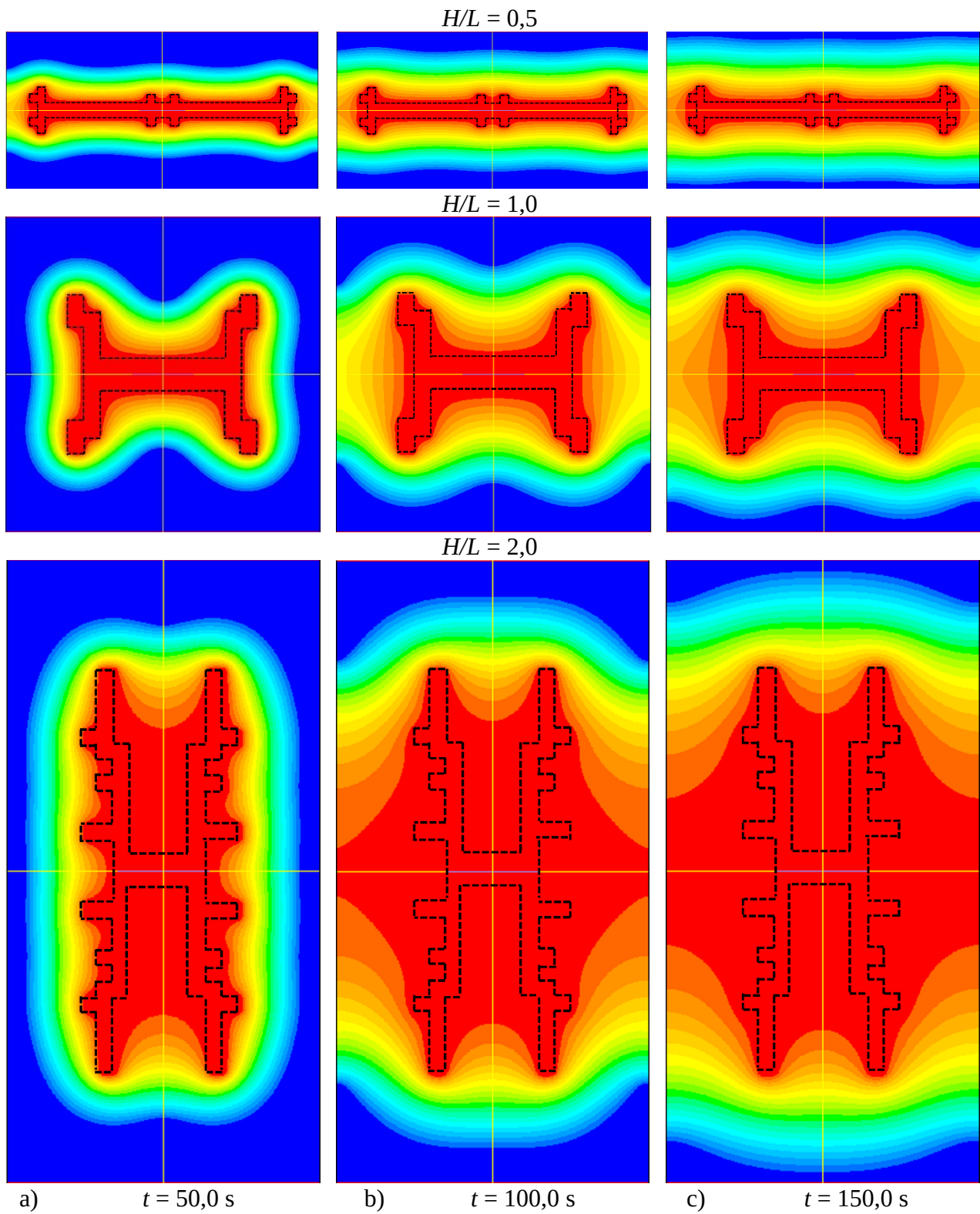


Figura 6.35 – Distribuição dos campos de pressão em função do tempo para as razões $H/L = 0,5$, $1,0$ e $2,0$, respectivamente, para $\phi = 0,1$: a) $t = 50,0$ s, b) $t = 100,0$ s e c) $t = 150,0$ s.

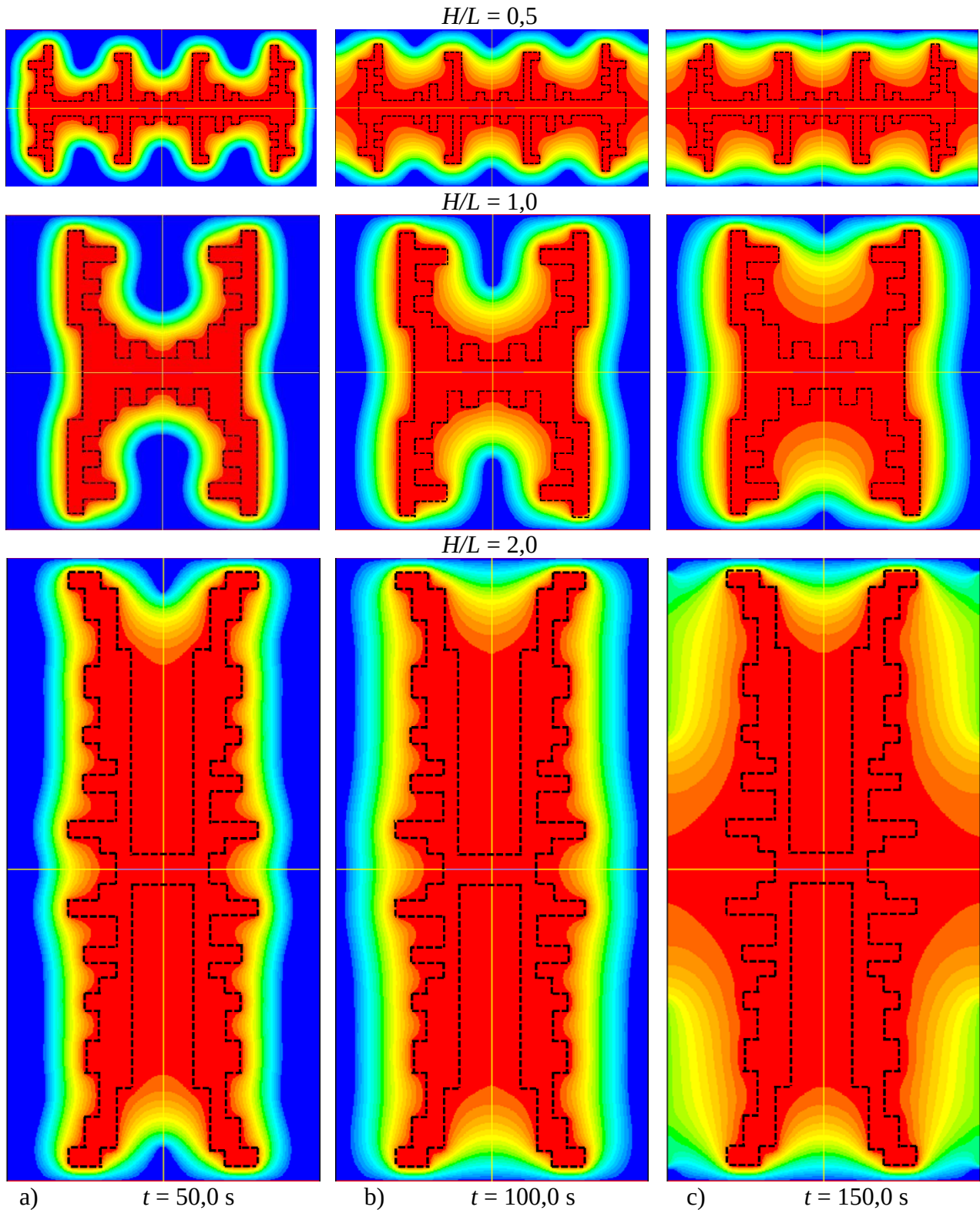


Figura 6.36 – Distribuição dos campos de pressão em função do tempo para as razões $H/L = 0,5$, $1,0$ e $2,0$, respectivamente, para $\phi = 0,2$: a) $t = 20,0$ s, b) $t = 40,0$ s e c) $t = 60,0$ s.

Nas Figuras 6.35 e 6.36 é possível notar que para $H/L = 0,5$ os campos de pressão se distribuem com maior intensidade na direção x e com o decorrer do tempo essa distribuição se torna uniforme em todo o molde. Já para $H/L = 1,0$ percebe-se que os campos de pressão ficam centralizados no domínio,

com a distribuição mais lenta ao longo do tempo. Para $H/L = 2,0$ observa-se uma distribuição dos campos de pressão com avanço maior na direção y , por conta da geometria do canal de injeção, porém ao longo do tempo percebe-se uma concentração de pressão em x . Essas figuras também permitem observar que, para distribuir as pressões de forma mais homogênea, a formação dos ramos principais em forma de H tende a diminuir sua distância com o aumento da razão H/L .

Diante do exposto acima, a avaliação geométrica da estrutura do molde indica que o molde caracterizado pela razão $H/L = 0,5$ atende com maior eficiência o processo de LRI. Esse comportamento está de acordo com o estabelecido pelo princípio Construtal da ótima distribuição das imperfeições uma vez que os campos de pressão se distribuem de forma mais homogênea no domínio. Além disso, a metodologia desenvolvida para a configuração geométrica dos canais de injeção permitiu definir fisicamente a posição dos canais de injeção secundários, o que até então era definido apenas teoricamente, conforme exemplifica a Fig. 2.5.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho propôs o desenvolvimento de uma metodologia, baseada na Teoria Construtal, onde a configuração geométrica dos canais de injeção, no processo de infusão de resina líquida, cresce a partir de uma construção elementar utilizando funções de construção baseadas na resistência ao escoamento de resina e nos próprios indicadores de performance. Os resultados mostraram que as técnicas construtivas desenvolvidas a partir da Teoria Construtal são bastante promissoras para obter um melhor desempenho fluidodinâmico do problema, minimizando o tempo de injeção, o desperdício de resina e auxiliando na compreensão sobre a construção do design de um ponto para um volume a partir de um princípio físico.

Em um primeiro momento investigou-se a influência de duas diferentes condições de contorno sobre a construção do canal de injeção e sobre os indicadores de performance, com a FC: R . Para ambas as condições de contorno investigadas, as configurações mais complexas (com $N = 5$ elementos do canal de injeção inseridos) levaram ao melhor desempenho para redução do tempo (t) de infusão e da massa (m) de resina desperdiçada. A diferença de desempenho entre as melhores e piores formas foram consideráveis, independentemente do indicador de performance considerado. Além disso, o efeito de N sobre t foi bastante semelhante para ambas as condições de contorno, enquanto o efeito de N sobre m foi afetado pela condição de contorno, mostrando a importância da definição do caso e escolha do indicador de performance para geração de design. Os resultados também demonstraram que o uso das paredes laterais diminuiu significativamente o tempo de preenchimento do molde e a massa desperdiçada, sendo assim, adotou-se esse tipo de condição de contorno para os demais estudos realizados no presente projeto.

Para refinar o número de ECs utilizados na construção geométrica do canal de injeção da resina, avaliou-se a influência da Resolução do Canal (CR) sobre o Design gerado e sobre os indicadores de performance. Os resultados, em termos de construção do design, mostraram que a geometria mais complexa conduziu a um melhor desempenho do processo LRI, ou seja, os melhores resultados foram quando a geometria dos canais de injeção teve maior liberdade para evoluir, i.e., para $CR = 10$. Esse comportamento está de acordo com o estabelecido pelo princípio Construtal da ótima distribuição das imperfeições. Os resultados demonstraram ainda que o efeito de CR sobre o tempo de infusão não teve uma variação grande, no entanto sobre a massa de resina desperdiçada foi bastante influente, o que indica futuros estudos com CRs maiores.

Quando comparada à montagem de novos elementos em pontos adjacentes aos canais de injeção com maior ou menor resistência ao escoamento, os resultados comprovaram que os novos canais devem ser inseridos nas regiões de menor resistência no intuito de maximizar o acesso do

escoamento de resina ao longo do meio poroso, ou seja, a inserção dos novos ECs, que constroem os canais de injeção, nas regiões de menor resistência levou ao melhor desempenho dos indicadores de performance analisados (t e m). Os resultados estão de acordo com os princípios da Teoria Construtal, que afirma que o sistema deve se expandir com resistência mínima.

Para uma avaliação completa do algoritmo de construção proposto, o presente trabalho associou o uso da Teoria Construtal com a função de construção baseada nos próprios indicadores de performance e realizou a construção testando todas as possibilidades de montagem de novos canais vizinhos a canais de injeção já existentes. Os resultados mostraram que o desempenho, em termos de indicadores de performance e arranjos geométricos, é diferente para as distintas metodologias analisadas. Esse fato pode ser explicado por FC: R ser baseada em condições locais do escoamento de resina. A metodologia com a FC: t permitiu a obtenção de menores tempos de infusão, já a FC: m levou aos melhores resultados para m (para os CR estudados) indicando que a construção do Design usando o próprio indicador de performance pode ser uma técnica promissora a depender do objetivo principal do construtor. Ressalta-se que de todas as estratégias de construção utilizadas a com FC: t levou a uma configuração geométrica dos canais de injeção mais próxima do que é utilizado industrialmente em processos com grandes infusões.

Com o intuito de explorar ainda mais o algoritmo de construção e estudar a estrutura do molde para processos LRI, avaliou-se o efeito da razão geométrica H/L sobre os indicadores de performance e sobre a configuração geométrica dos canais de injeção, utilizando a FC: t . A avaliação geométrica da estrutura do molde indicou que a menor razão analisada ($H/L = 0,5$) atende com maior eficiência o processo de LRI e reforça a importância do emprego de uma metodologia para avaliação geométrica desse tipo de problema.

De forma geral, a aplicação da Teoria Construtal demonstrou que os canais de injeção podem ser construídos a partir de uma configuração elementar e evoluir para uma geometria ramificada, indicando a posição de cada ramo dos canais de injeção de acordo com um princípio físico. Os resultados também evidenciaram que a metodologia é eficiente para prever a configuração geométrica de canais de baixa resistência sobre meios de elevada resistência, obtendo configurações de escoamentos de ponto para volume similares às observadas em sistemas naturais e que tem sido relatados na literatura (BEJAN, 2016, 2020). Para finalizar, a técnica também se mostrou eficiente em demonstrar a construção de canais primários e secundários, similarmente às técnicas utilizadas na literatura, como exposto, por exemplo, na Fig. 2.5 e adaptar a construção para diferentes restrições do domínio, como pode ser visto para os diferentes valores de H/L estudados.

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

- analisar o que acontece com a configuração geométrica dos canais de injeção em termos de FC: R , t e m para CRs maiores, por exemplo, para $CR = 20$. Pretende-se então investigar se há tendência de alinhamento no padrão dos resultados ou se mantém diferenças importantes;
- avaliar o efeito de H/L utilizando as demais funções de construção, FC: R e FC: m ;
- associar alguma técnica de inteligência computacional (algoritmos genéticos, evolução diferencial) para definir a montagem dos novos ECs, especialmente com o avanço do número de possibilidades de montagem para as configurações mais complexas;
- ampliar a abrangência do estudo desenvolvido aqui para moldes tridimensionais, explorar a Teoria Construtal com o mecanismo de FC e analisar o comportamento fluidodinâmico do problema, bem como os indicadores de performance e o design geométrico gerado, permitindo então fazer comparações com observações obtidas com moldes bidimensionais.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ADHIKARI, D.; GURURAJA, S. G.; HEMCHANDRA, S. Resin infusion in porous preform in the presence of HPM during VARTM: Flow simulation using level set and experimental validation. **Composites Part A**, v. 151, p. 1–14, 2021.

ANSYS, INC. **ANSYS Fluent User's Guide**. Technology Drive, 2013.

AVENDAÑO, P. A.; SOUZA, J. A.; ADAMATTI, D. F. Construction of conductive pathways using Genetic Algorithms and Constructal Theory. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 134, p. 200–207, 2018.

BEJAN, A. **Shape and Structure, from Engineering to Nature**. New York: Cambridge University Press, 2000.

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

BEJAN, A. **The physics of life, the evolution of everything**. New York City: St. Martins Press, 2016.

BEJAN, A. **Freedom and evolution: hierarchy in nature, society, and science**. Switzerland: Springer Nature, Cham, 2020.

BEJAN, A.; LORENTE, S. **Design with Constructal Theory**. Hoboken, N.J, USA: John Wiley & Sons, 2008.

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

BEJAN, A.; LORENTE, S. Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society. **J. Appl. Phys.**, v. 113, p. 151301, 2013.

BEJAN, A.; MERKX, G. W. **Constructal Theory of Social Dynamics**. Berlin, Germany: Springer, 2007.

BEJAN, A.; ZANE, P. **Design in Nature, How the Constructal Law Governs Evolution in Biology, Physics, Technology, and Social Organization**. 1. ed. New York, NY, USA: Doubleday, 2012.

BERTLING, D.; KAPS, R.; MULUGETA, E. Analysis of dry-spot behavior in the pressure field of a liquid composite molding process. **CEAS Aeronaut J**, p. 577–85, 2016.

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.

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

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: [s.n.].

ERRERA, M. R.; BEJAN, A. Deterministic Tree Networks for River Drainage Basins. **Fractals**, v. 06, n. 03, p. 245–261, set. 1998.

FEIJÓ, B. C.; LORENZINI G.; ISOLDI L. A.; ROCHA L. A. O.; GOULART J. N. V.; DOS SANTOS E. D. Constructal design of forced convective flows in channels with two alternated rectangular heated bodies. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 125, p. 710–721, 2018.

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

GAJJAR, T.; SHAH D. B.; JOSHI S. J.; PATEL K. M. Analysis of Process Parameters for Composites Manufacturing using Vacuum Infusion Process. **Materials Today: Proceedings**, v. 21, n. Part 2, p. 1244–1249, 2020.

GENG, Y.; JIANG, J.; CHEN, N. Local impregnation behavior and simulation of non-crimp fabric on curved plates in vacuum assisted resin transfer molding. v. 208, p. 517–524, 2019.

GOMES, P. P.; FERRO, O. A. G.; REZENDE, M. C. Rezende, M.C. Experimental characterization and simulation of VARTM process to obtain carbon/epoxi composites. **In Proceedings of the 1st Brazilian Conference on Composite Materials (BCCM1)**, p. 16–19, jul. 2012.

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.

GROSSING, 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**, 2016.

HAJMOHAMMADI, 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 the dynamics of free boundaries. **J Comput Phys**, v. 39, p. 201–225, 1981.

HU, W.; CENTEA, T.; NUTT, S. Effects of material and process parameters on void evolution in unidirectional prepreg during vacuum bag-only cure. **Journal of Composite Materials**, v. 54 (5), p. 633–645, 2020.

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. **J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.**, 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 light resin transfer molding (LRTM) manufacturing process. In **Proceedings of the 22nd ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM)**, p. 3–7, nov. 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.

LIMA, J. P. S.; CUNHA M. L.; DOS SANTOS E. D.; ROCHA L. A. O.; REAL M. V.; ISOLDI L. A. Constructal Design for the ultimate buckling stress improvement of stiffened plates submitted to uniaxial compressive load. Engineering Structures. **Engineering Structures**, v. 203, p. 109883, 2020.

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

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

LUO, J.; LIANG, Z.; ZHANG, C.; WANG, B. Optimum tooling design for resin transfer molding with virtual manufacturing and artificial intelligence. **Composites: Part A**, v. 32, p. 877–888, 2001.

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.

MAGALHÃES, G. M. C.; LORENZINI, G.; NARDI, M.G.; AMICO, S.C.; ISOLDI, L.A.; ROCHA, L.A.O.; SOUZA, J.A.; DOS SANTOS, E.D. Geometrical evaluation of a resin infusion process by means of constructal design. **Int. J. Heat Technol**, v. 34, p. S101–S108, 2016.

MAGALHÃES, G. M. C.; FRAGASSA, C.; LEMOS, R. de L.; ISOLDI, L.A.; AMICO, S.C.; ROCHA, L.A.O.; SOUZA, J.A.; DOS SANTOS, E.D. Numerical Analysis of the Influence of Empty Channels Design on Performance of Resin Flow in a Porous Plate. **Appl. Sci.**, v. 10, p. 4054, 2020.

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

MARDANPOUR, P.; IZADPANAH E; POWELL S; RASTKAR S; BEJAN A. Inflected wings in flight: uniform flow of stresses makes strong and light wings for stable flight. **Journal of Theoretical Biology**, v. 508, p. 110452, 2021.

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

MATHUR, R.; ADVANI, S. G.; FINK, B. K. Use of genetic algorithms to optimize gate and vent locations for the resin transfer molding process. **Polym. Compos.**, v. 20, p. 167–178, 1999.

MATSUZAKI, R.; KOBAYASHI, S.; TODOROKI, A.; MIZUTANI, Y. Flow control by progressive forecasting using numerical simulation during vacuum-assisted resin transfer molding. **Composites: Part A**, v. 45, p. 79–87, 2013.

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.

NASSEH, J. **Processo de Infusão a Vácuo em Composites**. 1ª edição ed. Rio de Janeiro, Brasil: Barracuda Advanced Composites, 2021.

NUNES, B. R.; RODRIGUES M. K.; ROCHA L. A. O.; LABAT M.; LORENTE S.; DOS SANTOS E. D.; ISOLDI L. A.; BISERNI C. Numerical-analytical study of Earth-air heat exchangers with complex geometries guided by construal design. **International Journal of Energy Research**, v. 45, p. 7157–18, 2021.

OOSTEROM, S.; ALLEN, T.; BATTLE, M.; BICKERTON, S. An objective comparison of common vacuum assisted resin infusion processes. **Composites Part A**, v. 125, p. 105528, 2019.

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 tranfer in three-dimensional parabolic flows. **Int. J. Heat Mass Transfer**, v. 15, 1972.

PEDROTI, V. A.; DE ESCOBAR C. C.; DOS SANTOS E. D.; SOUZA J. A. Thermal analysis of tubular arrangements submitted to external flow using constructal theory. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 111, p. 104458, 2020.

Physics, Biology and Economic Inequality, 3 fev. 2019. Disponível em: <<https://constructal.org/physics-biology-and-economic-inequality.html>>. Acesso em: 14 jan. 2021

PIERCE, R. S.; FALZON, B. G.; THOMPSON, M. C. A multi-physics process model for simulating the manufacture of resin-infused composite aerostructures. **Compos. Sci. Technol.**, v. 149, p. 269–279, 2017.

POODTS, E.; MINAK, G.; DOLCINI, E.; DONATI, L. FE analysis and production experience of a sandwich structure component manufactured by means of vacuum assisted resin infusion process. **Composites: Part B**, v. 53, p. 179–186, 2013.

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

ROCHA, L. A. O.; LORENTE, S.; BEJAN, A. Constructal Theory in Heat Transfer. **Handbook of Thermal Science and Engineering**, p. 1–32, 2017.

RUBINO, F.; CARLONE, P. A semi-analytical model to predict infusion time and reinforced thickness in VARTM and SCRIMP processes. **Polymers**, v. 11, p. 20, 2019.

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**. Cambridge, England: Woodhead Publishing Ltd, 1997.

SCHLICHTING, H. **Boundary Layer Theory**. 7th. ed. Nova York, USA: McGraw-Hill, 1979.

SHEVTSOV, S.; ZHILYAEV, I.; CHANG, S. H.; WU, J. K.; HUANG, J. P.; SNEZHINA, N. Experimental and numerical study of vacuum resin infusion for thin-walled composite parts. **Appl. Sci.**, v. 10, p. 1485–1510, 2020.

SHEVTSOV, S.; ZHILYAEV, I.; CHANG, S-H.; WU, J-K.; SNEZHINA, N.; HUANG, J-P. Two-stage numerical approach for reliable recognition of dry spots at the VAP infusion of large composite parts of complex shape. **Composite Structures**, v. 259, p. 113437, 2021.

SIRTAUTAS, J.; PICKETT, A. K.; GEORGE, A. Materials Characterisation and Analysis for Flow Simulation of Liquid Resin Infusion. **Appl Compos Mater**, v. 22, p. 323–341, 2015.

SRINIVASAN, V.; SALAZAR, A.J.; SAITO, K. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. **Appl Math Model**, v. 35, p. 3710–3730, 2011.

STRUZZIERO, G.; SKORDOS, A. A. Multi-objective optimization of Resin Infusion. **ADVANCED MANUFACTURING: POLYMER & COMPOSITES SCIENCE**, v. 5, p. 17–28, 2019.

TRINDADE, R. S.; RIBEIRO, A. C.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C. Experimental Investigation of Transverse Permeability Applied to Liquid Molding. **POLYMER COMPOSITES**, p. 1–9, 2019.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2^a ed. England: Pearson Education Limited, 2007.

VIANNA, J. C. B. et al. A new Constructal Theory based algorithm applied to thermal problems. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 126, p. 118–124, abr. 2018.

WANG, J.; SIMACEK, P.; ADVANI, S. G. Use of centroidal Voronoi diagram to find optimal gate locations to minimize mold filling time in resin transfer molding. **Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.**, v. 87, p. 243–255, 2016.

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.

WU, Z.; FENG H.; CHEN L.; XIE Z.; CAI C. Pumping power minimization of an evaporator in ocean thermal energy conversion system based on Constructal theory. **Energy**, v. 181, p. 974–984, 2019.

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.

ZHANG, X.; LORENTE, S. Invasion of a porous domain by a fluid network, a constructal perspective. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 137, p. 106278, 2022.