



Construção e Instrumentação de uma Unidade de Moldagem por Transferência de Resina (RTM)

João Victor Matos Cirilo
Nélio da Silva Rocha

Projeto Final de Curso

Orientadores

Verônica Maria de A. Calado, D.Sc
Rossana Odette Mattos Folly D.Sc
Andrea Valdman M.Sc

Outubro de 2013

CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DE UMA UNIDADE DE MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA (RTM)

João Victor Matos Cirilo
Nélio da Silva Rocha

Projeto Final de curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química,
como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Química.

Aprovado por:

Janaina Izabel da Silva de Aguiar, MSc.

Letícia Pedretti Ferreira, MSc.

Andréa Pereira Parente, Bac

Orientado por:

Verônica Maria de A. Calado, D.Sc

Rossana Odette Mattos Folly D.Sc

Andrea Valdman, M.Sc

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Outubro de 2013

Cirilo, João Victor Matos. Rocha, Nélio da S.

Construção e Instrumentação de uma Unidade de moldagem por transferência de resina (RTM)/ João Victor Matos Cirilo, Nélio da Silva Rocha. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2013.

viii. 75 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2013.

Orientadores: Andrea Valdman, Rossana Odette Mattos Folly e Verônica Maria de A. Calado.

1. RTM. 2. Sensor linear. 3. Moldagem Líquida. 4. Fibra de vidro. 5. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 6. Andrea Valdman. 7. Rossana Odette Mattos Folly. 8. Verônica Maria de A. Calado

À memória de minha mãe, anjo que passou em minha vida, conduziu-me e ascendeu, deixando em mim tudo o que sou.

À minha família pelo incentivo e apoio incondicional

“Admito: o homem é um animal essencialmente construtor, obrigado a se dirigir conscientemente para um fim qualquer; é um engenheiro. Deve, pois, constantemente traçar novos caminhos, não importa em que direções.”

— Fiodor Dostoiévsky, *Memórias do subsolo*.

“...and suddenly she began to sing. Keen, heart-piercing was her song as the song of the lark that rises from the gates of night and pours its voice among the dying stars, seeing the sun behind the walls of the world”

— J.R.R. Tolkien, *The Silmarillion*

AGRADECIMENTOS

A Deus por nutrir minha perseverança e lenir meu espírito.

À professora Verônica Calado por todo o suporte e encorajamento durante este trabalho, bem como durante suas disciplinas na graduação.

Às professoras Rossana Folly e Andrea Valdman pela atenção e solicitude.

Aos nossos pais, irmãos e familiares por todo amor, apoio, paciência e carinho com seus conselhos, ensinamentos e palavras de sabedoria.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho de qualquer forma em especial para Alex Carvalho e Leilane Cirilo.

Aos amigos, novos e de longa data, que me acompanharam em toda jornada.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DE UMA UNIDADE DE MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA (RTM)

João Victor Matos Cirilo
Nélio da Silva Rocha

Outubro, 2013

Orientadores: Prof^a. Verônica Maria de A. Calado, D.Sc
Prof^a. Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc
Prof^a. Andrea Valdman, M.Sc

A moldagem por transferência de resina (RTM) é o processo de moldagem líquida mais largamente usado. É um processo combinado que se adequa bem à produção de estruturas tridimensionais que possuam baixa tolerância ao erro nas dimensões de suas superfícies. Excelentes acabamentos são possíveis, podendo chegar-se ao espelhamento das peças. Este trabalho tem como objetivo construir, operar e instrumentar uma unidade capaz de produzir placas finas e espessas de material compósito. Foi desenvolvido um sistema de sensores para medir a diferença de potencial elétrico entre terminais constituídos por dois filamentos finos e paralelos de cobre para monitorar o escoamento de um fluido de teste no interior da cavidade do molde. Isso permite um maior controle dos parâmetros de injeção a fim de promover um escoamento ótimo, tal que garanta total preenchimento do molde produzindo assim, peças de qualidade elevada. Experimentos foram conduzidos para verificar a viabilidade tecnológica da utilização dos sensores. Para isso foram executados procedimentos para validação do sinal do sensor por meio da comparação com dados de um sistema de monitoração por imagens de uma câmera. Os experimentos produziram resultados satisfatórios e permitiram obter uma boa correlação entre as leituras do sensor e das capturas de imagem, o que mostra um alto potencial de aplicação do sistema em processos industriais. Verificou-se também a possibilidade da utilização do sensor para monitorar o processo de cura da resina pela medida de variação de temperatura no sensor e sua influência na diferença de potencial entre os filamentos.

ÍNDICE

	Página
Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - Processos de Fabricação de Compósitos	3
2.1 – Variações do processo RTM	11
2.1.1 – Moldagem por transferência de resina assistida por vácuo (VARTM)	11
2.2 - Parâmetros importantes no RTM	17
2.2.1 - Race-tracking	18
2.2.2 – Permeabilidade	20
2.2.2.1 - Fatores que influenciam no valor da permeabilidade	23
2.3 - Métodos de monitoramento da frente de escoamento em RTM	28
2.3.1 - Sensor Elétrico Linear	32
2.3.2 - SMARTweave™	33
2.4 - Tecnologia da preforma	34
2.4.1 - Fibras	35
2.4.2 - Fibra Tecida	36
2.4.3 - Fibra entrançada	37
2.4.4 - Fibra emaranhada não-tecida	38
2.5 - Fibra de Vidro	39
2.6 - Fluido de teste	
Capítulo 3	
Materiais e Metodologia	42
3.1 - Materiais	42
3.2 – Metodologia	43
3.2.1 - Experimento I - Determinação da ordem de grandeza da voltagem	44
3.2.2 - Experimento II - Correlação entre sinal do sensor e posição da frente de escoamento.	46
3.2.3 - Experimento III - Influência do espaçamento entre os filamentos do sensor	47
3.2.4 - Experimento IV - Monitoramento do aquecimento do sensor	47
3.2.5 - Experimento V - Monitoramento do resfriamento do sensor	49
3.2.6 - Experimento VI - Verificação do novo arranjo do sensor elétrico linear	50
3.2.7 - Experimento VII – Construção, operação e medidas de permeabilidade na unidade RTM	52
3.2.7.1 - Unidade de Processamento RTM	52
a) Mesa, fixação do molde e câmeras	52
b) Molde e sistema de injeção	54
c) Sistema de Instrumentação	57
3.2.7.2 – Procedimento	59
3.2.7.3 - Ajustes preliminares na unidade	60

Capítulo 4 - Resultados	62
4.1 – Experimento I - Determinação da ordem de grandeza da voltagem	62
4.2 - Experimento II - Correlação entre sinal do sensor e posição da frente de escoamento	67
4.3 - Experimento III - Influência do espaçamento entre os filamentos do sensor	70
4.4 - Experimento IV - Monitoramento do aquecimento do sensor	71
4.5 - Experimento V - Monitoramento do resfriamento do Sensor	74
4.6 - Experimento VI - Verificação do Novo Arranjo do Sensor Elétrico Linear	75
4.7 - Experimento VII – Construção, Operação e Medidas de Permeabilidade na Unidade RTM	77
Capítulo 5 - Conclusões e Sugestões	83
5.1 – Conclusões	83
5.2 – Sugestões para trabalhos futuros	84
Referências bibliográficas	85
Apêndices	90
Apêndice A1 – Tabela de resultados do experimento IV	90
Apêndice A2 – Tabela de resultados do experimento V	92
Apêndice A3 – Tabela de resultados do experimento VII	93

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Plásticos são usados há décadas na vida cotidiana. Eles possuem os mais variados usos, desde simples embalagens a peças em aviões e helicópteros. Graças à leveza e facilidade de processamento, há uma crescente demanda do uso de plásticos em novas utilizações. Entretanto, esses novos usos exigem propriedades mecânicas e estruturais que os plásticos, em geral, não possuem.

Foram então desenvolvidos materiais conhecidos como compósitos. Compósitos são materiais compostos por duas ou mais fases de substâncias diferentes. Na indústria de plásticos o termo se refere ao material constituído de uma fase dispersa ou reforço, normalmente fibras sintéticas ou naturais, e uma fase contínua ou matriz, constituída por alguma resina polimérica termoplástica ou termorrígida. O material resultante possui propriedades superiores em relação aos componentes que o constitui.

O uso de reforços na matriz polimérica ajuda a melhorar características do material como resistência ao impacto, resistência à tração, condutividade térmica e resistência a altas temperaturas. A melhoria em alguma propriedade depende basicamente da natureza do material da matriz, do reforço e, principalmente, da interação entre esses dois elementos. Uma ampla variedade de materiais podem ser usadas como reforço na fabricação de compósitos. Entre eles estão as fibras sintéticas, como fibras de vidro, fibras de carbono e

aramida, e fibras naturais, como juta, sisal e linho. As aplicações de compósitos incluem peças de asas de avião, carro, materiais balísticos e geradores de energia eólica. Os principais consumidores de materiais compósitos no Brasil em 2012 foram a construção civil (48% do volume de peças consumidas), e o setor de transportes (16%).

O setor de compósitos no Brasil registou um crescimento no ano de 2012 de 4,6% de faturamento comparando com o ano anterior. Porém o volume de matérias primas consumidas teve um decréscimo de 0,6%. A expectativa de faturamento para o ano de 2013 é de um aumento de 8,1%. O aumento do faturamento é decorrente do avanço de processos com maior desempenho e maior valor agregado (Revista Fator, 14/02/2013).

Dessa forma, os processos, especialmente os de injeção, microinjeção e moldagem por transferência de resina (RTM) passam por grandes inovações e têm peso significativo para a economia do setor.

Nesse contexto, os objetivos deste trabalho são:

- desenvolver um sensor capaz de monitorar o escoamento de resina no interior do molde e detectar variações de temperatura;
- monitorar o avanço da frente de escoamento por imagens;
- calcular valores de permeabilidade no plano por meio das imagens e da resposta do sensor.

Capítulo 2

Processos de Fabricação de Compósitos

Muitos processos foram desenvolvidos para a fabricação de compósitos. Esses processos devem levar em conta fatores como o tamanho, espessura e forma da peça a ser produzida. Os principais processos são:

- *Prepreg lay-up*;
- Enrolamento filamentar;
- *Wet lay-up*;
- *Spray-up*;
- Moldagem por compressão;
- Moldagem por injeção;
- Pultrusão;
- Moldagem líquida.

Prepreg lay-up é um processo que consiste no empilhamento de camadas de fibras, pré-impregnadas com resina, sobre um ferramental onde a peça adquire a forma desejada. As camadas devem ser empilhadas individualmente e na orientação correta até que se atinja a espessura desejada.

Uma bolsa de nylon é colocada sobre as camadas isolando a peça do meio externo formando uma bolsa. Dessa forma, vácuo pode ser aplicado na parte interna da bolsa para retirar o ar residual entre as camadas. O conjunto é

colocado em um forno onde o processo de cura da resina tem início. Ao final, a bolsa é retirada e a peça pronta é desmoldada.

Uma autoclave é usada quando um controle mais apurado da temperatura durante a cura e pressão sobre a preforma é requerido. Prensas também podem ser usadas quando peças de alta fração volumétrica de fibras são fabricadas.

O processo **Enrolamento Filamentar** (*Filament Winding*) produz peças compósitas em formas constituídas de sólidos de revolução como cilindros, anéis e cones. Filamentos contínuos de fibras, pré-impregnadas ou não, passam por um banho de resina, são agrupadas em feixes e são enroladas em um mandril rotatório que puxa o feixe de fibras e possui a forma básica da peça a ser fabricada. A cura da resina ocorre em forno ou autoclave (Figura 1).

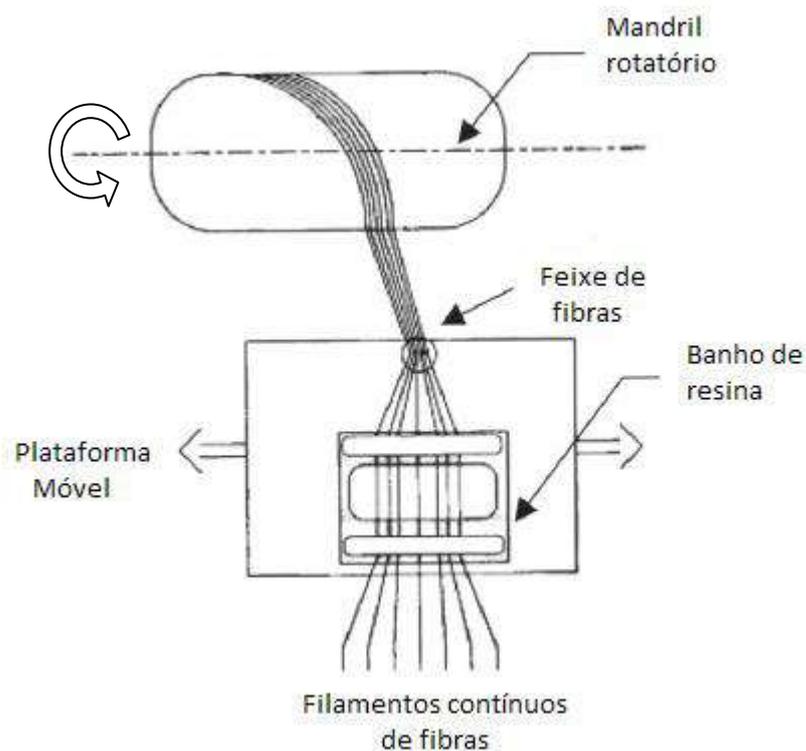


Figura 1: Processo de enrolamento filamentar, [Mantel, S.C. et al, 2000].

Wet lay-up é o nome dado ao processo de fabricação de laminados compósitos onde camadas de reforço seco são empilhadas e em seguida são banhadas por uma resina de baixa viscosidade com auxílio de rolos manuais. Os rolos auxiliam no espalhamento da resina sobre as fibras e na retirada do excesso de resina e ar entre as camadas. A compactação também é realizada pelos rolos. A cura dá em temperatura ambiente, com ou sem o auxílio de bolsas de vácuo para produzir peças de melhor qualidade.

No processo **Spray-up** apenas fibras cortadas, randomicamente orientadas, podem ser usadas. Rolos de fibras alimentam uma pistola que as corta em comprimentos pequenos. A pistola combina a fibra cortada com resina e ejeta a mistura em forma de *spray* em um molde (Figura 2). Após a aplicação do *spray*, rolos manuais são usados para compactar a peça. Ao final da cura a peça é desmoldada.

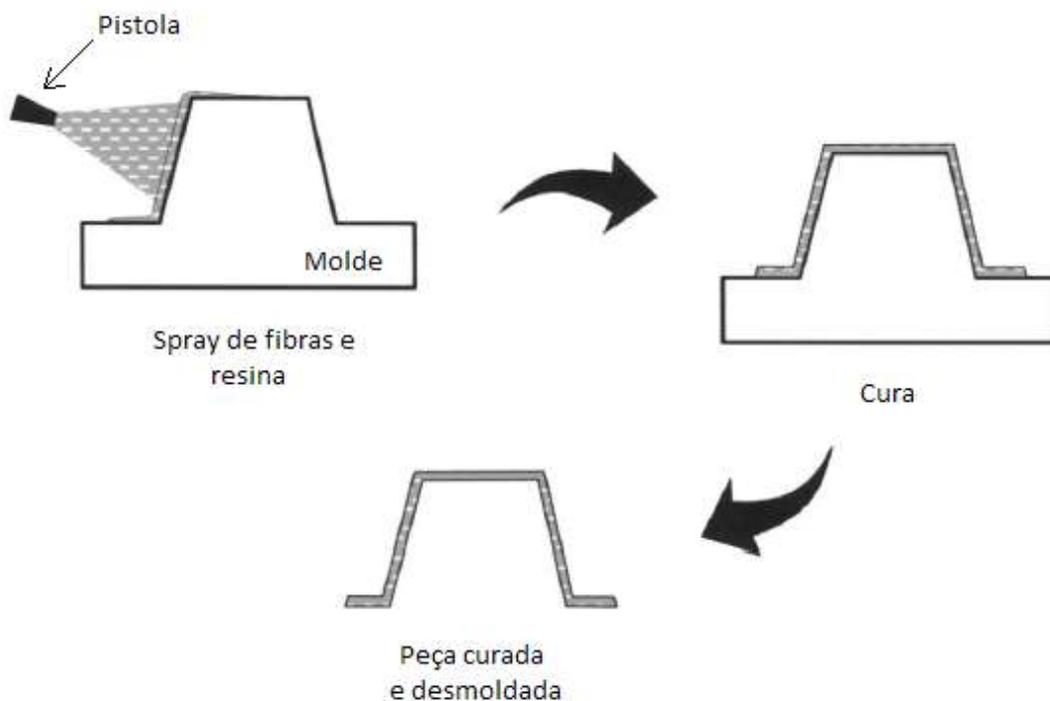


Figura 2: Processo Spray-up, [F.C. Campbell, 2004].

Outro processo comum na fabricação de materiais compósitos é a **Moldagem por compressão**. Nesse processo fibras curtas e orientadas de modo randômico são impregnadas com resina formando uma massa. Essa massa é posicionada entre duas metades correspondentes de um molde aberto. No fechamento, pressão é aplicada na massa, que é forçada a preencher toda a cavidade entre as metades do molde. Calor também pode ser aplicado e a cura é iniciada. Ao final o molde é aberto e a peça é retirada.

Na **Moldagem por injeção pellets** contendo resina termoplástica ou termorrígida e fibras cortadas em tamanhos pequenos são fundidos e depois injetados sob alta pressão em um molde. A cura ocorre no molde que depois é aberto e a peça é então ejetada.

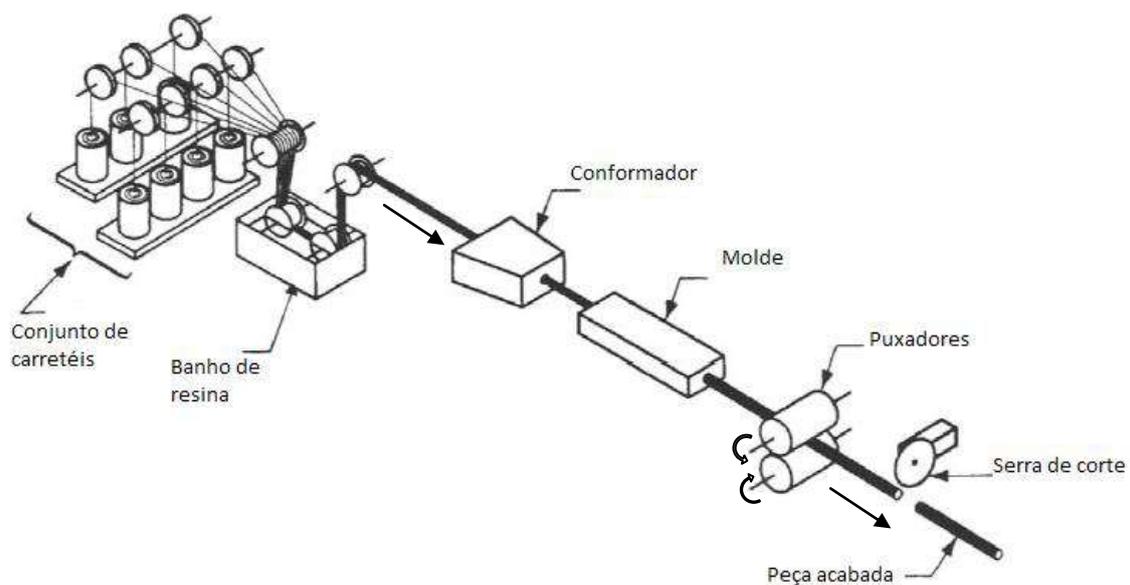


Figura 3: Esquema básico do processo de pultrusão. [A. Taylor, 2000].

A **Pultrusão** (Figura 3) é um processo capaz de produzir longas peças de seção reta constante. Filamentos de fibra passam por um banho de resina de rápida cura. Os filamentos são reunidos na forma desejada e então são

puxados para dentro de um molde onde é aquecido e onde o processo de cura ocorre. A peça curada é puxada para fora do molde onde é cortada no tamanho adequado.

A **Moldagem líquida** compreende uma gama de processos, entre os quais a Moldagem por Transferência de Resina (*Resin Transfer Moulding – RTM*) e sua variação, Moldagem por Transferência de Resina Assistida por Vácuo (*Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding - VARTM*), usada neste trabalho.

Moldagem líquida é um processo de fabricação de compósitos capaz de gerar peças extremamente complexas, dimensionalmente precisas e de grande tamanho. Uma das maiores vantagens da moldagem líquida é a redução da quantidade de peças necessárias para produzir objetos de grandes dimensões, já que, normalmente, um grande número de partes é fabricado individualmente, para depois formarem uma peça maior, por meio de aparafusamento ou encaixe. Com a moldagem líquida, isso pode ser feito de uma vez. Outra vantagem é a possibilidade da inserção de sulcos, nervuras, vãos e outros detalhes na geometria da peça.

A moldagem por transferência de resina (RTM) é o processo de moldagem líquida mais largamente usado. É um processo combinado que se adequa bem à produção de estruturas tridimensionais que possuam baixa tolerância ao erro nas dimensões de suas superfícies. Excelentes acabamentos são possíveis, podendo chegar-se ao espelhamento das peças. Em contrapartida, a maior limitação do processo de RTM é o custo, relativamente alto, de investimento inicial no ferramental do molde combinado.

A seguir, encontra-se uma tabela comparativa de vantagens e desvantagens do RTM (Tabela 1).

Tabela 1: Vantagens e Desvantagens do RTM

Vantagens	Desvantagens
Melhor controle das dimensões das peças.	Molde e design das ferramentas são críticos para a qualidade da peça.
Excelente acabamento da superfície.	Alinhamento entre preforma e reforço é crítico.
Superfícies podem ser envoltas em gel pra melhor acabamento.	Grande quantidade de peças por sema devem ser fabricadas para a unidade gerar lucro.
Tempo de batelada pode ser bem curto.	Requer molde combinado e à prova de vazamento.
Baixa pressão de operação (usualmente menos de 100psig).	Softwares de preenchimento ainda em estágios iniciais de desenvolvimento.
É possível inserir encaixes, nervuras, ornamentos e reforços.	Permeabilidade do molde baseada em bancos de dados escassos.
Emissões voláteis (ex.: estireno) controladas pelo molde fechado.	O custo das ferramentas pode ser alto para produções grandes.

Os processos genericamente denominados LCM (moldagem líquida de compósitos) possuem, como característica comum, a de inicialmente pôr-se a resina líquida ou não em um molde fechado contendo tecido feito de fibras sob a aplicação de um gradiente de pressão. O RTM especificamente consiste de três passos: primeiro o reforço de fibra seca é posto no molde, adquirindo o formato desejado, depois a fibra já moldada, sob o gradiente de pressão, recebe a injeção da resina reativa e em seguida segue-se o processo de cura e a demoldagem da peça, a qual segue para processos de pós-cura e acabamento.

O processo básico de moldagem por transferência de resina é mostrado na Figura 4, com os seguintes passos:

- Fabricação de uma preforma feita com fibras;
- Preforma é posta em um molde fechado;

- Injeção na preforma de uma resina de baixa viscosidade, sob pressão;
- Cura da peça em temperatura elevada dentro do molde e sob pressão; e
- Desmoldagem e limpeza da peça curada.

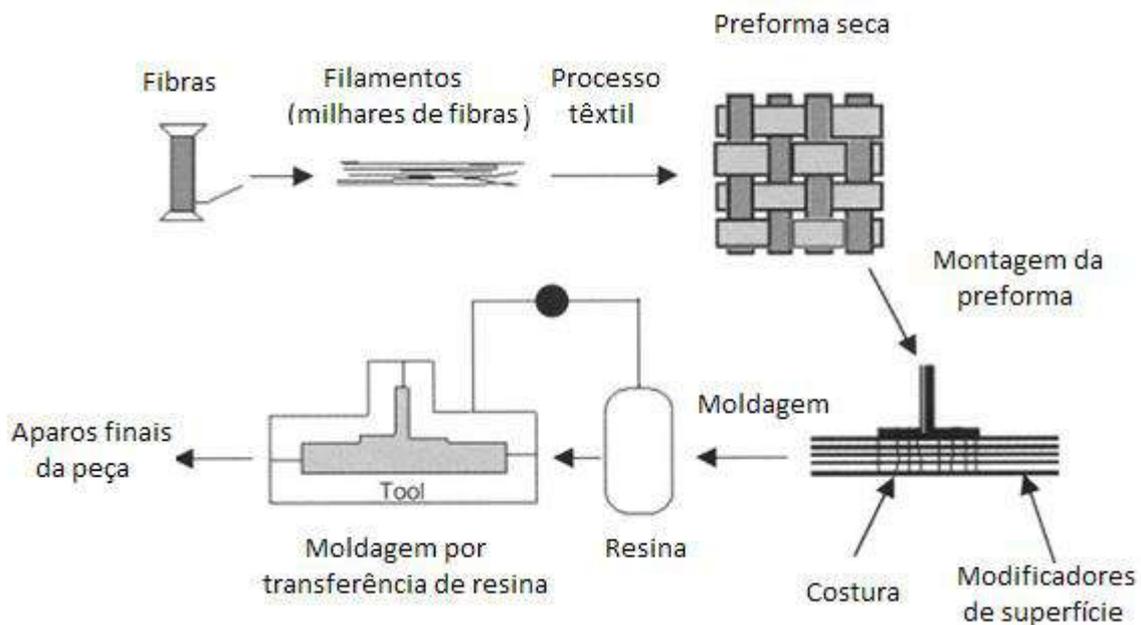


Figura 4: Processo básico de RTM. [F.C. Campbell, 2004].

Nos últimos anos, têm sido desenvolvidas muitas variações do RTM (visando à diminuição dos custos), incluindo infusão de filme de resina (RFI), moldagem por transferência de resina assistida por vácuo (VARTM) e processo Seemann de moldagem de compósito por infusão de resina (SCRIMP), para citar algumas.

A Tabela 2 resume alguns processos de moldagem líquida e seus atributos de acordo com Beckwith e Hyland (1998).

Tabela 2: Comparação Entre Vários Processos de Moldagem Líquida

Processo	Atributos
Moldagem por transferência de resina (RTM)	Resina injetada em molde combinado sob pressão.
	Vácuo pode ou não ser usado.
	Excelente acabamento de ambos os lados da superfície.
	Consegue-se maior volume de fibra (57-60%)
	O processo chamado RTM de coinjeção (CIRTM) usa diferentes sistemas de injeção de resina.
RTM assistido por vácuo (VARTM)	Normalmente usa-se ferramenta unilateral
	O vácuo empurra o líquido até a preforma (não há pressão positiva).
	Requer resina de baixa viscosidade
	Excelente acabamento do lado voltado para a ferramenta.
	Ferramental menos caro que o do RTM.
	Consegue-se normalmente um volume menor de fibras (50-55%).
	Processos patenteados como o SCRIMP e o FASTRAC usam meio de infusão patenteados para acelerar a infiltração da resina.
Processo de infusão de filme de resina (RFI)	O filme de resina é posto no fundo da ferramenta e, com calor e pressão de autoclave, é forçado a escoar para a preforma.
	Normalmente requer molde combinado para peças complexas.
	As variações incluem infusão por resina líquida (RLI), na qual resina líquida substitui os filmes de resina e SPRINT, na qual camadas de resina são dispersas na estrutura da preforma.
	Produz peças de alta qualidade dependendo do ferramental.
RTM de expansão	RTM de expansão térmica (TERTM) usa molde combinado com núcleo interno que expande, gerando pressão para o RTM.
	O RTM assistido por borracha usa silicone, que expande ao ser aquecido, gerando pressão para o processo.

2.1 – Variações do processo RTM

O processamento de materiais compósitos por RTM admite flexibilidade nos seus parâmetros para atender as necessidades da geometria requerida para a peça. Assim, existem variações no processo. As principais variações do processo RTM são destacadas nessa seção. Neste trabalho foi utilizado um processo de moldagem por transferência de resina assistida por vácuo.

2.1.1 – Moldagem por transferência de resina assistida por vácuo (VARTM)

Uma vez que o processo de VARTM usa somente pressão de vácuo tanto para a injeção como para a cura, sua maior vantagem é que seu ferramental é muito menos caro e mais simples de se projetar do que aqueles usados para os processos convencionais de RTM. Adicionalmente há o fato de uma autoclave não ser necessária para a cura, criando a possibilidade de peças de grandes dimensões poderem ser produzidas no VARTM. Também, já que pressões muito menores são usadas, espumas de baixo peso podem ser usadas como reforço entre as camadas de preforma. Processos do tipo VARTM têm sido usados por muitos anos para construção de cascos de navios de fibra de vidro e, recentemente, têm sido usados na indústria aeroespacial.



Figura 5: Processo básico de VARTM. [F.C. Campbell, 2004].

Um processo de VARTM típico, mostrado na Figura 5, consiste em um ferramental unilateral com uma bolsa de vácuo. Normalmente é usado algum tipo de meio poroso no topo da preforma para facilitar o escoamento da resina. Esse meio poroso deve ser de material altamente permeável. Os meios porosos mais comuns são telas de náilon e malha de polipropileno. Já que a infiltração da resina ocorre no sentido da espessura, *race-tracking* (que é um fenômeno em que há escoamento preferencial de resina em algumas partes do molde na fase de injeção) e vazamentos nas bordas da preforma são bastante evitados. Uma variação de VARTM, que consiste na utilização de molde fechado foi usada neste trabalho.

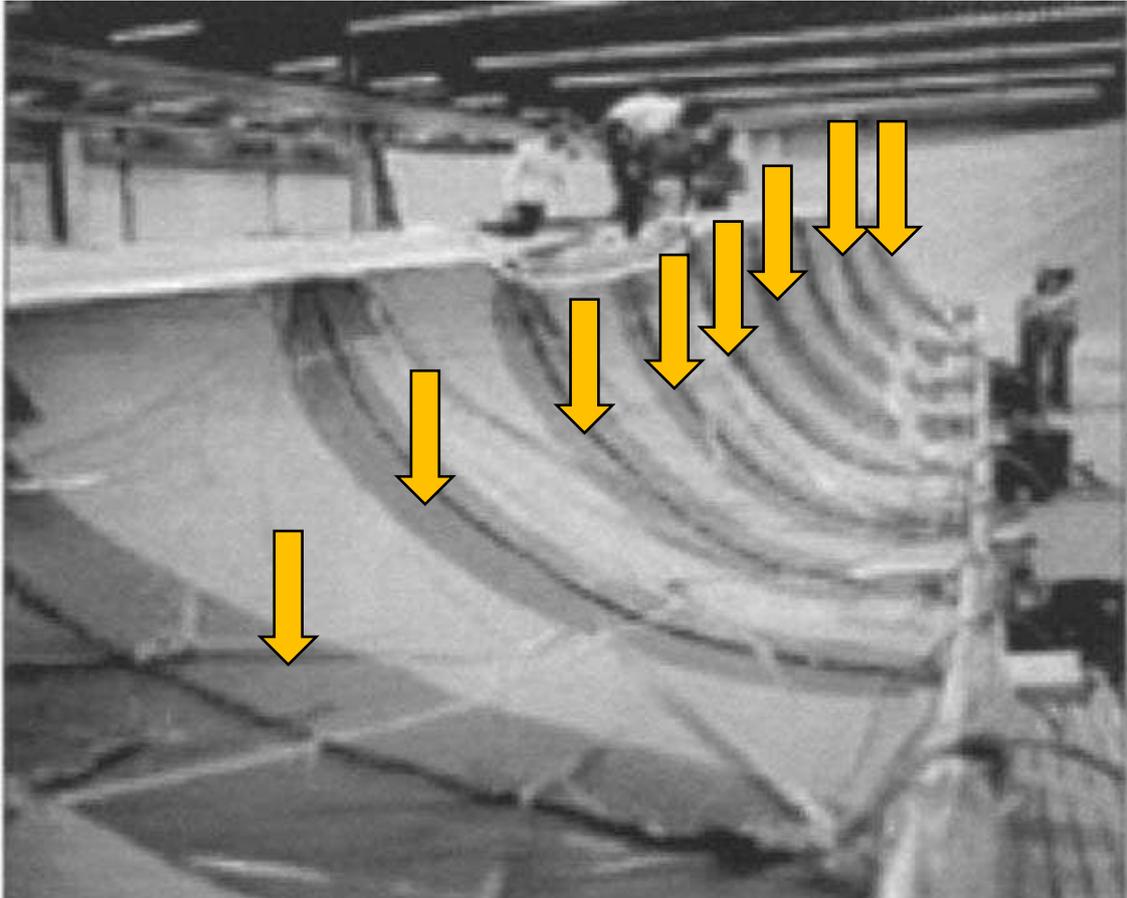


Figura 6: Peça de fuselagem de avião molhada pela resina (em cinza escuro) pelo processo SCRIMP. [F.C. Campbell, 2004].

Na Figura 6, a peça foi feita com o processo patenteado SCRIMP (*Seemann Composites Resin Infusion Molding Process*), que utiliza um meio de distribuição especial para a resina, permitindo um tempo curto de infusão para grandes áreas. Os locais onde a resina molhou a preforma foram destacados, indicando o uso de múltiplos orifícios de injeção.

Outro exemplo é a complexa fuselagem de um helicóptero (Figura 7), na qual a estrutura e as divisórias foram feitas usando-se VARTM e então ligadas umas as outras pelo processo SCRIMP.



Figura 7: Fuselagem de helicóptero. [Seeman Composites Inc].

Nos processos VARTM, fornos e peças integralmente aquecidas são normalmente usados, e como as pressões usadas são baixas (<14,7 psia), peças leves e de baixo custo podem ser utilizadas. Alguns produtores usam bolsas de vácuo duplas para minimizar variações na pressão de compactação e para proteger contra possíveis vazamentos na primeira bolsa. Um respiradouro é posto entre as duas bolsas, aumentando a capacidade de remover ar de locais de vazamento. As bolsas podem ser reutilizáveis e serem usadas para reduzir os custos, quando se tratar de peças grandes e complexas.

As resinas usadas no VARTM devem ter menor viscosidade que aquelas dos processos convencionais de RTM. Resinas com viscosidade menor que 100 cp são recomendadas para um bom escoamento e impregnação da preforma, sob vácuo. Degaseificação usando o vácuo é usada para ajudar a remover o ar arrastado na etapa de mistura. Algumas resinas podem ser infundidas em temperatura ambiente, enquanto outras requerem aquecimento. É desejável que se mantenha a fonte de resina e o gerador de vácuo longe do

ferramental aquecido. Isso torna mais fácil o controle de temperatura da resina na fonte e minimiza a chance de uma reação exotérmica no gerador de vácuo.

Para peças grandes, múltiplas injeções e orifícios de saída são utilizados. Como regra geral, os alimentadores de resina e os geradores de vácuo devem ser dispostos com um espaçamento de cerca de 46 cm. Conforme a resina se afasta do seu ponto de origem, sua velocidade diminui, de acordo com a Lei de Darcy, a espessura final da peça diminui e o conteúdo de resina aumenta como mostram as linhas de tendência na Figura 8.

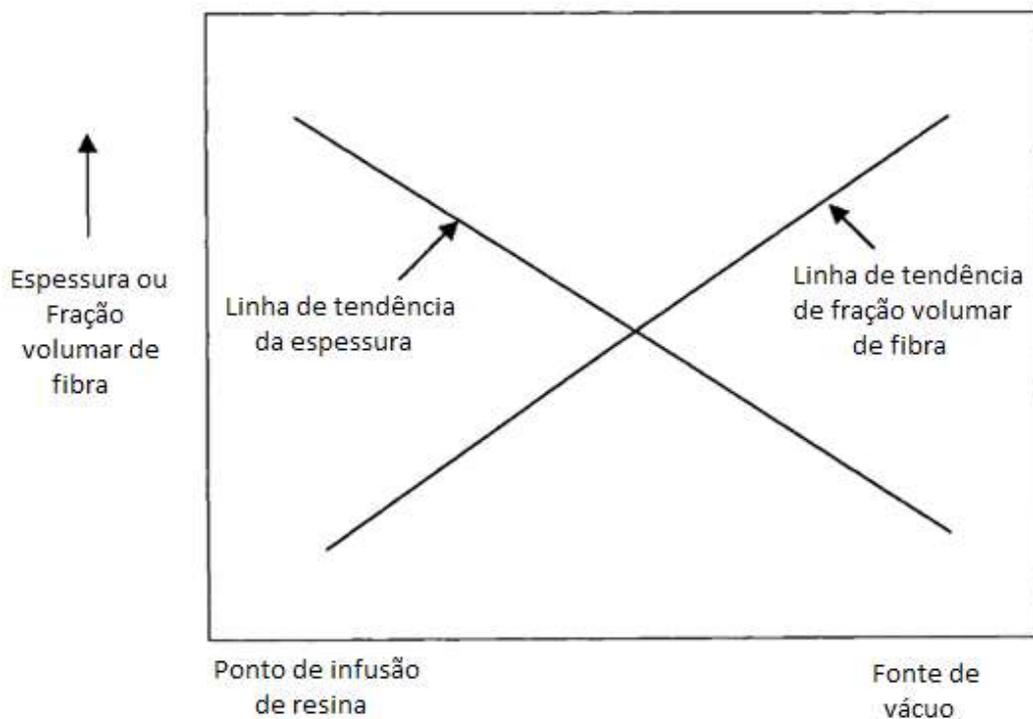


Figura 8: Mudança da espessura da peça curada e da fração volumar de fibra vs. distância relativa à fonte de vácuo. [Rigas E.I. et al, Maio 2001].

É também mais difícil obter alta fração volumar de fibra em preformas grossas. Uma vez que um empacotamento perfeito das fibras não ocorre, há um aumento de espaço livre a cada camada adicional, o que resulta em uma baixa fração volumar de fibras em peças espessas.

Uma vez que a pressão é muito mais baixa do que a normalmente usada nos processos convencionais de RTM ou de autoclave, é mais difícil obter-se uma fração volumar tão alta quanto a dos processos tradicionais. Contudo, essa desvantagem está sendo superada com uso de molde com formato próximo ao da peça final. Ademais, o processo de VARTM não possui tanta precisão nas dimensões finais, o acabamento da superfície ao lado da bolsa não é tão bom quanto o do processo de RTM. O controle de espessura é geralmente uma função do número de camadas de preforma, do volume percentual de fibra e da quantidade de vácuo aplicada durante o processo.

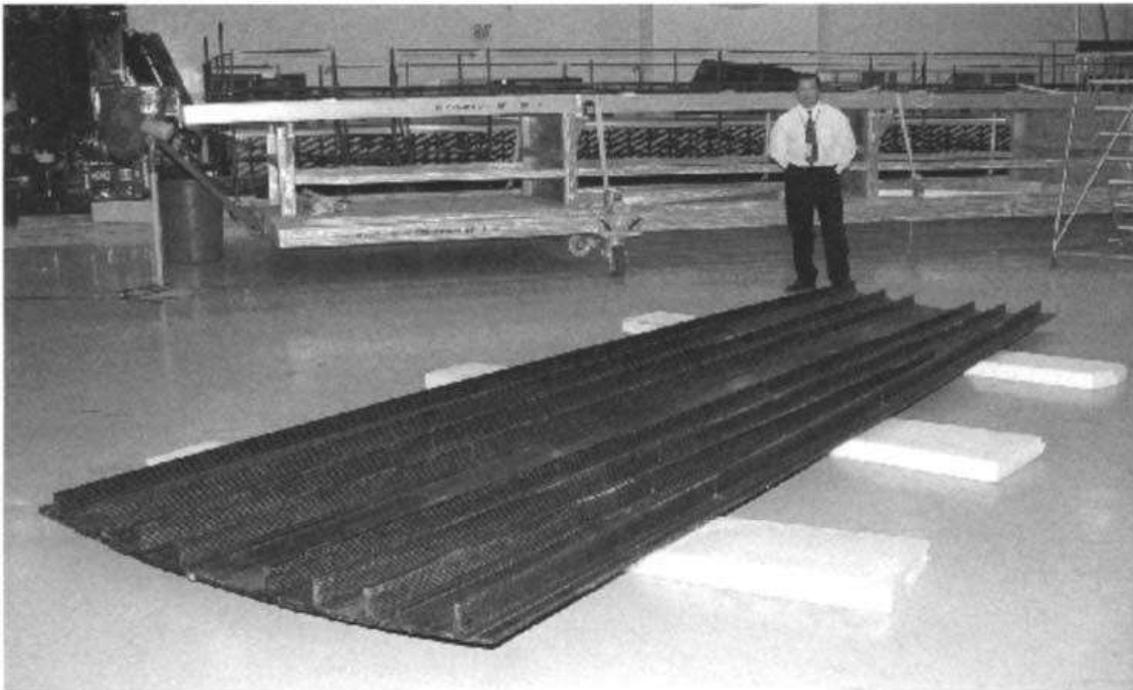


Figura 9: Painel de cobertura de asa inteiro, fabricado pelo processo VARTM-PB. [Karat M., Março 2001].

Durante o Programa Asa de Compósitos Avançados da NASA (Agência Espacial Norte-americana), avaliou-se os processos VARTM e RF2. As estruturas dos painéis de asas continham baixa fração de fibra (<54%), então eles usaram VARTM em um painel de asa e o puseram em um forno para uma

cura pressurizada. O resultado continha um percentual aceitável de volume de fibra (>57%). Eles chamaram esse processo de VARTM-PB (*pressure bleed*), Figura 9.

2.2 - Parâmetros importantes no RTM

O processo de transferência de resina por moldagem assume uma crescente notoriedade na tecnologia de manufatura de peças de compósitos de polímeros, devido às suas inúmeras vantagens. No entanto, a produção consistente e de alta qualidade de peças é difícil de se alcançar e requer um melhor entendimento do processo e um melhor controle da matéria-prima. Variações de uma peça para outra são inevitáveis. Elas são resultado de um ambiente de moldagem mal controlado e de interferências não identificáveis ou não detectadas, as quais não podem ser completamente eliminadas ou consideradas. Nesse contexto, este trabalho procura, inclusive, desenvolver sistemas que permitam a monitoração do processo de RTM.

A popularidade do RTM é devido às inúmeras vantagens que ele possui sobre os outros métodos de manufatura de compósitos, como os que utilizam rolos, spray ou autoclave para a aplicação da resina. Peças pequenas a grandes e complexas, com pouco ou alto conteúdo de fibra e inserções podem ser manufaturadas em uma única etapa, levando a uma economia de tempo e a uma diminuição de custos. Contudo, como em qualquer processo manufaturado, o RTM está sujeito a inevitáveis e, por vezes, inesperadas variações nos parâmetros de processo, bem como nas propriedades do material. De fato esse processo é afetado por uma grande variedade de parâmetros associados ao design da peça, ao molde, à preforma de fibra, à

resina e aos parâmetros de injeção. Na prática, pequenas mudanças influenciam grandemente na qualidade final da peça. Os inúmeros parâmetros são difíceis de modelar e prever. E a razão jaz no fato de eles não possuírem grande reprodutibilidade. Isso torna complicado saber com que magnitude eles ocorrerão de batelada a batelada, de peça a peça, ainda que no mesmo molde e sob as mesmas condições de processo.

2.2.1 - *Race-tracking*

Um fenômeno importante a se destacar no RTM, por ser o responsável pelo fator variação do padrão de escoamento da resina, é o race-tracking. Ele ocorre nas bordas da parte interna do molde e consiste no escoamento mais rápido da resina, quando há um vão entre a borda da preforma e a parede da cavidade do molde, como mostra a Figura 10, a seguir:

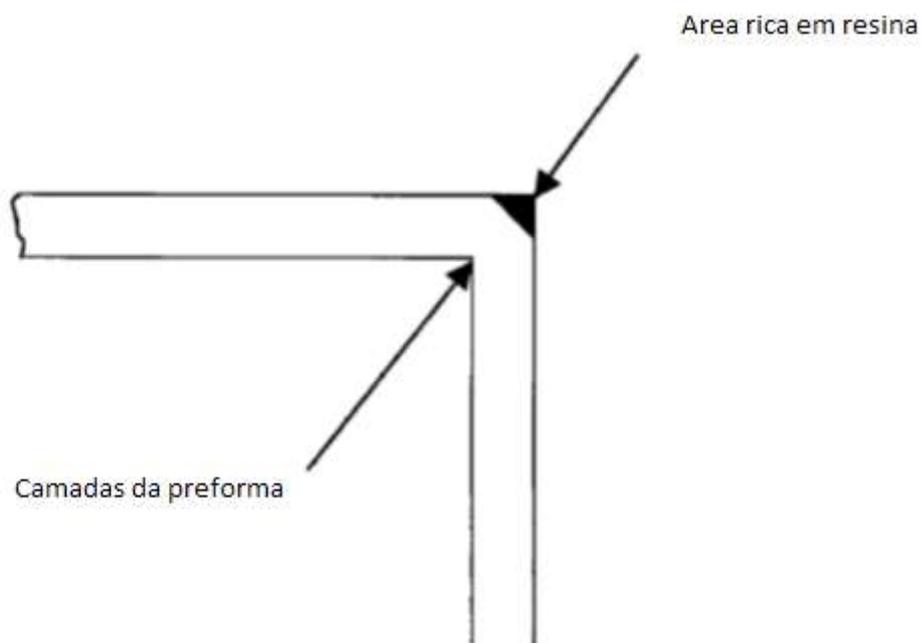


Figura 10: Área rica em resina formada entre a preforma e o ferramental, devido ao race-tracking. [Gebart B.R. et al, 2000].

Uma vez que esse vão depende da acurácia e da repetitividade da preparação e colocação da preforma, não é provável que possua um valor fixo, podendo diferir de peça a peça em um mesmo dia de produção. Estudos mostram que *race-trackings* inesperados são inevitáveis, mudando a maneira com que deveria ocorrer a impregnação da resina na preforma de fibra em um molde fechado. Conseqüentemente, é provável que essas mudanças na frente de escoamento, aprisionem ar dentro do molde. Por isso, a resina sai do sistema, sem ter completamente saturado a preforma, criando pontos secos (Figura 11), o que é bastante prejudicial para a qualidade final da peça.

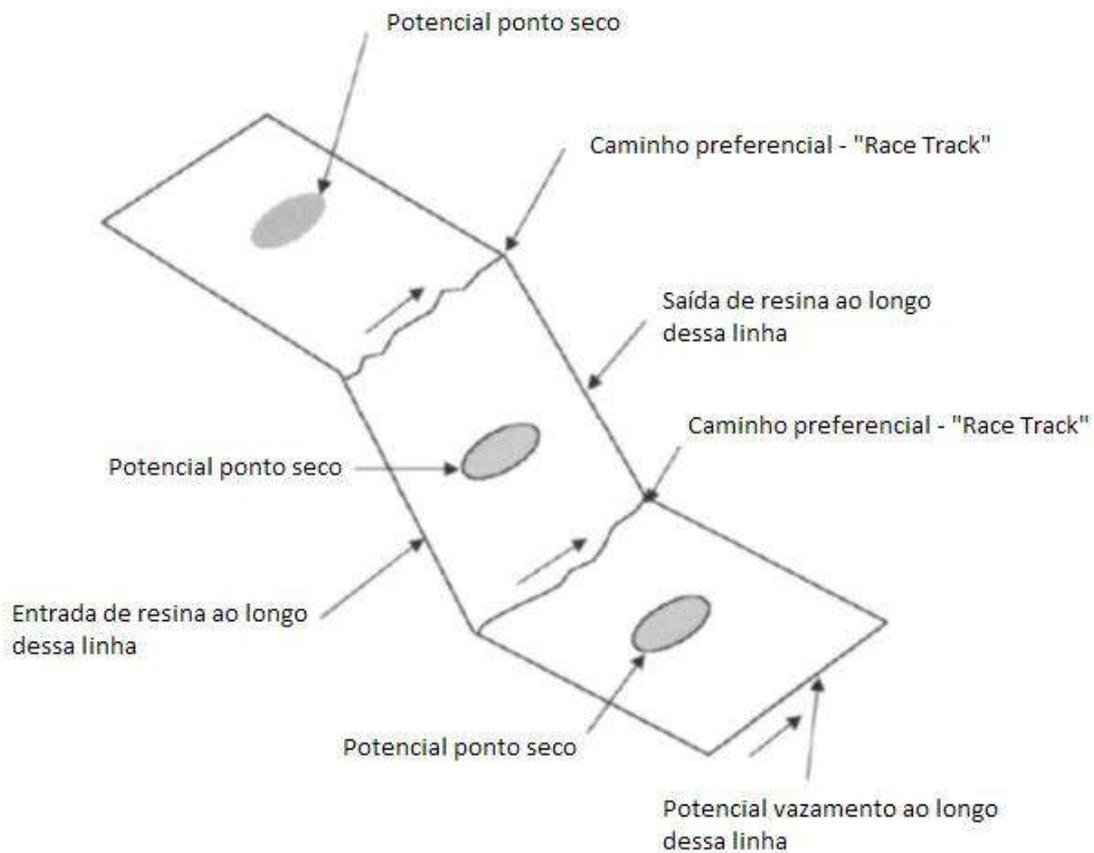


Figura 11: Race-tracking causando o aparecimento de pontos secos. [Gebart B.R. et al, 2000].

O termo *race-tracking* é, portanto, utilizado para descrever a deformação da frente de escoamento da resina, devido a aumentos localizados na

porosidade da preforma; e, logo, na sua permeabilidade. Áreas de anormal aumento de porosidade na preforma geram caminhos de menor resistência ao escoamento, podendo ocorrer em bordas, cantos e em outras porções de geometria complicada em um molde, já que pode ser difícil preenchê-las consistentemente com a preforma. Esse tipo de *race-tracking* pode ser difícil de prever e deve ser eliminado, com o uso de moldes com um design menos problemático, quando isso for possível. Outro tipo de *race-tracking* é o que ocorre por canais bem definidos de ar dentro de um molde. Esses canais podem ser usados intencionalmente, para melhorar e facilitar o preenchimento de partes complicadas de a resina alcançar. Eles reduzem a resistência total da cavidade do molde, reduzindo o tempo de preenchimento para uma injeção à pressão constante e reduzindo a pressão de injeção para um preenchimento à vazão constante.

2.2.2 – Permeabilidade

A Permeabilidade é um parâmetro essencial ao estudo do escoamento pois está relacionada à resistência ao fluxo da resina em meios porosos e, portanto, influencia diretamente no preenchimento do molde. Ela reúne em si informações sobre diversas variáveis que afetam e modificam o processamento de peças por RTM, entre eles: porosidade, vazão de resina, pressão de injeção e arquitetura das fibras.

O modelo mais utilizado para descrever o escoamento em meios porosos foi proposto por Henry Darcy em 1856 (Equação 1).

$$Q = K \frac{\Delta P A}{\mu \Delta L} \quad (1)$$

em que:

- Q é a vazão de resina ou fluido de teste;
- K é a permeabilidade
- ΔP é a variação de pressão;
- μ é a viscosidade;
- A é a área transversal ao escoamento;
- ΔL é a distância percorrida pela resina ou fluido no interior do molde;

Na aplicação dessa equação é suposto:

- Operação em regime permanente;
- Escoamento com número de Reynolds baixo, a pressão constante;
- O fluido é newtoniano incompressível;
- Possui viscosidade constante;
- Não há cura durante o preenchimento do molde;
- Não há fluxo devido ao preenchimento de microporos formados pelas fibras do tecido;
- A preforma é estática e não se deforma;
- Forças externas e capilares são consideradas relativamente insignificantes e, por isso, não serão contabilizadas.

Foi usado o modelo de Chang e Hwang (1996) (Equação 2), desenvolvido a partir de modificações da equação de Darcy para o cálculo matemático da permeabilidade no plano por permitir a obtenção dos valores da permeabilidade no plano com um único experimento, ser simples e possuir ampla aplicação em estudos desse tipo.

O modelo consiste no cálculo de um parâmetro Fa (Equação 3), que leva em consideração propriedades do conjunto fibra-fluido (incluindo a permeabilidade) e a diferença de pressão. Este parâmetro é calculado pela equação a seguir que considera parâmetros geométricos R_1 e R_2 da elipse formada pela frente de escoamento do fluido durante o processo (Figura 12) e por parâmetros de injeção R_0 .

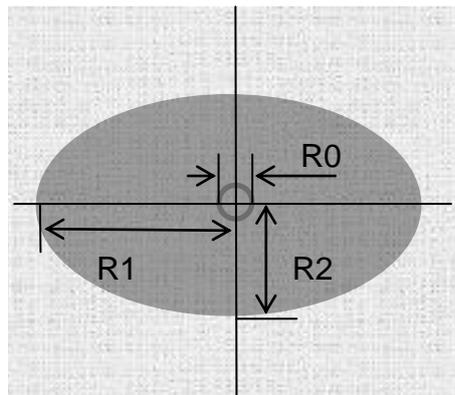


Figura 12: Definição dos parâmetros geométricos da elipse utilizados no modelo de Chang e Hwang (1996).

$$\left(\frac{R_1}{R_0}\right)^2 \left(2 \ln\left(\frac{R_1}{R_0}\right) - 1\right) + 1 = \frac{k_4 \Delta P}{\phi \eta R_{01}^2} t \quad (2)$$

Rearranjando:

$$Fa = R_{01}^2 \left(\frac{R_1}{R_0}\right)^2 \left(2 \ln\left(\frac{R_1}{R_0}\right) - 1\right) + 1 \quad (3)$$

em que

$$Fa = \frac{k_4 \Delta P}{\phi \eta} t \quad (4)$$

e

$$R_{01} = R_0 \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \quad (5)$$

Constrói-se um gráfico que exhibe a variação de Fa com o tempo. A partir da inclinação α desse gráfico obtém-se k. Com este valor, as permeabilidades nas direções de R₁ e R₂ (K₁ e K₂ respectivamente) podem ser calculadas usando as Equações 9 e 10:

$$\alpha = \frac{k \ 4 \ \Delta P}{\Phi \ \eta} \quad (6)$$

$$k = \frac{\alpha \ \Phi \ \eta}{4 \ \Delta P} \quad (7)$$

$$k = \sqrt{K_1 K_2} \quad (8)$$

Então:

$$\boxed{K_1 = k \frac{R_1}{R_2}} \quad (9) \quad \text{e} \quad \boxed{K_2 = k \frac{R_2}{R_1}} \quad (10)$$

2.2.2.1 - Fatores que influenciam no valor da permeabilidade

Nos processos de moldagem líquida, e particularmente em RTM e suas variações, um grande número de fatores e fenômenos influenciam nas condições na fase de injeção de resina. Muitos desses fatores estão resumidos na Tabela 3 (Luthy *et al*, 2002). Tais fatores dificultam a estimação de parâmetros, como a permeabilidade, e estudos de simulação dos processos.

Dentre os fatores que influenciam na permeabilidade destacam-se aqueles ligados a preforma e ao design da peça, que são de difícil caracterização e controle. A permeabilidade, dada pela equação de Darcy (Equação 1), por sua vez também é função de outros parâmetros, entre eles a

arquitetura da preforma e a fração volumétrica de fibra, que tem influência direta na porosidade do meio.

Tabela 3: Fatores que afetam os processos de moldagem líquida

Elemento do processo	Fator pertinente
Preforma	Orientação da fibra, compactação, permeabilidade, porosidade, tamanho
Design da peça	Inserções de metal e núcleos de espuma, reforços longitudinais, vigas
Resina	Viscosidade, temperatura, cinética de cura, tensão superficial
Injeção	Pressão de injeção, taxa de escoamento, fonte de aquecimento
Molde	Geometria do molde, localização e quantidade de entradas e saídas
Interações	Interações resina/preforma e resina/molde

As peças fabricadas por RTM possuem uma variedade de tamanhos e formas incluindo seções curvas e planas. Os métodos usuais de medição de permeabilidade são executados em preformas planas de modo que a utilização de valores de permeabilidade obtidos por esses métodos em regiões curvas introduziriam, a princípio, um erro considerável.

Em seções curvas, as camadas de tecidos se acomodam de maneira diferenciada reduzindo a presença de canais de ar devido a uma maior compactação do tecido. Isso leva a um aumento na fração volumétrica de fibra

local o que leva a uma redução na porosidade e, conseqüentemente, reduz a permeabilidade na região.

Com o intuito de investigar a influência de curvas na permeabilidade local em uma preforma no processo RTM, Bickerton *et al* (2000) desenvolveram moldes com graus de deformação diferentes. Os resultados mostraram que, apesar de a permeabilidade variar fortemente com a fração volumétrica local de fibra, a contribuição desse efeito para o cálculo da permeabilidade em seções curvas com raio de curvatura pequeno não é apreciável. Já em raios de curvatura grande deve ser levado em conta quando as pressões de injeção são baixas.

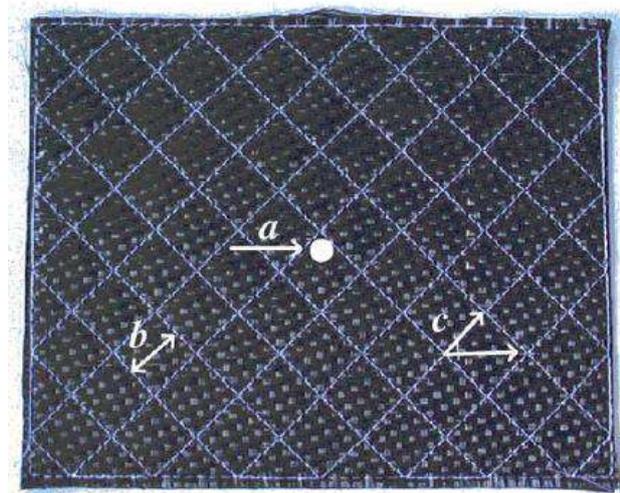


Figura 13: Detalhes da costura (linhas em cor clara) da preforma, [Talvensari *et al*, 2005].

A arquitetura do tecido e seu arranjo na preforma também é apontada como fator determinante no cálculo da permeabilidade. Em seus estudos, Talvensari *et al* (2005) investigaram a influência de costuras nas camadas de tecido unindo-as ao longo da espessura da preforma. Costuras normalmente são usadas para favorecer a transferência de carga e reforçar as peças.

As costuras (Figura 13) aumentam ainda mais a estrutura interlaminar de poros que é formada naturalmente no empilhamento de camadas de tecido. A linha usada na costura causa desvios nos feixes que formam o tecido criando zonas livres de fibras. Isso torna a estrutura da preforma muito complexa onde o escoamento se torna mais difícil de ser previsto.

Resultados de Talvensaari *et al* (2005) confirmam que a permeabilidade em preformas costuradas em RTM é, em geral, maior quando comparadas com preformas sem costuras. Além disso, o efeito da densidade de costuras também foi analisado (Figura 14). Um padrão com maior densidade de costuras (padrão 10 x 10) apresentou um valor maior de permeabilidade porque criou um maior número de caminhos por onde a resina pode fluir. Da mesma forma, tecidos não costurados que possuem poros maiores têm permeabilidades maiores.

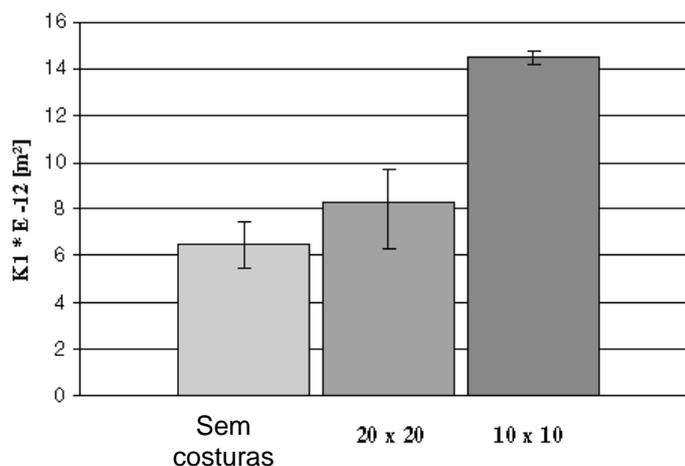


Figura 14: Resultados de permeabilidade para preformas costuradas e não-costuradas, [Talvensaari et al, 2005].

A arquitetura de reforços usados em RTM depende não somente da maneira como as fibras do reforço estão dispostas na preforma, mas também do diâmetro das fibras e do tipo de material que as compõe. Fibras sintéticas,

como fibras de vidro e de carbono, são organizadas em feixes contínuos de aspecto liso, sem pontas soltas, e então tecidas, trançadas ou emaranhadas. Já fibras naturais como linho, sisal, algodão e lã possuem aspecto grosseiro, com pontas e microfilamentos soltos pela sua superfície.

A variação da permeabilidade com o diâmetro das fibras que constituem mantas de linho foi analisada por Umer *et al* (2011). A permeabilidade foi determinada (em vários valores de fração volumétrica de fibra) para três mantas randômicas de linho constituídas de fibras com diâmetro pequeno (0,35 mm), médio (0,56 mm) e grande (0,81 mm). Os resultados mostram que a manta constituída de fibras de diâmetro grande apresentou valores significativamente menores de permeabilidade (Figura 15).

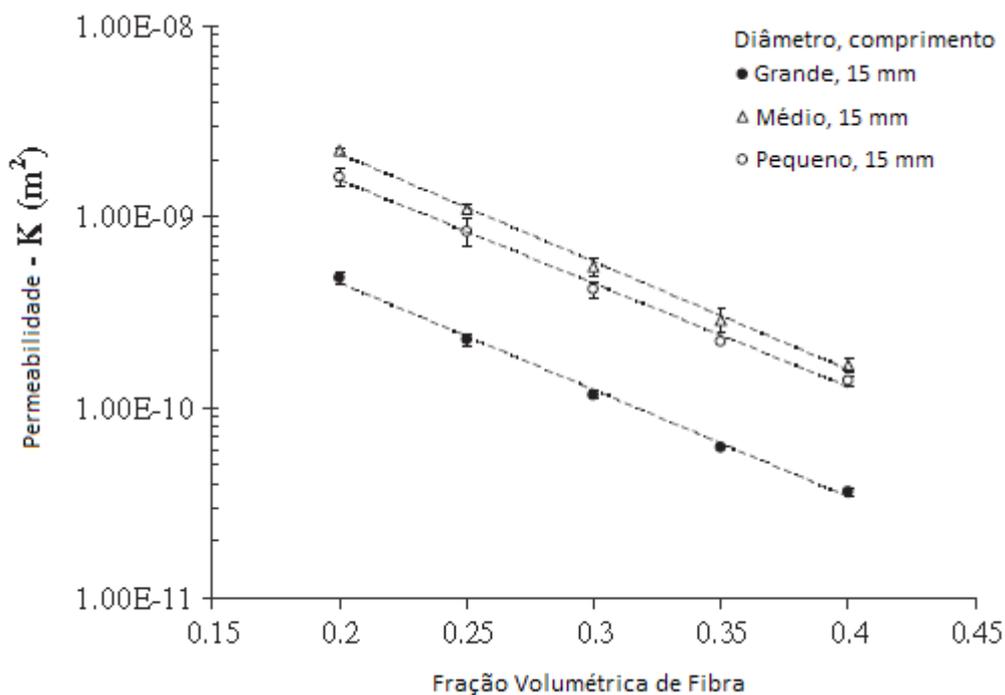


Figura 15: Permeabilidade de mantas randômicas de linho com diâmetros de 0,35 mm, 0,56 mm e 0,81 mm, [Umer et al, 2011].

Esse resultado se deve ao fato de as fibras de linho com diâmetro maior possuírem grande quantidade de filamentos soltos e desordenados na

superfície do feixe (Figura 16). Esses filamentos são responsáveis por preencher os vazios formados entre os feixes de linho, dificultando o escoamento de fluido viscoso nesses canais.

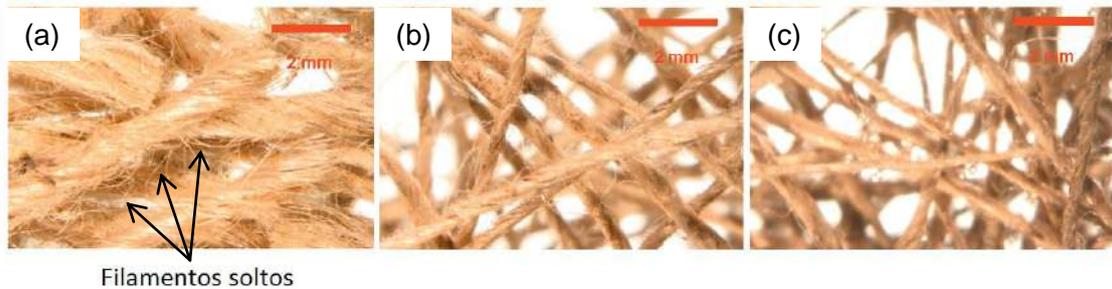


Figura 16: Feixes de fibras de linho numa malha randômica com diâmetros (a) grande (0,35 mm), (b) médio (0,56 mm) e (c) pequeno (0,81 mm), [Umer et al, 2011].

2.3 - Métodos de monitoramento da frente de escoamento em RTM

Para o cálculo da permeabilidade utilizando a Lei de Darcy (Equação 1) é necessário ter a diferença de pressão e determinar vazão de fluido na direção em estudo. Isso pode ser obtido rastreando o avanço da frente de escoamento com o tempo.

Com essa finalidade pesquisas foram feitas no sentido de desenvolver sensores, utilizando princípios de medição diferentes, capazes de monitorar o escoamento. Alguns tipos de sensores medem diretamente o escoamento, enquanto outros o fazem de maneira indireta. Alguns tipos de sensor são apresentados na Tabela 4, adaptada de Luthy *et al* (2002). Verifica-se que é possível medir mais de um tipo de grandeza em alguns casos.

Tabela 4: Tipos de sensor utilizados em processos de moldagem líquida

Método do sensoriamento	Escoamento	Pressão	Temperatura	Grau de cura
Fibra óptica (Bragg)	x	x	x	x
Resistência Elétrica (Corrente direta)	x		x	x
Dielétrico	x			x
Ultrasônica	x			x
Termografia			x	
Termistores	x		x	
Malha distribuída com sensores de pressão	x	x		
Transdutores piezoelétricos nas paredes ou entrada do molde	x	x		x
Imagens	x			

No método de fibras ópticas, os filamentos do sensor podem ser posicionados sobre a preforma ou podem ser incorporados no tecido de forma a perturbar o mínimo possível o escoamento de resina durante a fase de injeção. As fibras ópticas são usadas para transmitir luz em uma das terminações de um filamento. Na outra extremidade um detector monitora a intensidade luminosa transmitida, que diminui quando a resina atinge o sensor devido ao fenômeno de refração da luz emitida. Esse sistema pode ser calibrado para monitorar o escoamento, temperatura, variações na pressão e grau de cura. Entretanto, devido ao alto custo da instrumentação necessária esse método não é comumente usado.

O método de sensoriamento dielétrico emprega sensores elétricos que consistem de placas paralelas (ou arranjos) capazes de medir a capacitância do meio entre elas. Quando o meio entre as placas é preenchido com resina a capacitância do sistema muda e é detectada. Tendem a possuir baixo custo de aquisição por sua simplicidade.

Sensores ultrassônicos detectam variações através do molde nas ondas sonoras emitidas por um gerador. A presença de resina perturba o padrão de emissão original distorcendo e refletindo as ondas sonoras e, sabendo onde essas distorções ocorreram, é possível monitorar o avanço do escoamento. Um aparato experimental é exibido na Figura 17.

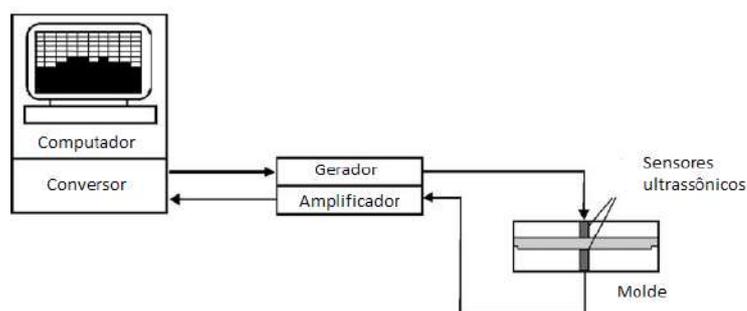


Figura 17: Instrumentação para detecção de frente de escoamento utilizando sensores ultrassônicos, [E. Schmachtenberg et al, 2005].

Por permitir medir apenas diferenças de temperatura, o uso de termistores é útil para monitorar o escoamento quando a resina está a uma temperatura diferente da preforma e das paredes do molde. Os termistores são localizados na parede interna do molde e sua posição é conhecida (Figura 18). Assim que a resina passa ela esfria o sensor causando uma mudança no sinal emitido por ele. Essa mudança é capturada por um sistema de aquisição de dados e, dessa forma, a posição da frente de escoamento é determinada. O

processo de cura também pode ser acompanhado devido às reações serem exotérmicas.

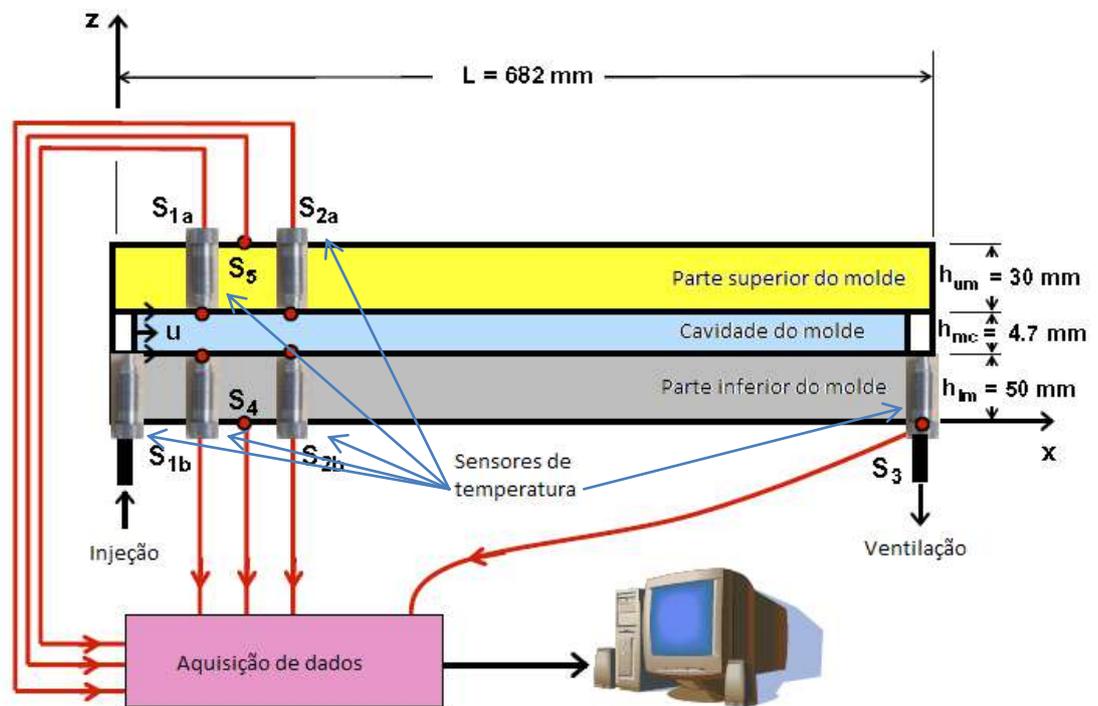


Figura 18: Termistores acoplados nas partes superior e inferior do molde RTM, [Sozer, M. et al, 2007].

Da mesma forma que os termistores, sensores de pressão podem ser usados nas paredes para detectar aumentos locais na pressão quando a resina o alcança. Construindo uma malha com os sensores e sabendo a localização de cada uma o escoamento pode ser rastreado. O sinal de variação de pressão, porém, costuma subir lentamente dificultando a precisão das leituras.

Similares aos sensores dielétricos, os sensores que medem resistência elétrica ou diferença de potencial são empregados por sua versatilidade e baixo custo relativo a outros métodos. Destacam-se nessa categoria os sensores elétrico linear e a tecnologia *SMARTweave*.

2.3.1 - Sensor Elétrico Linear

O sensor elétrico linear (LDC, *linear direct current*) é baseado na dependência contínua entre a voltagem de saída, medida entre dois filamentos de material condutor, e a posição da frente de escoamento quando o sistema está submetido a uma fonte de corrente direta. Dessa forma, o sensor elétrico linear acompanha a variação da resistência do meio entre os filamentos com o meio. Resultados de Luthy *et al* (2002) mostram que o rastreamento da frente de escoamento por esse método produzem resultados acurados quando comparados ao rastreamento por imagens. Um sistema experimental utilizando o LDC pode ser observado na Figura 19.

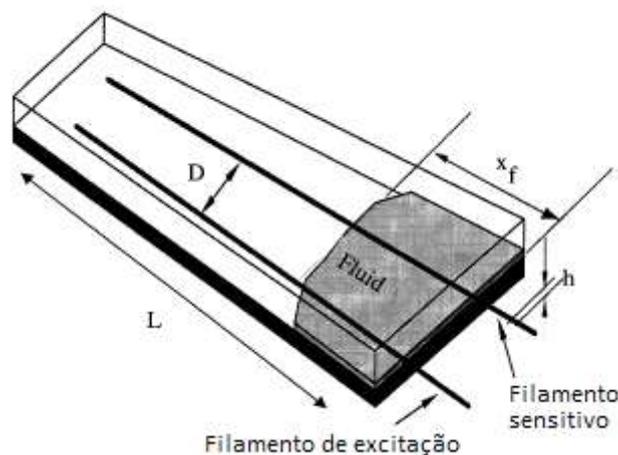


Figura 19: Montagem de um sistema de sensor LDC, [Luthy et al , 2002].

Por ser constituído de filamentos que se estendem ao longo da preforma dentro da cavidade do molde, a posição de escoamento durante o processo pode ser monitorada de forma contínua e não em pontos discretos. De acordo com Luthy *et al* (2002) isso leva a uma redução no número de filamentos condutivos que são necessários para se obter informações contínuas no processo de injeção de resina. Os filamentos podem, inclusive, fornecer

informações sobre o grau de cura da resina e sobre temperatura. Além disso, devido ao baixo custo dos filamentos, o sensor linear acarretará em menores custos de produção em relação a outros sensores e métodos de medição de frente de escoamento, como por exemplo, os sensores de fibras ópticas.

Devido ao fato de fornecer informações contínuas e *on-line*, os dados do sensor linear podem ser comparados com resultados de simulações dos processos de moldagem líquida. Fornecendo, dessa maneira, meios para o desenvolvimento de estratégias de controle diretamente na fase de injeção.

Entretanto, esse tipo de sensor possui desvantagens, incluindo:

- Dificuldade de posicionamento manual dos filamentos na preforma, que deve ser realizado de forma precisa, consumindo um tempo considerável;
- Incapacidade de monitorar frentes de escoamento com forma complexa, se limitando a apenas frentes de escoamento perpendiculares aos filamentos;
- Incapacidade de monitorar o escoamento em três dimensões;

2.3.2 - SMARTweave™

O SMARTweave (*Sensors mounted as roving threads*) é uma tecnologia de sensor patenteada que se baseia, assim como o sensor elétrico linear, na medida de voltagem entre um conjunto de filamentos organizados em forma de malha. Essa malha é constituída de dois conjuntos ortogonais de filamentos separados por uma ou mais camadas de tecidos da preforma como na Figura 20.

O cruzamento entre dois filamentos ortogonais define um nó. Inicialmente não há corrente elétrica entre os conjuntos de filamentos devido ao material da preforma ser isolante. Quando há impregnação a resina fecha o circuito em cada nó causando uma diferença na resistência da malha como um todo. Essa diferença é processada por um sistema de aquisição de dados e um software proprietário que localiza a posição do nó impregnado e, assim, determinar a posição da frente de escoamento.

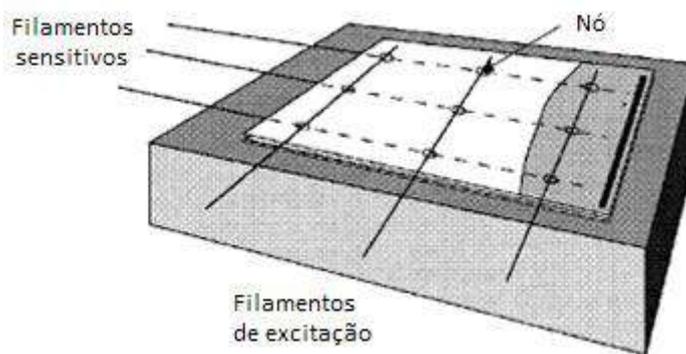


Figura 20: Arranjo de filamentos no SMARTweave, [Luthy et al , 2002].

2.4 - Tecnologia da preforma

Os tipos mais importantes de preformas usadas nos processos de moldagem líquida são fibras. Elas podem vir sob as formas: (1) Tecidas, (2) Tricotadas, (3) Costuradas, (4) Entrançadas e (5) Emaranhadas não-tecidas.

Em muitos casos, a maquinaria têxtil convencional é modificada para suportar as fibras de alto módulo, necessárias em aplicações estruturais, para reduzir os custos por meio da automação, e também pela razão de atender à grande demanda por preformas de reforço 3-D. Uma grande variedade de arquiteturas têxteis avançadas é possível, muitas das quais mostradas na Figura 21.

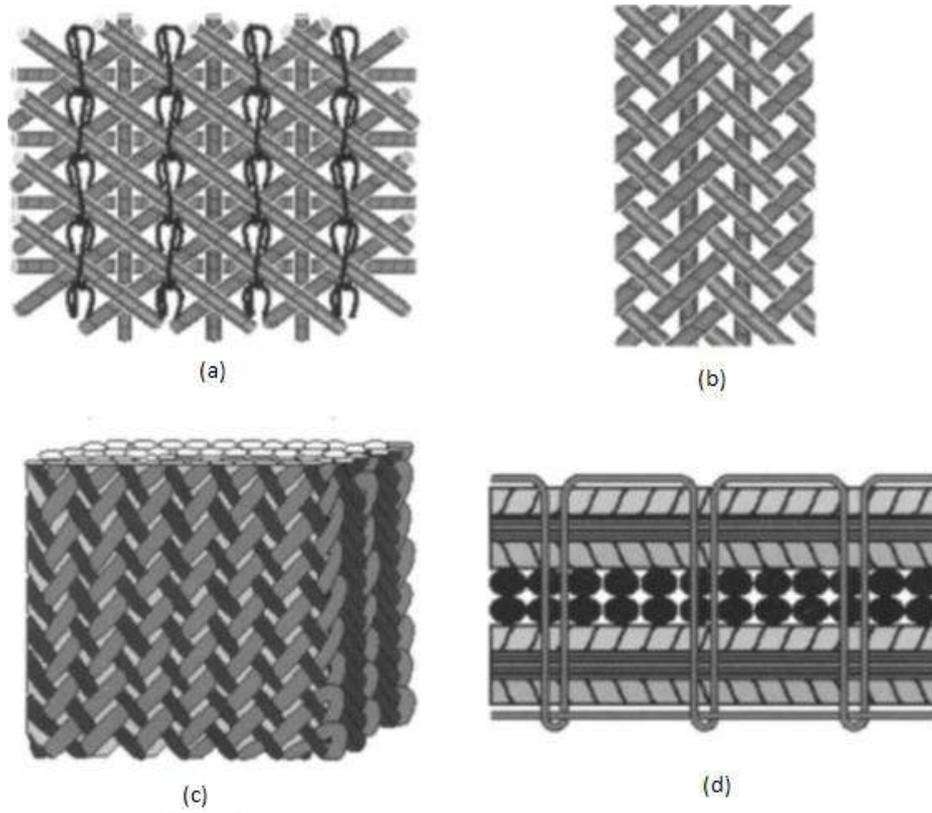


Figura 21: Formas de materiais têxteis avançados: (a) Tricotado de urdidura multiaxial, (b) entrançado triaxial, (c) entrançado tridimensional e (d) tricotado-costurado. [F.C. Campbell, 2004].

2.4.1 - Fibras

Máquinas têxteis têm sido adaptadas para lidar com a maioria das fibras comumente utilizadas em compósitos estruturais, incluindo vidro, quartzo, aramida e carbono. A principal limitação é que a maior parte dos processos têxteis submetem os fios a uma tensão e uma abrasão. Apesar de muitas máquinas terem sido modificadas para minimizar o dano em muitos processos, fibras muito quebradiças ou rígidas acabam sofrendo uma degradação significativa na resistência. Em geral, quanto maior o módulo da fibra, mais difícil será o processamento e maior será a propensão ao dano. Reduções na resistência podem variar dependendo da propriedade que é medida e do processo têxtil usado para fabricar a preforma. Adesivos poliméricos são

normalmente aplicados nas fibras para melhorar suas características de manuseio e minimizar a degradação da resistência durante o processo. Os adesivos podem ser removidos depois do processamento ou serem deixados nas fibras para o processo de laminação. Se o adesivo permanecer nas fibras, é importante que ele seja compatível com a resina da matriz. Um tratamento de superfície é frequentemente usado para melhorar a adesão à matriz.

Em processos têxteis tradicionais, os fios são torcidos para melhorar o manuseio, a integridade estrutural e a capacidade de manter uma forma. No entanto, a torção reduz a resistência axial e a rigidez das fibras, fatores cruciais para aplicações estruturais. Logo, fios com uma torção nominal mínima ou zero são preferidos. Diferentes processos e diferentes tecidos requerem um tamanho diferente de tiras de fibra. Em geral, quanto menor a tira, mais caro será o material, numa base por massa, especialmente para a fibra de carbono.

2.4.2 - Fibra Tecida

Tecidos são usados como reforços 2-D (direções x e y) ou como reforços 3-D (direções x, y e z). Quando resistência e rigidez planares altas são requeridas, reforços 2-D são usados. Eles são fornecidos tanto como *prepeg* (pré-impregnados) ou como pano seco para montagem de preforma ou para aplicações de reparo. As vantagens deles são:

- Podem ser cortados com precisão usando cortadores automatizados;
- Empilhamento complicado de camadas, como o em formato de escada é possível (*drop-offs*);

- Há uma grande variedade de fibras, tamanhos de tiras e tecidos comercialmente disponíveis;
- Estruturas 2-D são mais emendáveis a estruturas finas do que as 3-D.

Tecidos 3-D reforçados são normalmente usados para melhorar o manuseio da preforma, melhorar a resistência à delaminação das estruturas do compósito ou carregar uma parcela significativa da carga na estrutura de compósito, tais como peças de encaixe que estiverem sujeitas a cargas fora do plano. Se melhorar o manuseio for o objetivo, usualmente volumes de fibra na direção z de 1 a 2% são suficientes. Grandes melhoras na resistência à delaminação podem ser obtidas, com o uso de apenas 3 a 5% de volume de fibra na direção z. No entanto, se uma a peça requerer um grande esforço de cisalhamento, um volume em torno de 33% de fibra deverá ser usado. Nesse caso as fibras vão rearranjar-se dando à peça resistências diferentes em cada eixo cartesiano.

2.4.3 - Fibra entrançada

O entrançamento é um processo têxtil que data do começo do século XIX. Nele, um mandril é inserido através do centro da máquina a uma taxa uniforme, assim como fios, os quais moverão carretéis por sobre o mandril a uma taxa controlada. Os carretéis trabalham em conjunto para conseguir um padrão de fios por cima e por baixo alternadamente, numa sequência de entrançamento como mostra a Figura 22.

Dois ou mais sistemas de fios são entrelaçados no viés para a formação de uma estrutura integrada. Importantes parâmetros no entrançamento

incluem: tensão do fio, taxa de inserção do mandril, velocidade angular do entrançador, número de carretéis e espessura do fio.

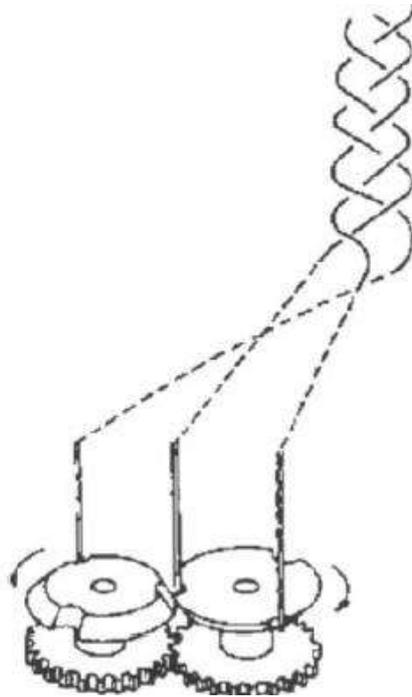


Figura 22: Esquema do entrançamento. [F.C. Campbell, 2004].

Preformas entrançadas são conhecidas por seu alto grau de conformidade, estabilidade torsional e resistência à tensão. As fibras típicas usadas são fibras vidro, aramida e carbono.

2.4.4 - Fibra emaranhada não-tecida

Muitas preformas para aplicações comerciais que não requeiram altas propriedades mecânicas podem ser feitas de emaranhados, descontínuos, truncados ou enrolados de fibra. Essa é uma abordagem bem econômica que permite formatos complexos de peças com contornos compostos. E uma vez que a fração volumétrica de fibra é cerca de 40% no máximo, a infusão de

resina no meio, através das técnicas de moldagem líquida, torna-se de fácil execução.

2.5 - Fibra de Vidro

Fibras de vidro são comumente utilizadas como materiais de reforço em uma ampla gama de materiais compósitos. O tipo mais comum na fabricação de compósitos é o tipo E. Fibras de vidro do tipo E são finos filamentos de vidro de alumínio-borosilicatos com composição de óxidos de álcalis em menos de 1% em base mássica.

Outros tipos incluem a fibra de vidro tipo A constituída de álcalis de vidro de calcário e tipo S onde os filamentos são fabricados com vidro de alumínio silicatos sem óxido de cálcio e com adição de óxido de magnésio constituindo um material com alta resistência à tração.

2.6 - Fluido de teste

O uso de fluidos de teste é amplamente utilizado por uma série de fatores que incluem o custo de aquisição mais baixo, facilidade de limpeza e facilidade no estudo de permeabilidade em meios porosos. Para esses estudos os fluidos de teste substituem com sucesso o uso de resinas.

Outras características devem ser observadas na escolha de um fluido de teste:

- Deve ser inerte quimicamente de forma a não reagir com o material da preforma, molde, instrumentação e equipamentos;
- deve ser newtoniano;

- possuir baixa viscosidade ou possuir algum meio de manipular a viscosidade de forma a torná-la baixa.

Entre os fluidos de teste que preenchem estes requisitos estão o óleo de motor e glicose de milho. Neste trabalho foi usada glicose de milho.

Neste trabalho optou-se por utilizar glicose de milho como fluido de teste.

Para a utilização de glicose de milho como fluido de teste deve-se levar em conta as mudanças no valor da viscosidade devido a variações na temperatura e diluições pois, os estudos de escoamento normalmente supõe viscosidade constante ou contabiliza sua alteração ao longo dos experimentos.

Tabela 5: Viscosidade do Fluido de Teste a Diferentes Temperaturas e Diluições

Amostras	η (cps) 25°C	η (cps) 30°C	η (cps) 35°C	η (cps) 40°C	η (cps) 45°C	Redução da viscosidade com a variação da temperatura de 25°C para 45°C (%)
Sem diluição	6896	5070	2417,3	1652,5	1241	82
10% de diluição	1045,2	733,2	537	389	272,5	73,93
20% de diluição	339,7	236,9	179,8	138,9	120,4	64,56
Redução da viscosidade com a variação na diluição de 0% para 20%	95,07	95,33	92,56	91,59	90,3	

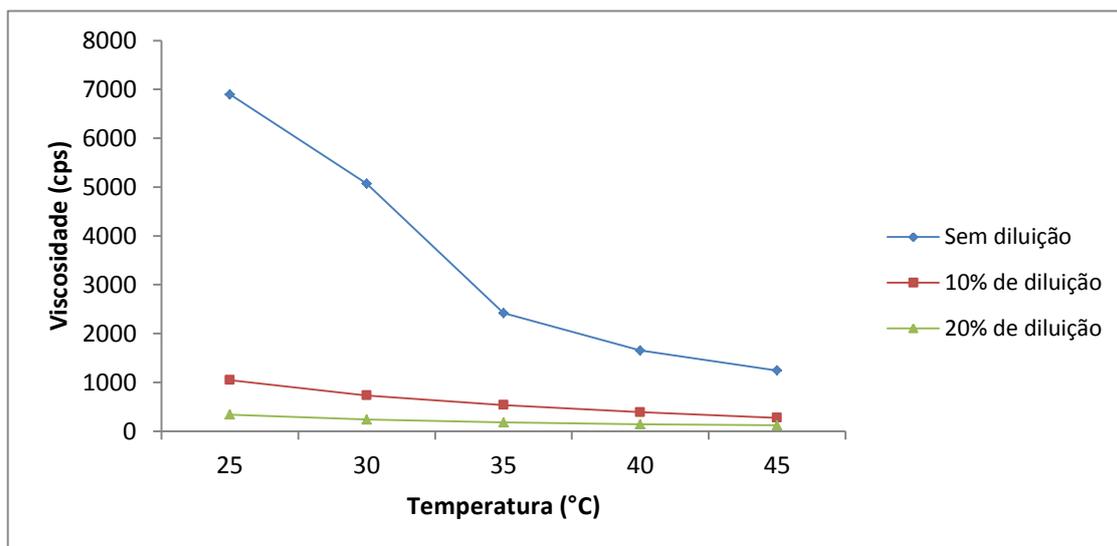


Figura 23: Viscosidade do fluido de teste, [Amorim Júnior, W. F., 2007].

Essas mudanças foram verificadas por Amorim Júnior (2007), que determinou experimentalmente a variação da viscosidade de glicose de milho e suas diluições (de 10% e 20%) com a temperatura como mostra a Figura 23 e a Tabela 5.

Capítulo 3

Materiais e Metodologia

3.1 - Materiais

- Filamentos de cobre: três filamentos de cobre puro com comprimento igual a 18 cm são usados.
- Tecido de Fibra de Vidro: foram utilizados cortes de tecido bidimensional, biaxial de fibra de vidro tipo E entrançada de densidade $2,62\text{g/cm}^2$, cedidos pelo Laboratório de Aplicações de Supercondutores da COPPE. Tecido do mesmo tipo e gramatura de fibra de vidro emaranhada não-tecida também foi utilizada nos experimento.
- Etil-vinil álcool (EVA): duas folhas de dimensões 300mm x 300mm de EVA na cor branca.
- Fluido de Teste: como fluido de teste escolheu-se a glicose de milho, que preenche todos os requisitos necessários citados na Seção 2.3. Foi adquirida uma quantidade suficiente de glicose de milho da marca Mel Karo suficiente para todos os experimentos.

Adotou-se uma diluição de 20% com água destilada por possuir valores mais baixos de viscosidade em média, pela variação com a temperatura ser menor (de forma a minimizar essa influência) e pelos valores que são próximos aos das viscosidades de resinas empregadas comumente na indústria.

- Manômetro de Bourdon;

- Duas câmeras filmadora Sony DCR-SX41;
- Multímetro Digital Instrutherm MD-300;
- Multímetro Digital Fluke 106 IV;
- Fonte de 9V Rayovac para o sensor elétrico linear;
- Agitador magnético com aquecimento Fisatom modelo 752A;
- Bureta de 100 ml graduada;
- Becher de 200 ml.

3.2 – Metodologia

Neste trabalho foram montados sete experimentos. Os experimentos I, II e III procuram desenvolver um sensor elétrico linear capaz de determinar a posição da frente de escoamento na unidade de processamento de placas compósitas por RTM. Os experimentos buscam não só verificar a resposta do sensor e estabelecer relações matemáticas válidas para as medidas como também analisar a influência do espaçamento entre os filamentos do sensor.

Para verificar a potencialidade do sensor usado nos experimentos anteriores para monitorar variações de temperatura os experimentos VI e V foram concebidos. Foi desenvolvida uma nova célula de testes que permite obter um melhor controle da temperatura do sistema.

Procurando expandir as capacidades do sensor elétrico linear em detectar a posição da frente de escoamento, o experimento VI introduziu um terceiro filamento de cobre paralelo aos filamentos originais, com o objetivo de monitorar o avanço do fluido de teste em uma região maior.

O experimento VII estabelece uma metodologia para a construção e operação de uma unidade de processamento de placas compósitas por RTM e

procura reunir as informações obtidas pelos experimentos I, II e III ao aplicar o sensor usado neles para monitorar o avanço da frente de escoamento de um fluido de teste na unidade. Na unidade foi utilizado um sistema de câmeras que também mede o avanço da frente de escoamento. Com isso é possível medir a permeabilidade no plano por meio dos dados da câmera e compará-los com os a permeabilidade calculada por meio do sensor elétrico linear.

3.2.1 - Experimento I - Determinação da ordem de grandeza da voltagem

O objetivo deste experimento é verificar a ordem de grandeza da voltagem obtida entre os filamentos de cobre e respostas do sensor na fase de injeção. Ele serviu de base para testar e ajustar a metodologia desenvolvida a ser utilizada nos experimentos restantes.

Com o intento de reproduzir o meio e as condições do processo, uma célula de testes foi elaborada. Essa célula consiste de um recipiente plástico de polipropileno de alta densidade, um material não condutor, transparente e de dimensões 20x15x5 cm (comprimento/largura/profundidade).

A parte interior da célula foi preenchida com uma camada de longos filamentos de fibra de vidro dispostos paralelamente na mesma direção do comprimento do recipiente de modo a formar uma camada fina. A massa usada de fibra de vidro foi de 18,74 g.

Os filamentos metálicos de cobre que constituem o sensor possuem um comprimento de 18 cm de modo a permitir a sua fixação no interior da célula e ao mesmo tempo a conexão dos fios de alimentação e do multímetro. Esses filamentos foram dispostos paralelamente ao comprimento na região central da

célula com espaçamento fixo definido arbitrariamente em 1 cm. Os filamentos foram conectados, cada um a um terminal diferente de uma bateria de 9 volt (Rayovac) formando o sistema descrito na Figura 24.

Paralelamente, foram preparados 200,10g de fluido de teste que consiste em uma solução de 20% em massa de glicose de milho comercial (mel Karo). Foi usada uma massa igual a 18,46g de glicose de milho diluída em 181,64g de água destilada totalizando aproximadamente 200 ml de solução.



Figura 24: Célula de testes e acessórios do experimento I.

Uma pequena inclinação foi adotada com o intuito de produzir uma frente de escoamento uniforme ao longo da célula. Para o início do processo, a solução-teste foi sendo adicionada gradualmente na parte inferior da célula com a bureta graduada de modo a inundá-la como na Figura 25.

Com o auxílio de uma escala graduada em centímetros no fundo da célula, foram registrados os valores de diferença de potencial entre os filamentos de cobre em comprimentos definidos. Esses comprimentos foram

definidos de forma que a cada centímetro do sensor inundado o valor lido no multímetro fosse registrado. Este experimento foi realizado em duplicata.

O mesmo procedimento foi executado, entretanto sem a presença de fibra entre os filamentos do sensor.



Figura 25 Célula de testes durante o experimento I.

3.2.2 - Experimento II - Correlação entre sinal do sensor e posição da frente de escoamento.

O objetivo deste experimento foi estabelecer uma relação válida entre a posição da frente de escoamento e o sinal medido pelo sensor. Isso é importante para converter o a medida em volt obtida por meio do multímetro digital em comprimento do sensor molhado medido em centímetros.

Para este teste, foi utilizada a mesma célula construída no experimento II. O espaçamento entre os filamentos do sensor foi mantido em 1 cm assim como a disposição deles na célula juntamente com a fibra de vidro.

Este experimento foi conduzido em quadruplicata. Os procedimentos de preenchimento da célula com o fluido de teste e de medição foram os mesmos empregados no experimento anterior.

Uma análise estatística foi realizada em cima dos resultados obtidos.

3.2.3 - Experimento III – Influência do espaçamento entre os filamentos do sensor

Com o intuito de verificar a influência do espaçamento entre os filamentos de cobre o mesmo procedimento dos experimentos anteriores foi utilizado. O espaçamento adotado foi de 2 cm e os resultados serão comparados com os dos testes anteriores a fim de observar a tendência na variação dos resultados.

3.2.4 - Experimento IV – Monitoramento do aquecimento do sensor

Em um processo RTM é sempre necessário monitorar a temperatura ao longo do tempo. Esta informação é útil principalmente quando se conhece a cinética de cura da resina empregada. Isso permite determinar o tempo de cura mínimo a partir do qual o compósito possa ser desmoldado sem criar tensões no material e sem prejuízo para as demais propriedades mecânicas podendo, dessa forma, garantir a fabricação de uma peça de boa qualidade mantendo simultaneamente a produtividade da unidade em termos de unidades produzidas por tempo.

Com isso em mente, um novo sistema foi desenvolvido a fim de analisar a viabilidade de se extrair informações de variação de temperatura do sensor, acompanhando o processo de cura da resina de forma a simplificar a instrumentação da unidade.

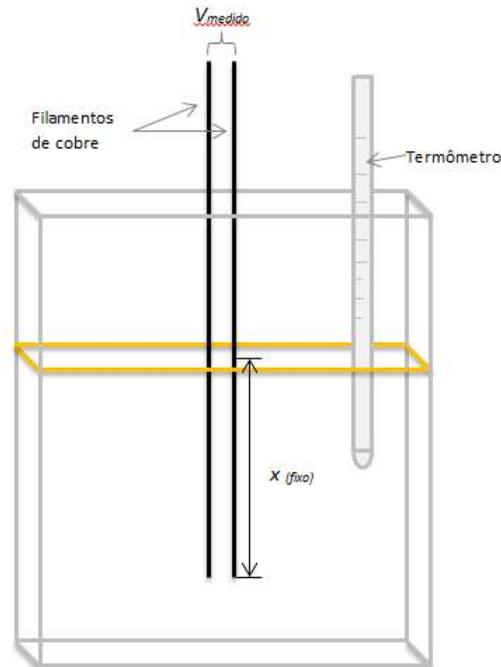


Figura 26: Representação esquemática do sistema usado no experimento III.

Esse sistema consiste em um recipiente de vidro com uma quantidade fixa de fluido de teste onde os filamentos do sensor são mantidos na posição vertical, normal à superfície do fluido e parcialmente imersos nele em um comprimento específico conforme a Figura 26.

O experimento é conduzido mantendo-se um comprimento constante x dos filamentos enquanto a temperatura do fluido de teste é modificada por uma placa de aquecimento. O fluido é mantido sob agitação com auxílio do agitador magnético para garantir uma temperatura homogênea do sistema e as leituras são determinadas com o auxílio de um termômetro de mercúrio.

Os filamentos de cobre são conectados a uma fonte e as medidas de diferença de potencial elétrico entre eles são obtidas por um multímetro. Desse modo, pode-se obter um perfil de variação da leitura de voltagem com a temperatura do sistema.

Deve-se notar, no entanto, dado o fato de que a diferença de potencial é medida entre os filamentos e não ao longo deles em cada uma correlação obtida por esse sensor calcularia na realidade uma temperatura média do fluido ou resina na região próxima a ele dentro da cavidade do molde durante o processo e não fornece a temperatura real a cada ponto da superfície dos filamentos.

Neste experimento foram realizados dois testes em que as temperaturas partiam da temperatura ambiente até a temperatura final de 80°C. Foram observadas mudanças na cor e turbidez da solução diluída de glicose de milho, o que constitui um indicativo de mudanças nas propriedades do fluido. Esse fato poderia influenciar as leituras. A taxa de aquecimento foi baixa (em torno de 1°C/min) de forma que as leituras de voltagem pudessem ser obtidas a cada grau de temperatura e de forma a garantir a hipótese de temperatura homogênea do sistema.

O espaçamento entre os filamentos foi mantido constante em 1cm e o comprimento submerso dos filamentos foi $x=5$ cm.

3.2.5 - Experimento V – Monitoramento do resfriamento do sensor

Este experimento tem a finalidade de investigar mais potencialidades do sensor com relação ao monitoramento da temperatura do compósito. Com esse

intuito, a mesma montagem do experimento anterior foi utilizada, porém foi monitorado o resfriamento do sistema.

O espaçamento entre os filamentos foi mantido constante em 1 centímetro, assim como a porção submersa dos filamentos ($x=5$ cm).

O fluido de teste foi aquecido sob agitação até a temperatura de 80°C e depois deixado esfriar lentamente a uma taxa de aproximadamente 1°C/min. As leituras de voltagem foram obtidas a cada grau de temperatura. Deve-se observar que a temperatura limite inferior está limitada à ambiente, caracterizando equilíbrio térmico entre o sistema e o ambiente pois não foi utilizado sistema de resfriamento.

3.2.6 - Experimento VI – Verificação do novo arranjo do sensor elétrico linear

Sabe-se que sensores elétricos, como o sensor dielétrico linear, sofrem interferências de campos elétricos causados principalmente por equipamentos em um ambiente industrial. Por outro lado, um conjunto de três ou mais filamentos paralelos poderia ser usado para monitorar o escoamento de uma resina durante a fase de preenchimento do molde em outras áreas.

Isso é útil para a detecção de áreas não preenchidas e obtenção de dados experimentais para trabalhos de simulação. Este experimento foi executado para verificar a influência de mais um filamento no conjunto que constitui o sensor.

Foi utilizado um sistema semelhante aos experimentos IV e V, porém com 3 filamentos de cobre paralelos (Figura 27).

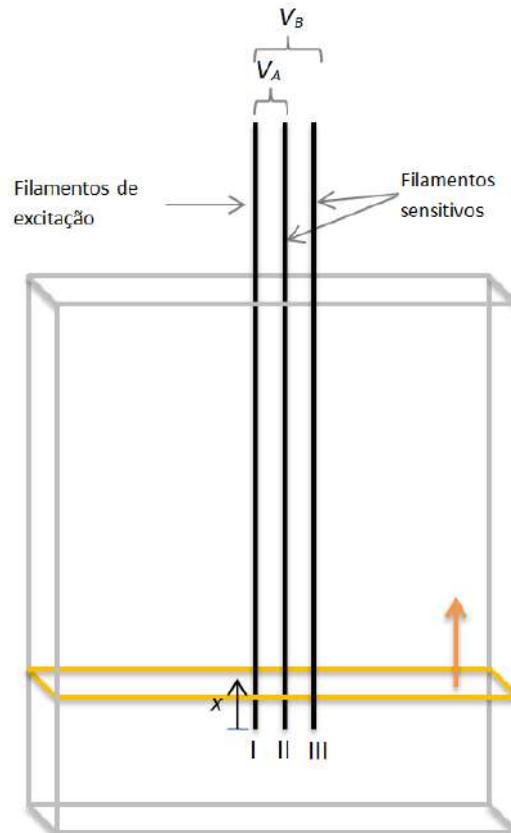


Figura 27: Representação esquemática do sistema utilizado no experimento VI.

O sensor agora é composto por um filamento de excitação (I) ligado a um terminal da bateria e dois filamentos sensitivos (II e III) ligados em paralelo ao outro terminal da bateria. Foram utilizados dois multímetros que mediram a diferença de potencial elétrico entre as fibras I e II (V_A) e entre I e III (V_B).

O experimento começa com o recipiente de vidro seco de modo que $x_0=0$. Fluido de teste foi então sendo adicionado de forma a fazer o nível de líquido subir e começar a molhar o conjunto de filamentos simulando o processo de escoamento. A partir de x_0 as leituras dos multímetros são tomadas a cada 0,5cm. Foram registrados dados até $x=x_f=10$ cm.

3.2.7 – Experimento VII – Construção, operação e medidas de permeabilidade na unidade RTM

Conhecendo o comportamento do sensor, pode-se agora testar seu uso na unidade de processamento de placas compósitas. Os objetivos deste experimento são:

- Verificar a possibilidade de fabricação de placas de material compósito na unidade;
- obter a permeabilidade no plano utilizando fluido de teste pela captura de imagens;
- obter a permeabilidade unidirecional utilizando fluido de teste através do uso do sensor elétrico linear;
- comparar os resultados entre os dois conjuntos de dados.

3.2.7.1 - Unidade de Processamento RTM

a) Mesa, fixação do molde e câmeras

A mesa é a base de toda a unidade de processamento RTM como mostrada na Figura 28. Fabricada com metalon, ela suporta o sistema de fixação das câmeras e do molde. Possui dimensões 700 mm x 700 mm de área com segmentos de 60 mm x 60 mm e 2 mm de espessura. A altura da mesa é 1300 mm de forma a permitir a fixação do sistema de câmeras.

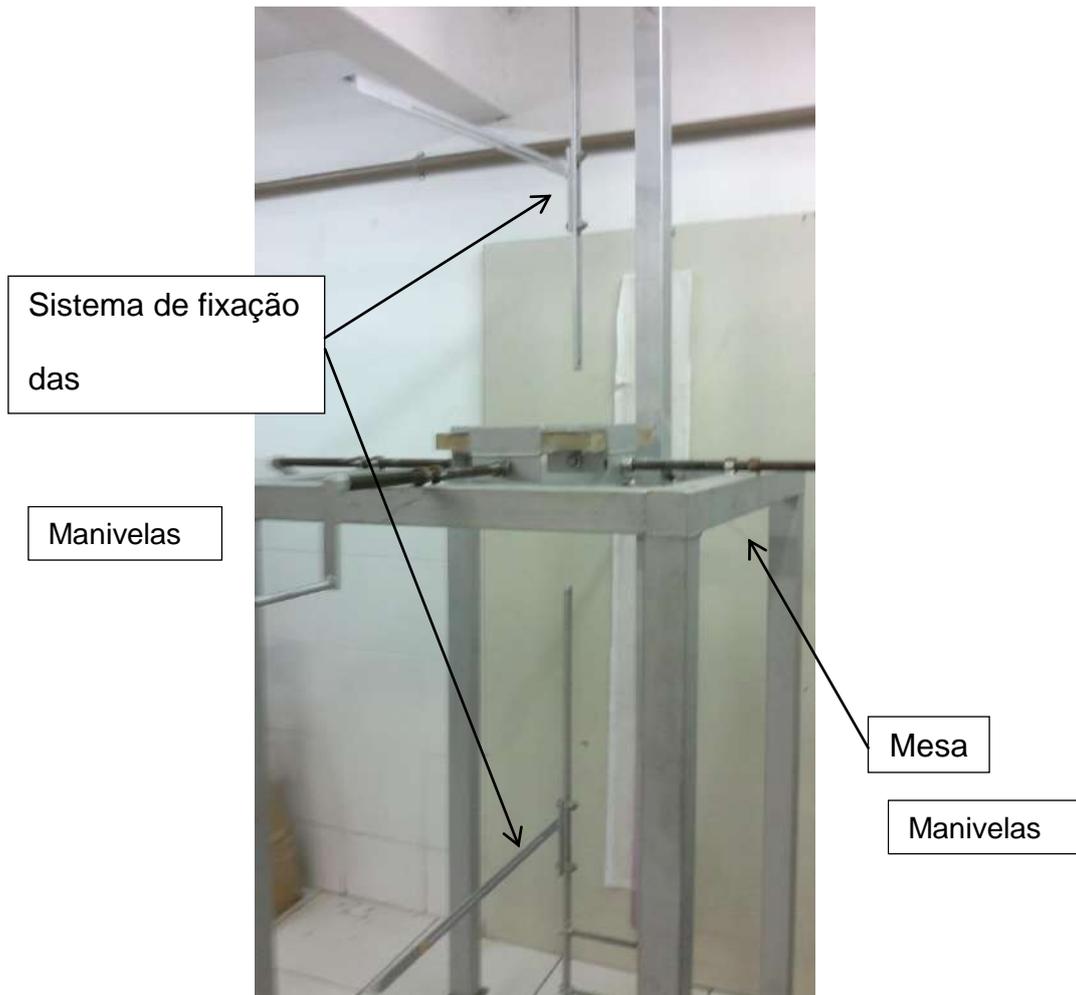


Figura 28: Mesa e Sistemas de fixação da câmera e molde.

O sistema de câmeras consiste de hastes de aço que são ajustáveis e removíveis de forma a permitir o ajuste das câmeras em 3 eixos permitindo a obtenção do melhor foco para a captura de imagens.

O sistema de fixação do molde consiste de num conjunto de quatro manivelas que ajustam quatro pontos de apoio para o molde (Figura 29). Isso permite o ajuste horizontal do molde, assim como a sua retirada para abertura ou montagem. O sistema também permite o estudo de peças com moldes de até 600 mm x 600 mm.

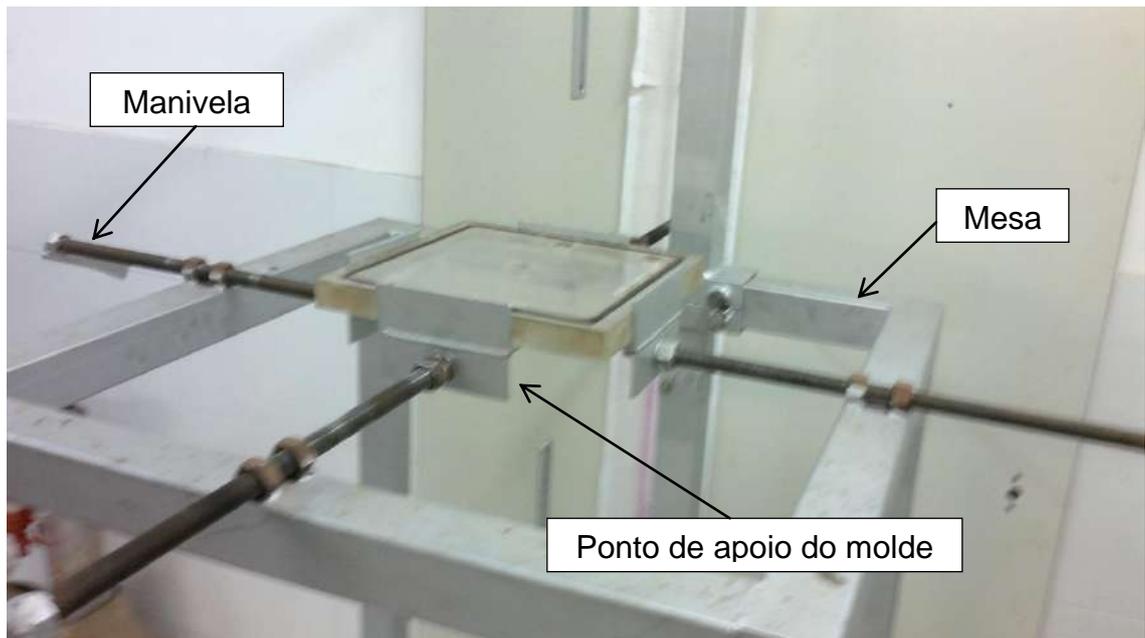


Figura 29: Sistema de fixação do molde.

b) Molde e sistema de injeção

O molde consiste em duas placas de acrílico de $300 \times 300 \times 30 \text{ mm}^3$ e um espaçador de aço 1045 de $300 \times 300 \times 7,5 \text{ mm}^3$ (Figura 30). É necessário que o molde seja transparente de forma que imagens possam ser obtidas pelas câmeras durante o escoamento de fluido de teste na parte interior.

A espessura de 30 mm foi selecionada de modo a manter a rigidez do molde e reduzir efeitos de deflexão da peça durante o experimento. Isso é necessário para garantir uma espessura da peça e fração volumétrica de fibra constantes no interior do molde uniformizando o escoamento.

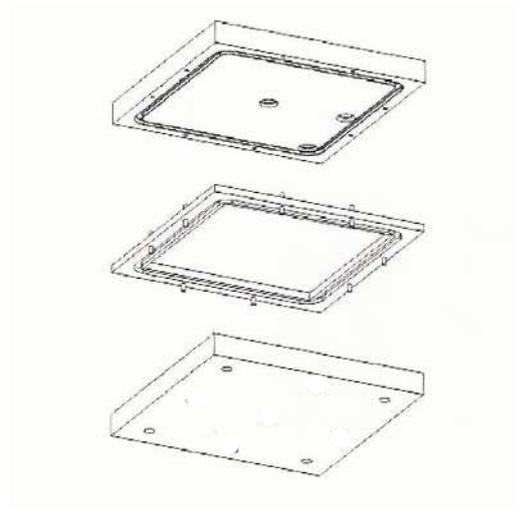


Figura 30: Tampas de acrílico e espaçador do molde [Amorim Júnior, W. F., 2007].

A tampa de acrílico superior possui uma abertura no centro onde se encaixa um bico de injeção de aço inox, conforme a Figura 31, vedado por um anel de borracha do tipo *O-ring*. O bico de injeção é fixado ao molde com auxílio de uma porca e possui um furo interno de 6 mm constituindo o raio do furo de injeção R_{01} .



Figura 31: Bico de injeção e porca do molde [Amorim Júnior, W. F., 2007].

Esse raio foi escolhido com base nos resultados de Weitzenböck *et al* (1999) (Figura 32) que analisou a influência do raio do furo de injeção na

estabilização da frente de escoamento que possui formato elíptico como na Figura 33. Diz-se que a frente de escoamento se estabilizou quando uma elipse estável é formada.

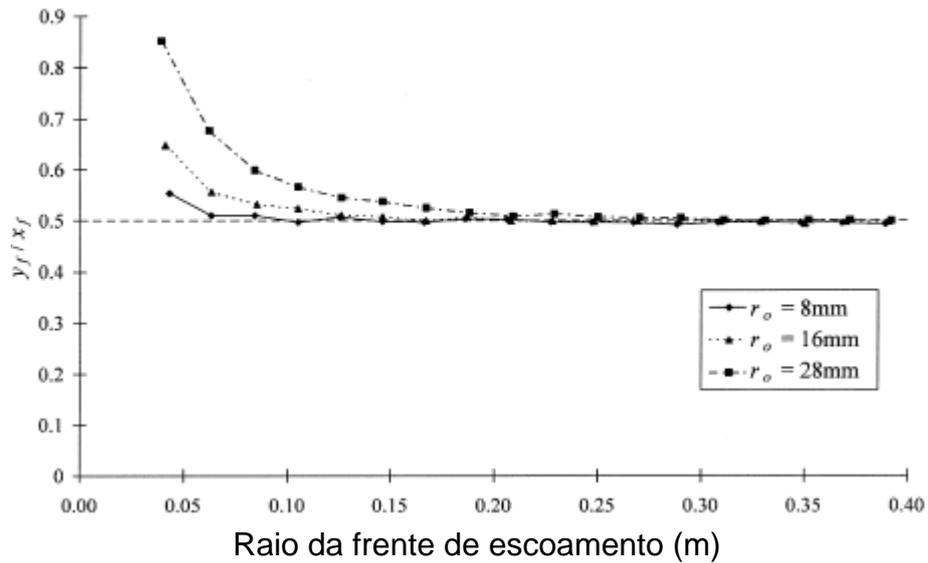


Figura 32: Análise da influência do raio de injeção na estabilização da frente de escoamento, [Weitzenböck J.R., et al, 1999].

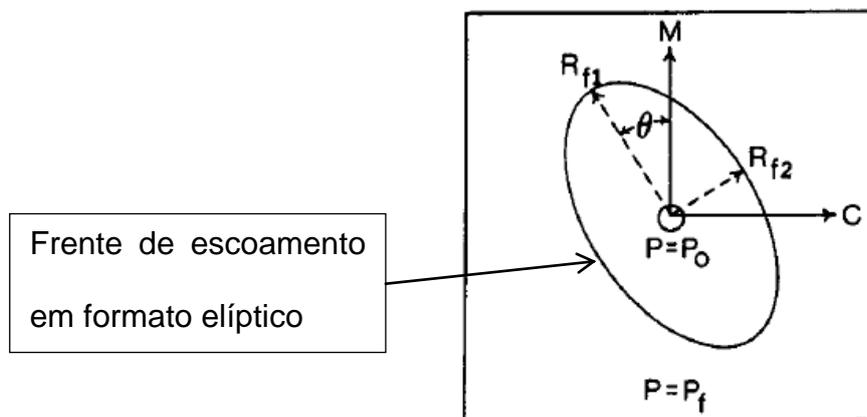


Figura 33: Frente de escoamento produzida por um meio poroso anisotrópico. [Adams K. L., et al, 1988].

Os valores x_f e y_f são os valores dos semieixos da elipse formada pela frente de escoamento do fluido dentro do molde quando esta se estabiliza formando uma relação y_f/x_f constante. O gráfico mostra a relação para vários

raios de injeção. Conclui-se que quanto menor o raio de injeção mais cedo a frente de escoamento se estabilizará. Dessa forma, o raio de 6 mm escolhido contribuiria para uma rápida estabilização.

Uma mangueira conecta a entrada do bico de injeção ao reservatório de fluido de teste que é constituído de um balde plástico.

A tampa inferior do molde possui quatro furos ou *vents* com bicos de aço. Cada *vent* está conectado a um recipiente de armazenamento de excesso de resina que por sua vez está ligado à bomba de vácuo.

c) Sistema de Instrumentação

O arranjo de filamentos de cobre usado nos experimentos I a V foi utilizado para monitorar o avanço da frente de escoamento durante o processo. O arranjo foi posicionado dentro da cavidade do molde sobre a última camada de tecido de fibra de vidro para de reduzir um possível escoamento preferencial ao longo da superfície do sensor. Ele foi posicionado ao longo de um dos semieixos da elipse formada durante o escoamento e de forma a ter uma de suas extremidades fora do molde (Figura 34).

A extremidade de cada filamento foi conectada a fonte cada uma a um dos terminais diferentes do multímetro. Com isso, as medidas de diferença de potencial entre eles e sua variação com o tempo puderam ser obtidas como auxílio de um cronômetro digital.

Por meio da correlação obtida no experimento II, esses valores são então convertidos em uma medida de distância x , que corresponde ao avanço da frente de escoamento ao longo do semieixo monitorado.

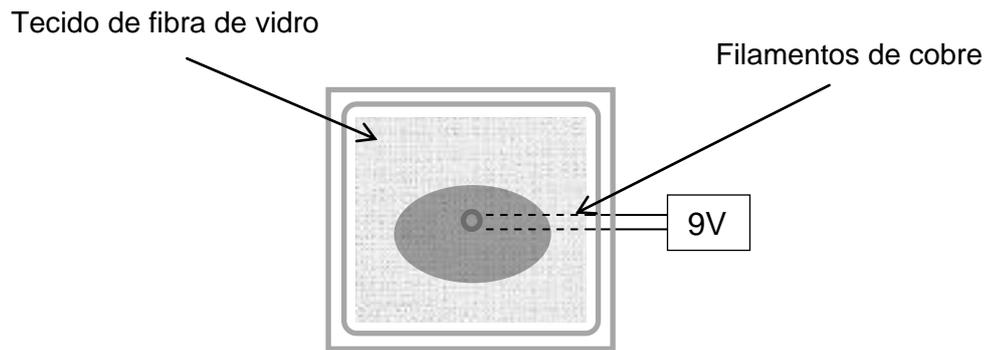


Figura 34: Arranjo do sistema de instrumentação.

A fixação do sensor se deu pela da vedação de etil-vinil acetato (EVA). Os únicos pontos de contato direto dos filamentos com o molde são onde se encontra a vedação que funciona como isolante elétrico.

Câmeras são fixadas nas partes superior e inferior das hastes fixadas à mesa. Elas capturam o movimento do fluido logo abaixo das tampas de acrílico que apresentam pontos milimetrados marcados em sua superfície (Figura 35) o que permite mapear o avanço da frente de escoamento nos semieixos da elipse formada durante o processo.

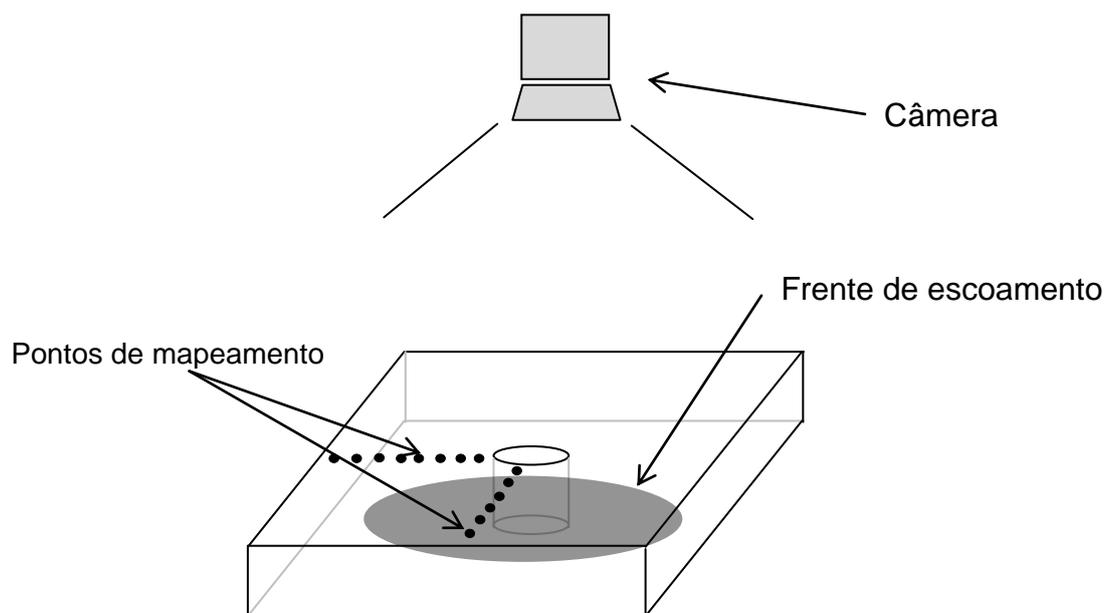


Figura 35: Sistema de monitoramento visual superior.

O sistema de instrumentação utilizado permite a obtenção da posição da frente de escoamento com o tempo e com isso o cálculo da permeabilidade pode ser realizado utilizando dados provenientes dos dois métodos utilizados: através de dados do sensor elétrico linear e dados obtidos por imagens da câmera.

Isso permite a comparação entre os resultados obtidos para cada um dos métodos utilizados.

3.2.7.2 – Procedimento

O experimento inicia-se com a preparação do tecido de fibra de vidro. O tecido foi cortado em quadrados de forma a preencher completamente o interior do molde. Foram utilizadas 25 camadas de tecido.

A etapa seguinte consiste na preparação do molde onde se encaixa à tampa inferior de acrílico uma folha de EVA, o espaçador de aço e duas folhas de EVA. Posicionam-se as 25 camadas de tecido de fibra de vidro; em seguida, fixam-se os filamentos do sensor pelas folhas de EVA e procede-se ao fechamento do molde com a tampa superior de acrílico. O conjunto é então fixado com o auxílio de grampos em formato C e é preso à mesa de metalon.

Conectam-se as mangueiras aos bicos de injeção e aos *vents*, à bomba de vácuo e aos recipientes de armazenamento de resina. Após, monta-se o sistema de instrumentação, liga-se a bomba de vácuo. Só então pode-se dar início ao experimento.

Por meio da câmera obtiveram-se duas séries de dados, uma em cada direção, são elas: R1 e R2 (Figura 36). Por meio do sensor elétrico linear, foi obtida a série de dados RV1 que está na mesma direção de R1.

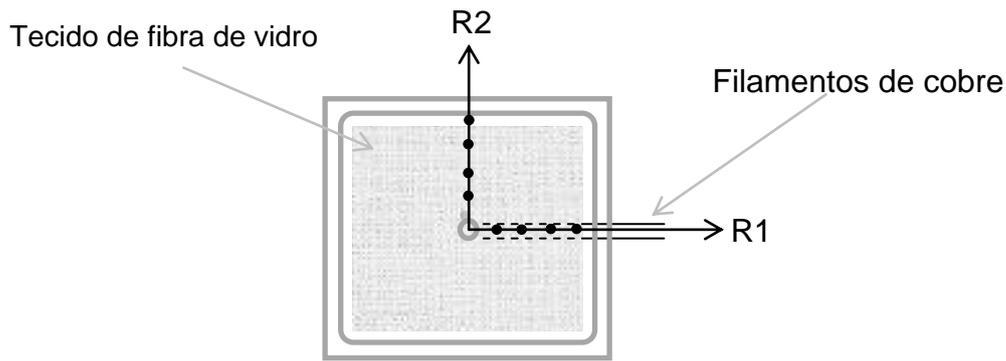


Figura 36: Esquema de medição visual e localização do sensor elétrico linear no molde.

Ao final do experimento, o vácuo é desligado e o sistema é despressurizado. Drena-se o excesso de fluido e teste e só então o molde pode ser aberto. Os filamentos de cobre são retirados, lavados e secos. O mesmo acontece com as camadas de fibra de vidro e as peças que constituem o molde.

3.2.7.3 - Ajustes preliminares na unidade

Ajustes preliminares na unidade foram executados com a finalidade de verificar e garantir o correto funcionamento de todos os componentes da unidade. Foram realizados ajustes na bomba de vácuo para regular a pressão em 1,5 bar e testes de vedação do molde, mangueiras e conexões. Esses testes foram realizados na unidade montada utilizando água em substituição ao fluido de teste e seguindo os procedimento de operação descrito na seção 3.2.7.2. Não foram realizadas medições com o sensor ou câmeras nessa etapa.

Foram utilizadas fitas de teflon para seladoras a vácuo, assim como fitas de vinil e folhas de etil-vinil acetato (EVA). Duas folhas de EVA foram cortadas

de modo a coincidir com as dimensões do espaçador de aço do molde e foram posicionadas acima dele, abaixo da tampa de acrílico superior como na Figura 37. Outro conjunto de duas folhas foi posicionado entre o espaçador e a tampa de acrílico inferior.



Figura 37: Montagem do molde.

A utilização de EVA tem dupla função: vedar o molde contra vazamentos de fluido de teste e isolar eletricamente os filamentos de cobre do sensor linear.

A escolha do EVA baseou-se nas seguintes características do material:

- Possui baixa absorção de água;
- isolante elétrico;
- material não-tóxico;
- baixo custo;
- facilidade de corte e manuseio.

Com o fim dos vazamentos, o experimento pôde ser executado.

Capítulo 4

Resultados

4.1 – Experimento I – Determinação da ordem de grandeza da voltagem

A voltagem medida entre os filamentos de cobre antes do início do teste foi de 9,28 volt, sendo esse o valor de diferença de potencial correspondente a x_0 , ou seja, a 0% da superfície do sensor molhada pela solução teste. Para a execução do experimento em duplicata, o valor de x_0 foi 9,26 volt. A temperatura da solução teste e do sistema foi constante e medida em 21°C.

O valor de diferença de potencial correspondente a 100% da superfície do sensor molhada foi medido no comprimento definido em x_L igual a 10 cm. Os resultados se encontram nas Tabelas 6 e 7 e Figuras 38 e 39. Para efeito de comparação, o experimento foi realizado em duplicata. Um experimento semelhante foi realizado com a mesma célula de teste com todos os componentes, porém sem a fibra de vidro (Tabela 7).

Os resultados do Experimento I se mostraram semelhantes por possuírem tendência negativa. A diferença percentual entre os valores dos coeficientes angulares foi de 5,4466%, portanto pequena. A diferença entre os valores iniciais x_0 , que foi de 0,12 V ou 1,2959% também é pequena.

Foram executadas regressões lineares aos dois conjuntos de dados. Os parâmetros que ajudam a caracterizar a qualidade das regressões são

apresentados na Tabela 8 e as análises de variância na Tabela 9. A Figura 39 apresenta um gráfico que mostra os resíduos da regressão do experimento com fibra, que é o principal resultado do Experimento I.

Tabela 6: Resultados do Experimento I com a Presença da Fibra de Vidro

x (cm)	V (volt)	V (volt) (duplicata)	Vmédio (volt)	Desvio-padrão (volt)
0	9,28	9,26	9,27	0,0141
1	9,22	9,19	9,21	0,0212
2	9,19	9,14	9,17	0,0354
3	9,14	9,07	9,11	0,0495
4	9,11	9,04	9,08	0,0495
5	9,05	9	9,03	0,0354
6	9	8,96	8,98	0,0283
7	8,96	8,9	8,93	0,0424
8	8,91	8,86	8,89	0,0354
9	8,88	8,83	8,86	0,0354
10	8,86	8,79	8,83	0,0495

Tabela 7: Resultado do Experimento sem Fibra

x (cm)	V (volts) (sem fibra)	Desvio-padrão (volt)
0	9,12	0,0292
1	9,13	0,0008
2	9,09	0,0408
3	9,10	0,0103
4	9,10	0,0038
5	9,07	0,0240
6	9,08	0,0116
7	9,04	0,0585
8	9,06	0,0161
9	9,03	0,0368
10	9,03	0,0201

A maior discrepância ocorreu entre os experimentos com e sem fibra. Essa diferença se mostrou significativa nos coeficientes linear e angular,

refletindo as diferenças fundamentais entre os experimentos. Embora a tendência seja sempre negativa, a queda é muito maior nos experimentos com fibra do que no sem fibra de vidro. Isso sugere que a presença da fibra de vidro no sistema contribui positivamente para a condutividade elétrica na região entre os filamentos do sensor.

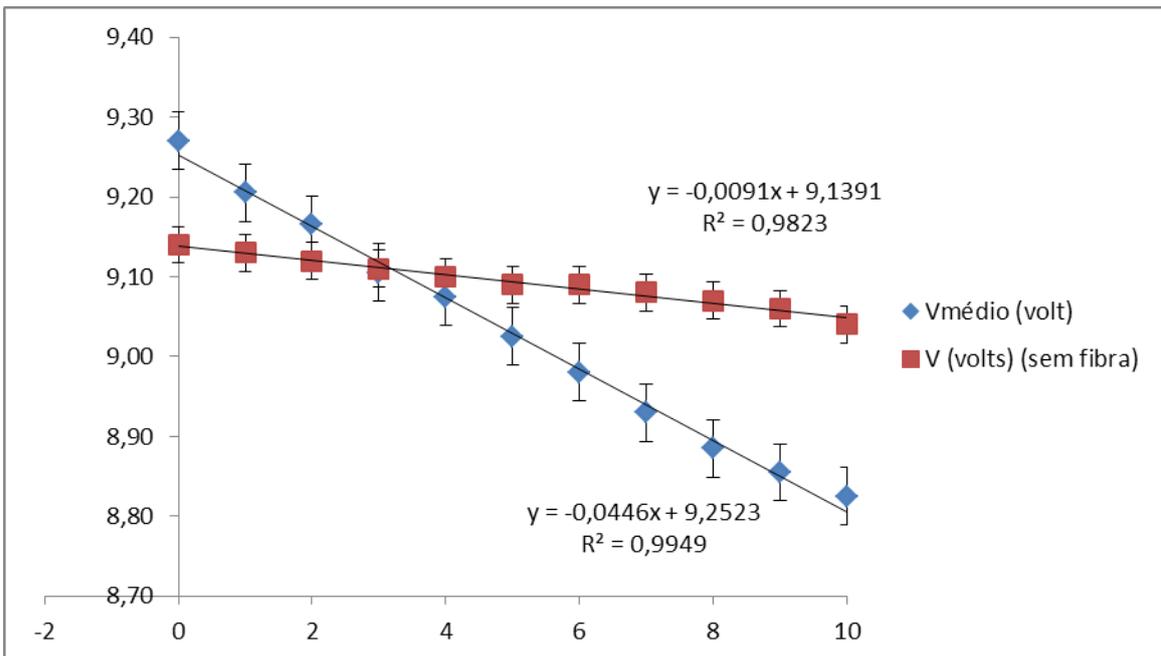


Figura 38: Resultados do Experimento I.

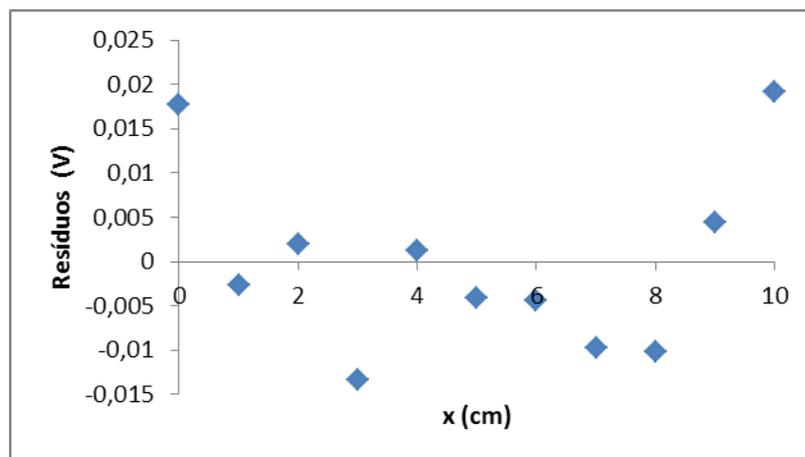


Figura 39: Plotagem de resíduos do ajuste de Vmédio.

Tabela 8: Parâmetros da regressão dos dados

Com Fibra	
Parâmetro da Regressão	Valor
R ²	0,994887
R ² ajustado	0,994319
Desvio-padrão de V (com fibra)	0,148422
Sem Fibra	
Parâmetro da Regressão	Valor
R ²	0,9823
R ² ajustado	0,9804
Desvio-padrão de V (sem fibra)	0,030421

Tabela 9: Análise de Variância dos Experimentos com e sem Fibra

Com Fibra					
α=0,050	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p-valor
Regressão	0,219165	1	0,219165	1751,194	0,0000
Resíduos	0,001126	9	0,000125		
Total	0,220291	10			
Sem Fibra					
α=0,050	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p-valor
Regressão	0,009091	1	0,009091	500,000	0,0000
Resíduos	0,000164	9	0,000018		
Total	0,009255	10			

O valor de R² ajustado para os experimentos (Tabela 8) com e sem fibra se mostraram elevados. O valor p (Tabela 9) na análise de variância para os dois conjuntos de dados foi calculado obtendo-se o valor zero. Os resíduos para V_{médio} (Figura 39) tem variância constante visto o caráter aleatório dos pontos. Além disso, eles possuem distribuição próxima da normal (pois o teste de Shapiro-Wilk resultou em W próximo a 1), como pode ser observado na Figura 40.

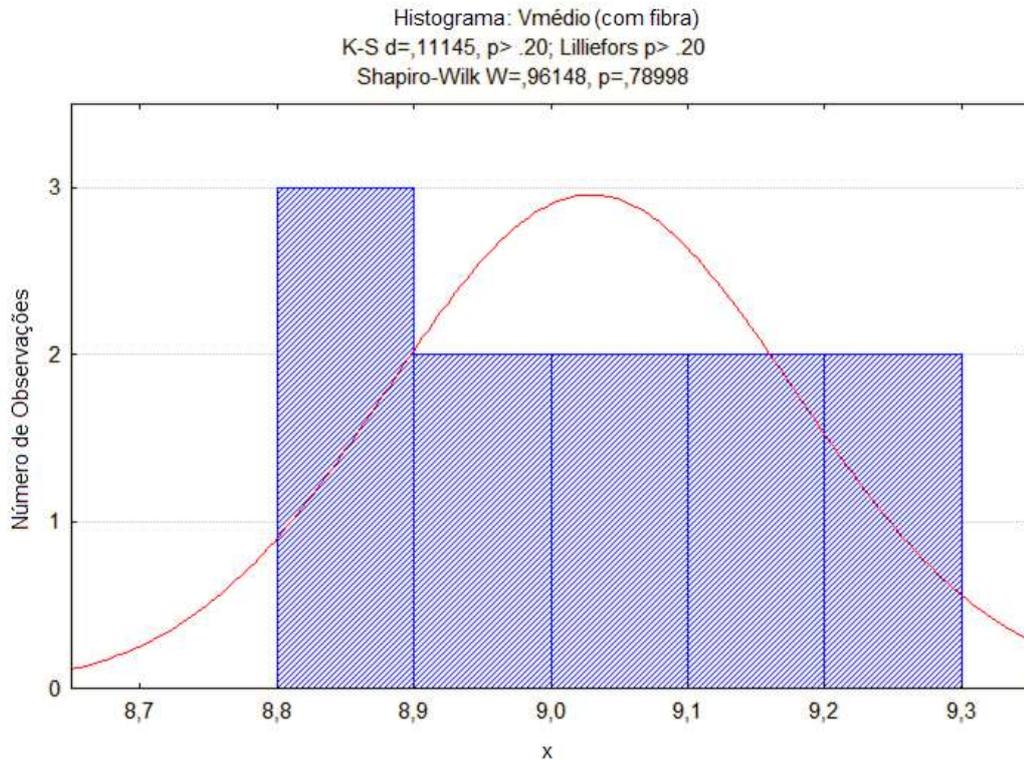


Figura 40: Histograma de distribuição dos resíduos de Vmédio.

Esses resultados indicam que o modelo linear adotado nos dois casos possui um alto poder de explicação e são estatisticamente significativos. Dessa forma uma relação linear pode explicar bem a dependência entre Voltagem medida e posição da frente de escoamento nas condições do experimento.

Em resumo: A diferença entre os valores inicial e final de voltagem foi de 445 mV em média no experimento com fibra e de 100 mV no sem fibra de vidro. Portanto a sensibilidade quando a fibra de vidro está presente no meio é aproximadamente quatro vezes superior (44,5 mV/cm contra 10 mV/cm) o que favorece a tomada de medidas de diferença de potencial no sistema por não ser necessário equipamentos muito precisos e caros.

4.2 - Experimento II - Correlação entre sinal do sensor e posição da frente de escoamento

Os principais resultados deste experimento, executado em quadruplicada, estão apresentados na Tabela 10 e na Figura 41, onde se encontram a média dos resultados obtidos em cada execução com seus respectivos valores de desvio-padrão que permitem caracterizar a dispersão dos resultados em gráfico de resíduos (Figura 42).

Tabela 10: Resultados do Experimento II

x (cm)	Vmédio normalizado (volt)	Desvio-padrão (volt)
0	1,000	0,000
1	0,936	0,033
2	0,887	0,030
3	0,793	0,045
4	0,718	0,086
5	0,620	0,098
6	0,512	0,091
7	0,386	0,077
8	0,265	0,064
9	0,131	0,035
10	0,000	0,000

O valor do coeficiente de determinação R^2 ajustado (Tabela 11) na regressão quadrática foi próximo à unidade. O valor p calculado (Tabela 12) na análise de variância foi zero. Os resíduos para $V_{médio}$ (Figura 42) possuem variância constante dado o caráter aleatório da distribuição dos pontos. Eles possuem distribuição próxima da normal (W próximo a 1), como pode ser observado na Figura 43.

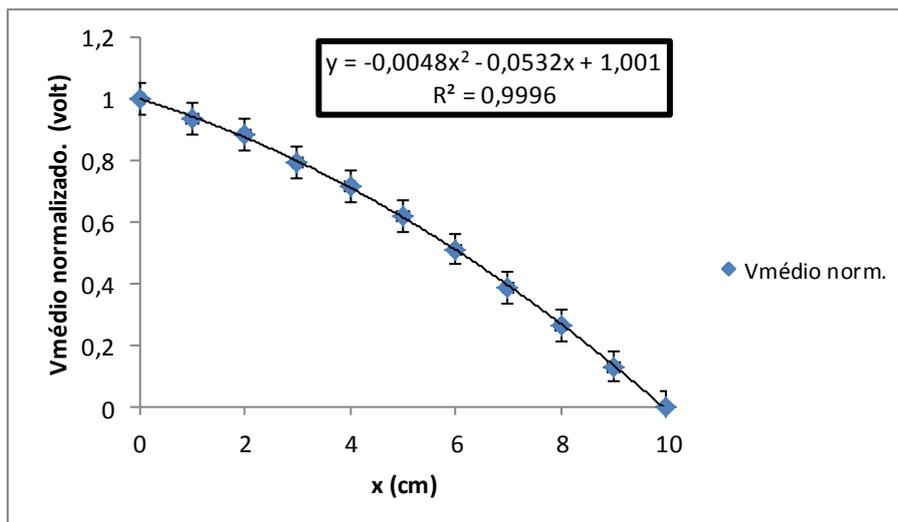


Figura 41: Gráfico referente aos dados da Tabela 6 e ajuste aos dados do experimento.

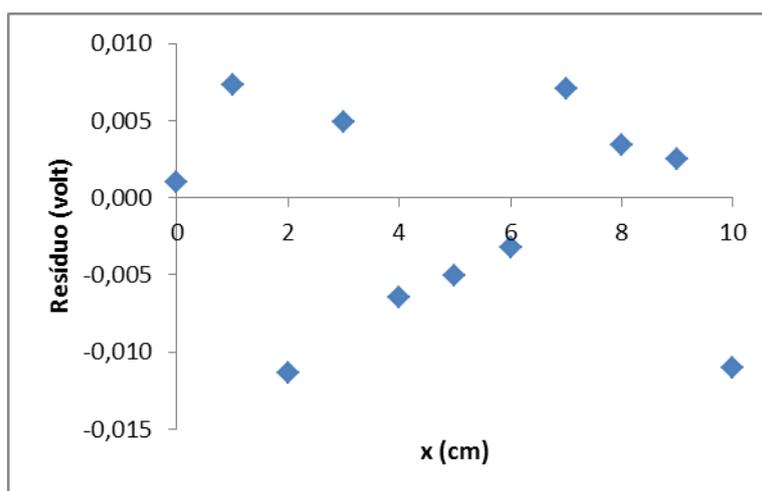


Figura 42: Plotagem de resíduos do modelo.

Tabela 11: Parâmetros da regressão e do modelo

Parâmetro da Regressão	Valor
R^2	0,999612
R^2 ajustado	0,999568
Modelo: $V(x) = ax^2 + bx + c$	
Desvio-padrão de V (sem fibra)	Valor
a	0,000247
b	0,00256
c	0,005502

Tabela 12: Análise de Variância do Experimento II

$\alpha=0,050$	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	F	p-valor
Regressão	896,9892	3,00000	298,9964	5732393	0,0000
Resíduos	0,0004	8,00000	0,0001		
Total	896,9896	11,00000			

A análise estatística mostrou que o modelo quadrático, obtido por meio da regressão dos dados do experimento, possui alto poder de explicação e é estatisticamente significativo sendo, portanto, adequado para descrever a relação entre a voltagem medida entre os filamentos de cobre e a posição da frente de escoamento.

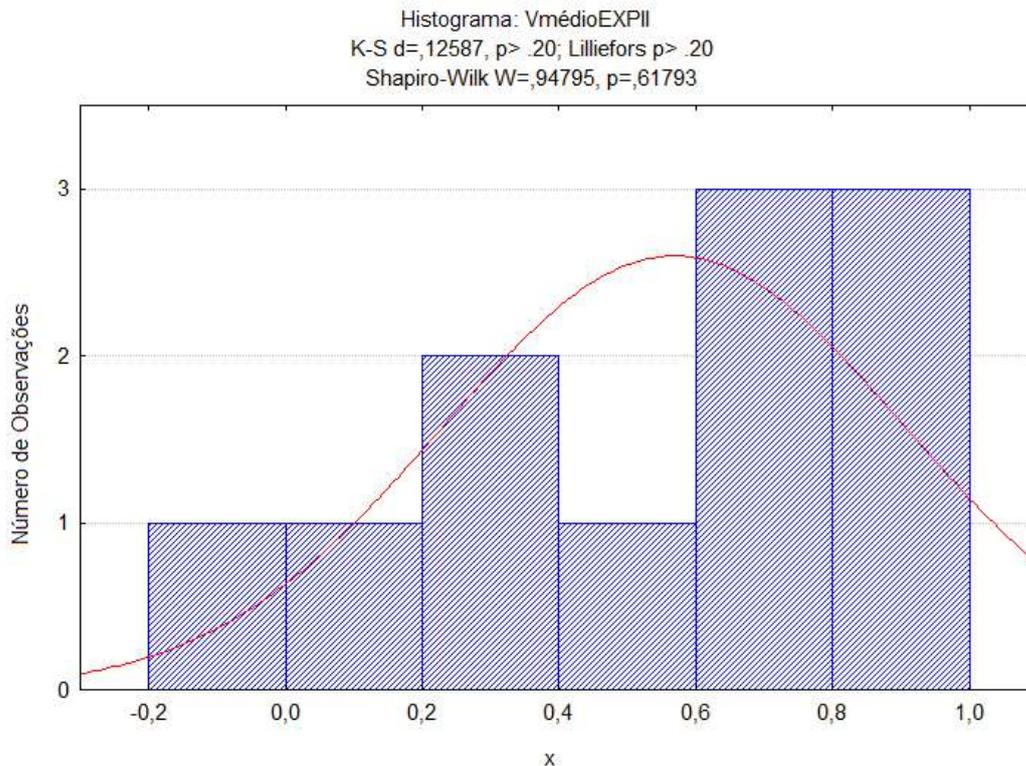


Figura 43: Histograma de distribuição dos resíduos de Vmédio em relação ao modelo quadrático

O modelo, em sua forma normalizada e não-normalizada são explicitados, respectivamente, nas Equações 11 e 12.

$$V_{norm.} = -0,0048x^2 - 0,0532x + 1,001 \quad (11)$$

$$V = (-0,0048x^2 - 0,0532x + 1,001)(V_i - V_f) + V_f \quad (12)$$

4.3 - Experimento III - Influência do espaçamento entre os filamentos do sensor

Os resultados deste experimento estão indicados como $V_{Exp III}$ e são exibidos com os dados do experimento II ($V_{Exp II}$) na Tabela 13.

Para facilitar a comparação entre as séries de dados estas foram normalizadas a fim de eliminar a influência da voltagem inicial da fonte de eletricidade do sistema. Esses resultados são mostrados na Figura 44.

Tabela 13: Resultados dos Experimentos II e III

x (cm)	VExp II (espaçamento de 1 cm, em volt)	Desvio- padrão de VExp II (volt)	VExp III (espaçamento de 2 cm, em volt)
0	1	0,0032	1
1	0,86	0,1224	0,938356
2	0,75	0,1048	0,890411
3	0,69	0,0965	0,80137
4	0,60	0,0809	0,732877
5	0,55	0,0655	0,636986
6	0,47	0,0532	0,527397
7	0,33	0,0388	0,39726
8	0,23	0,0239	0,273973
9	0,12	0,0056	0,136986
10	0,00	0,0013	0

Esses resultados mostram que há pouca influência no espaçamento entre os fios até uma distância de 2 cm. Isso permite que novos arranjos dos filamentos do sensor possam ser implementados dentro da cavidade do molde.

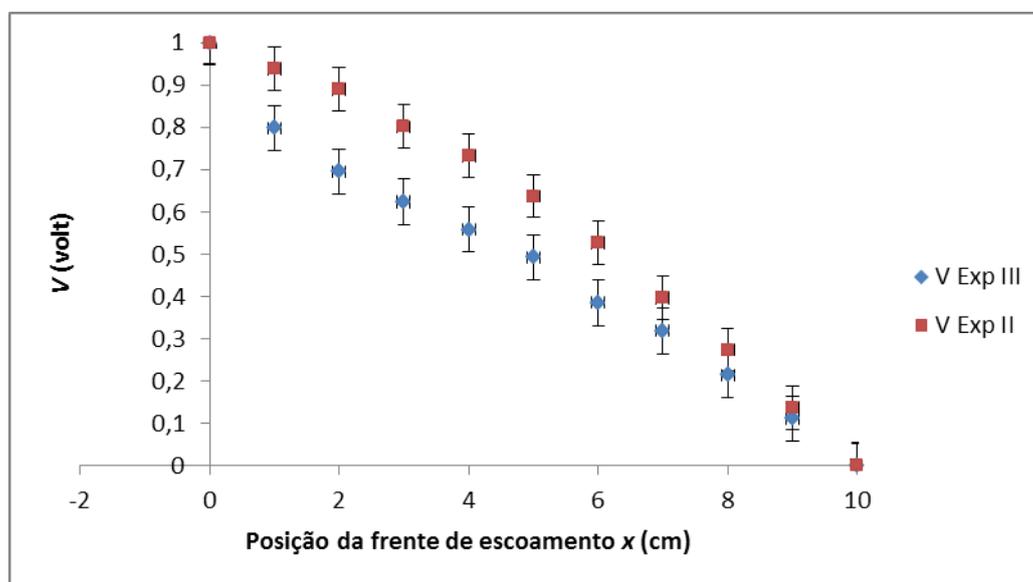


Figura 44: Representação gráfica dos resultados do experimento III.

Além disso, percebe-se que a posição relativa das fibras pouco influencia na medida de diferença de potencial nesse intervalo de 2 cm, principalmente quando pequenas e grandes partes do sensor estão em contato com a resina. Entretanto novos experimentos seriam necessários para se chegar a essa conclusão.

4.4 - Experimento IV - Monitoramento do aquecimento do sensor

Neste experimento foi obtido um total de 63 pontos e 52 pontos na réplica. Os resultados são apresentados na Figura 45. A tabela com os valores numéricos encontram-se no Apêndice 2.

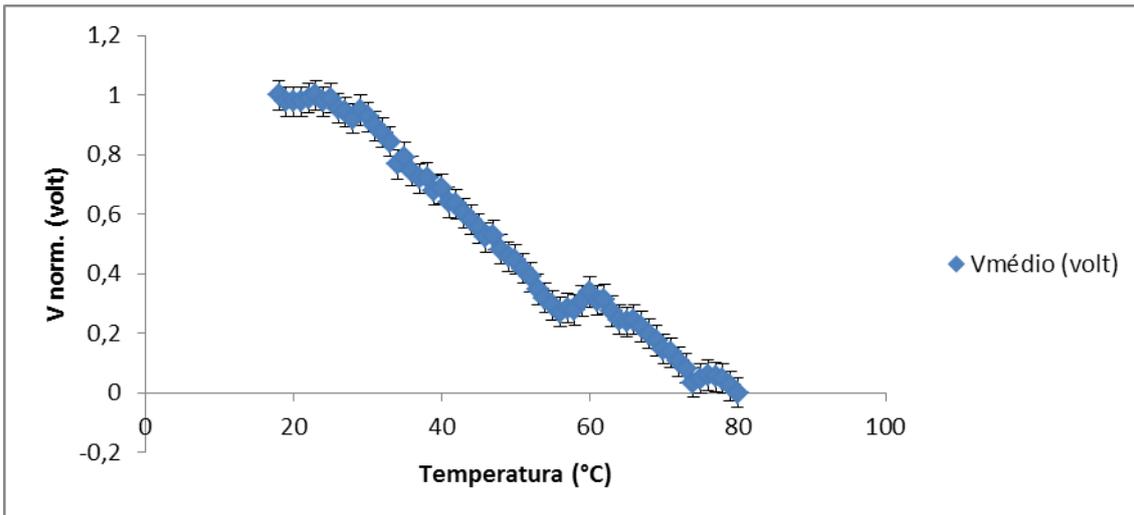


Figura 45: Resultado do experimento de aquecimento.

Os resultados mostram uma forte influência da temperatura na leitura obtida no multímetro. A tendência é de queda nas duas execuções apesar de elas apresentarem aspectos diferenciados.

A queda na medida de diferença de potencial com aumento da temperatura poderia ser explicada pela queda da resistividade elétrica do sensor de cobre, entretanto esse não é o caso. Vejamos:

A resistividade elétrica ρ é definida por:

$$\rho = \frac{R A}{l} \quad (13)$$

em que l é o comprimento equivalente do material, A é a área da seção perpendicular à direção da corrente elétrica e R é a resistência do material. R pode ser relacionado com a diferença de potencial V pela Lei de Ohm:

$$V = R I \quad (14)$$

o que leva a:

$$\rho = V \frac{A}{I l} \quad (15)$$

A condutividade elétrica σ de um material é definida como:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (16)$$

Sabe-se que a resistividade elétrica do cobre puro aumenta com a temperatura da seguinte maneira na curva laranja no Figura 46 (Callister, 2007):

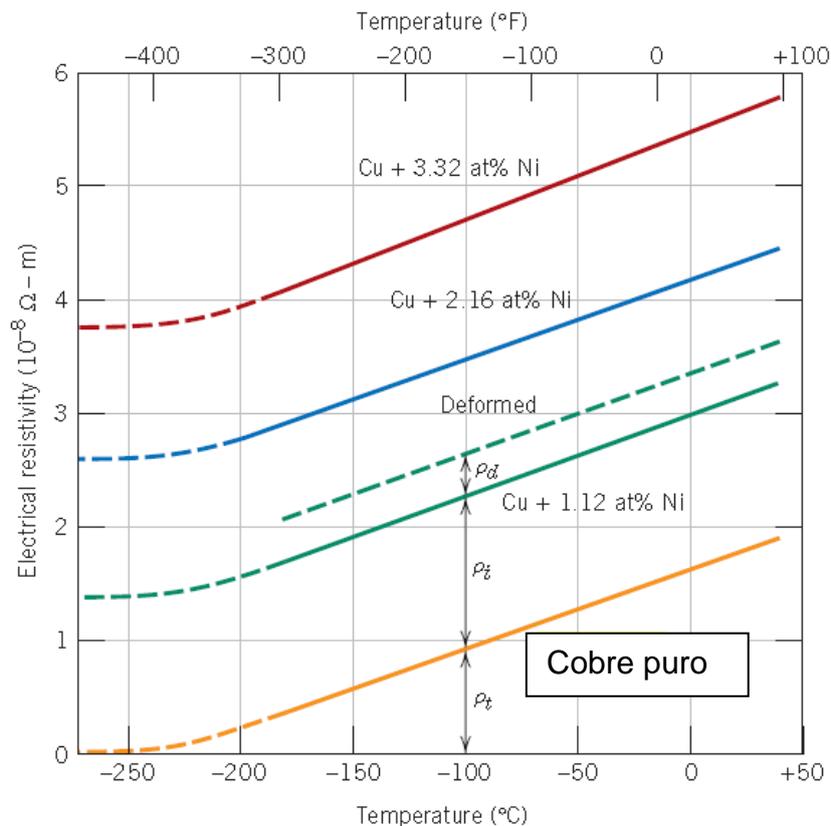


Figura 46: Variação da resistividade de cobre e suas ligas com a temperatura. [Callister, 2007].

Portanto, a diferença de potencial entre os filamentos de cobre deveria aumentar e não diminuir como o observado. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que a resistividade do sistema possui várias contribuições, entre elas a resistividade dos filamentos de cobre e também do meio em fase líquida constituído pelo fluido de teste.

Outras contribuições, como a resistividade devido à presença de impurezas nos filamentos e a resistividade devido a deformações, não são significativas devido ao fato de os filamentos serem constituídos de cobre puro e não sofrerem deformações nos experimentos.

Conclui-se que a resistividade elétrica do meio entre os filamentos é dominante e seu valor cai com o aumento de temperatura devido à dependência positiva da mobilidade dos portadores de carga na solução com a temperatura, explicando, dessa forma, o comportamento observado.

Tal fato permite acompanhar a evolução da temperatura no interior da cavidade do molde.

4.5 - Experimento V - Monitoramento do resfriamento do Sensor

Os resultados em sua forma gráfica são apresentados na Figura 47. Estes resultados confirmam a tendência evidenciada no experimento anterior. Este experimento apresentou uma variabilidade maior nos resultados devido ao desgaste da bateria de 9 V.

As tabelas referentes aos gráficos anteriores encontram-se no Apêndice A3.

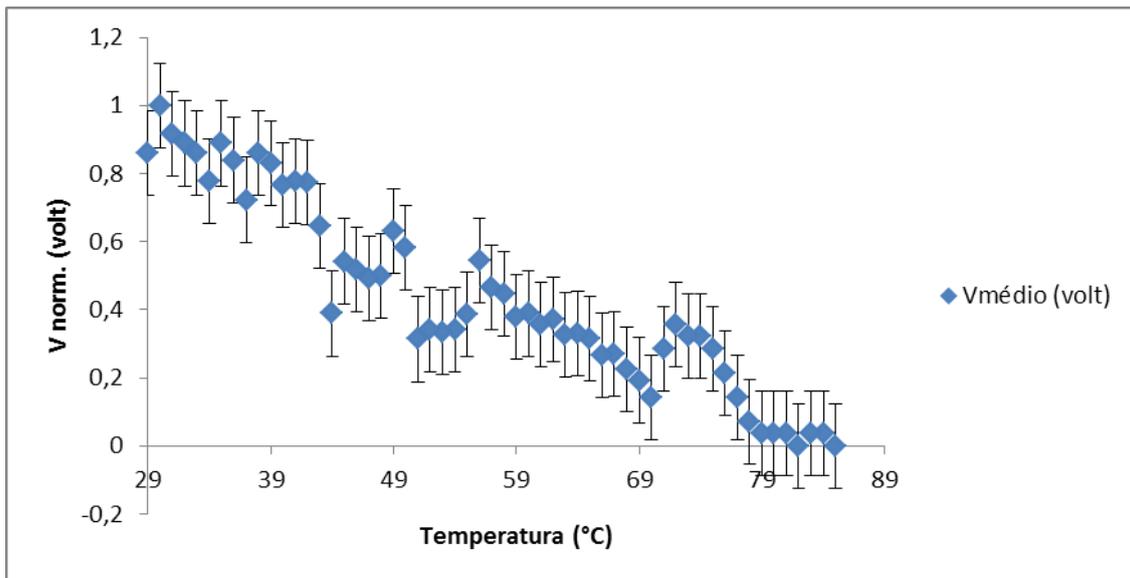


Figura 47: Resultado do experimento de resfriamento.

4.6 - Experimento VI - Verificação do Novo Arranjo do Sensor Elétrico Linear

A posição da frente de escoamento foi determinada com sucesso. Os resultados encontram-se na Tabela 14 e Figura 48.

Tabela 14: Resultados do Experimento VI

x (cm)	VA (entre os filamentos I e II em volt)	VB (entre os filamentos I e III em volt)
0	8,2	8,26
0,5	8,08	8,14
1	8,05	8,11
1,5	7,99	8,05
2	7,92	7,98
2,5	7,86	7,92
3	7,79	7,85
4	7,66	7,72
4,5	7,6	7,66
5	7,53	7,59

Os resultados são similares aos dos experimentos I, II e III como esperado. Os valores obtidos para V_B foram superiores aos de V_A em todos os pontos. Isso reflete o fato de haver uma separação maior entre as fibras onde V_B é medido (2 cm) do que entre as fibras onde V_A é medido (1 cm).

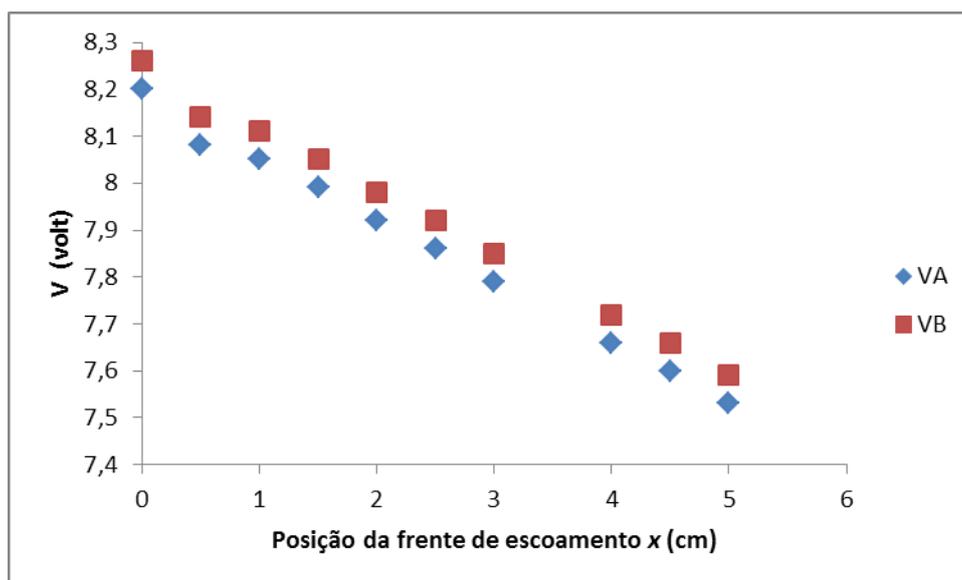


Figura 48: Gráfico do experimento VI.

Isso mostra que a utilização de múltiplas fibras é possível e produz leituras aceitáveis para o monitoramento do escoamento desde que se proceda uma etapa de calibração do sensor.

Neste experimento a separação de 2 cm entre os filamentos I e III (onde V_B é medido) apresentou uma diferença observável. Isso se deve ao fato de existir um outro filamento (o filamento II) no espaço de 2 cm. Ele contribui para aumentar a diferença de potencial medida em V_B .

É possível, inclusive, diferenciar o sinal diretamente pelo valor como mostra o resultado do experimento. Quanto mais distante o filamento sensitiva estiver do filamento de excitação, maior será o valor de diferença de potencial

medido. Assim, um quarto filamento produziria uma série de dados V_C de valor maior aos demais e assim por diante. Com isso é possível cobrir uma superfície maior, ou mesmo toda a superfície, adicionando novos filamentos paralelos.

4.7 - Experimento VII – Construção, Operação e Medidas de Permeabilidade na Unidade RTM

Durante a preparação da unidade, as operações de montagem e desmontagem do molde consumiram um tempo significativo do experimento devido à dificuldade em se posicionar as camadas de fibra de vidro e os filamentos de cobre corretamente.

O experimento foi conduzido sem vazamentos. Os dados do avanço da frente de escoamento do sistema de câmeras e do sensor elétrico linear encontram-se nas Tabelas 15 e 16 respectivamente.

Tabela 15: Resultados do sistema de câmeras

Tempo relativo	R1 (direção do eixo horizontal, em cm)	R2 (direção do eixo vertical, em cm)
0	0	0
5	2,2	1,9
10	3,1	2,8
15	5	3,9
20	7,5	6
25	8,6	6,8
30	9	7,6
35	10	8,7
40	10	10

Utilizando a correlação matemática obtida no experimento II (Equação 12) foi possível obter a posição da frente de escoamento RV1 (Equação 17).

$$x = RV1 = \frac{0,0532 - \left[2,830 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot (-0,0048) \left(1,001 - \frac{V - Vf}{Vi - Vf} \right) \right]^{1/2}}{-0,0096} \quad (17)$$

Tabela 16: Resultados da Resposta do Sensor Elétrico Linear

Tempo (s)	V1 (volt)	RV1 (cm)
0	9,01	0,43
5	8,99	0,86
9	8,96	1,67
15	8,92	2,74
20	8,88	3,85
23	8,84	4,94
25	8,80	6,03
28	8,74	7,67
30	8,73	7,98
32	8,68	9,36
35	8,66	9,85

Os dados da câmera foram confrontados com os do sensor elétrico linear na Figura 49.

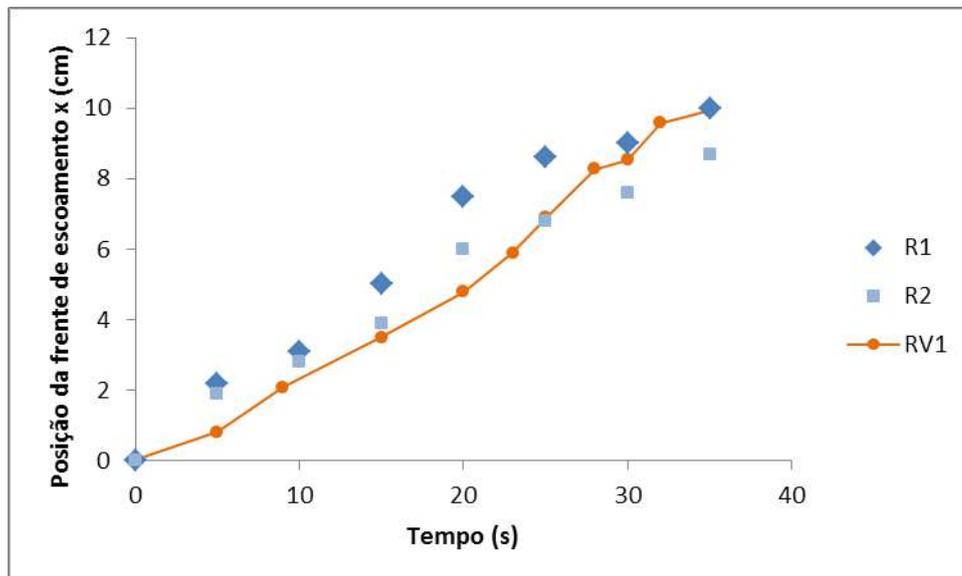


Figura 49: Resultados do experimento V3. Comparação entre os resultados da câmera (em azul) e do sensor elétrico linear (em laranja).

A partir da Figura 47, percebe-se que a partir de 15 segundos a separação entre a série de dados R1 e R2 fica mais evidente indicando a formação de uma elipse. Isso pôde ser confirmado pela imagem da câmera nesse tempo (Figura 50).

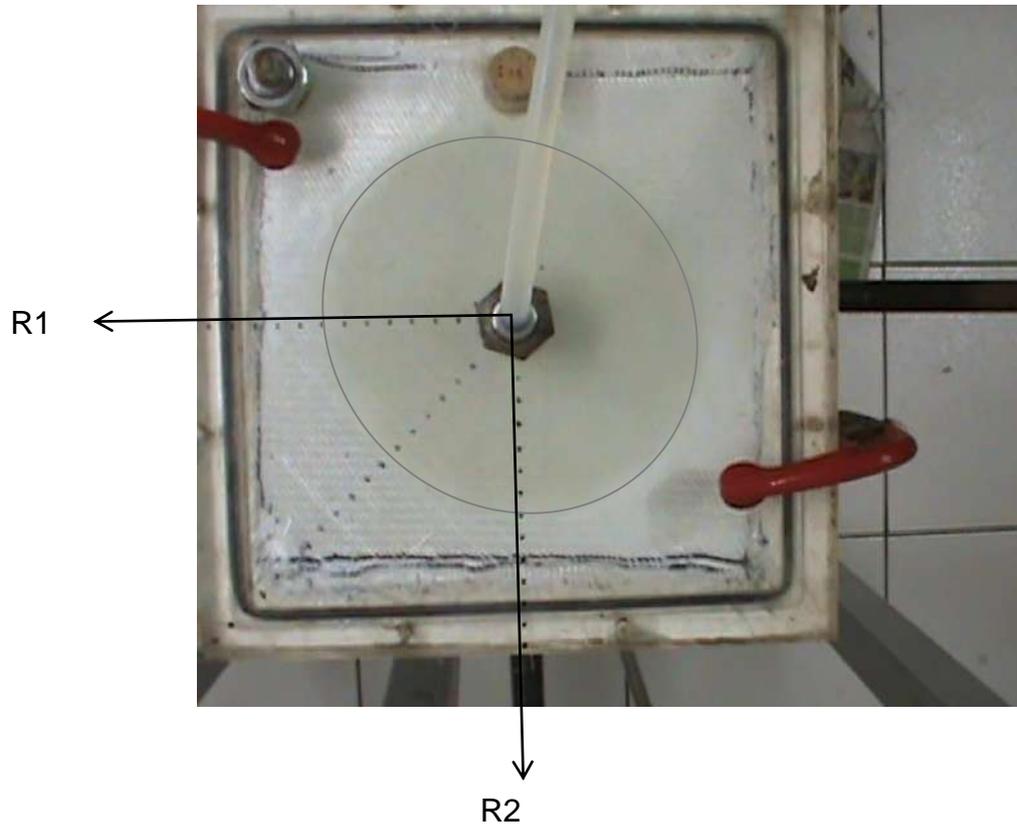


Figura 50: Frente de escoamento observada no experimento VIII

Para o cálculo da permeabilidade é necessário calcular a variação do parâmetro F_a (definido na Equação 4) com o tempo. De acordo com Chang e Hwang, a tendência deve ser linear (Figura 51).

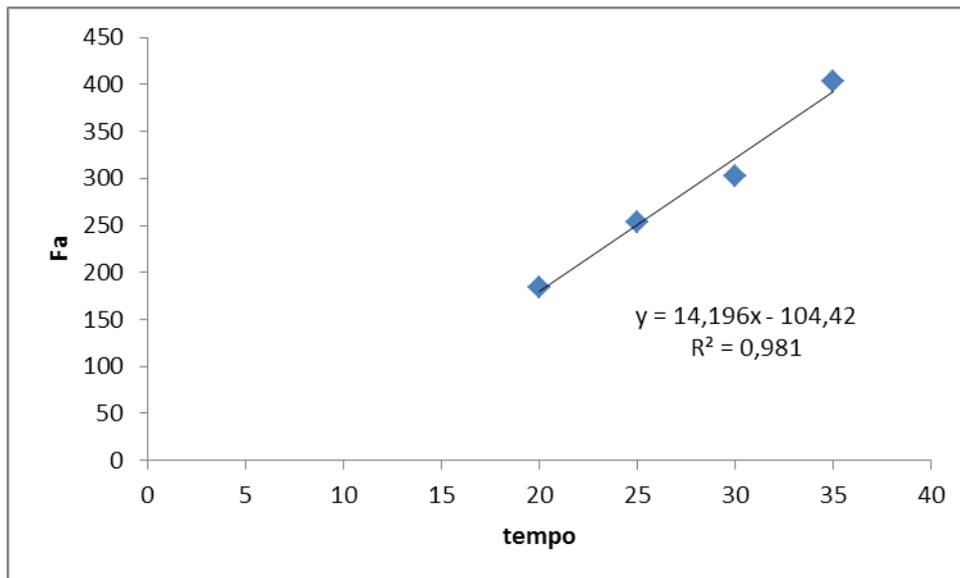


Figura 51: Fa versus tempo.

Com o valor da inclinação o valor da permeabilidade nas direções R1 e R2 foram calculados. Um gráfico de convergência de K1 e K2 no tempo do experimento (Figura 52 e Tabela 17) foi calculado a partir das equações 7, 9 e 10.

Tabela 17: Permeabilidade durante o Experimento

Tempo (s)	K1 (m ²)	K2 (m ²)
5	5,05E-06	3,77E-06
10	4,83E-06	3,94E-06
15	5,59E-06	3,4E-06
20	5,45E-06	3,49E-06
25	5,52E-06	3,45E-06
30	5,16E-06	3,68E-06
35	5,01E-06	3,79E-06

A partir da Figura 52, percebe-se uma estabilização da frente de escoamento a partir de 20 segundos. A variação inicial se deve à influência do sistema de injeção de fluido de teste no molde. Com isso, apenas os pontos

após esse tempo são utilizados para calcular a inclinação da curva do parâmetro F_a com o tempo.

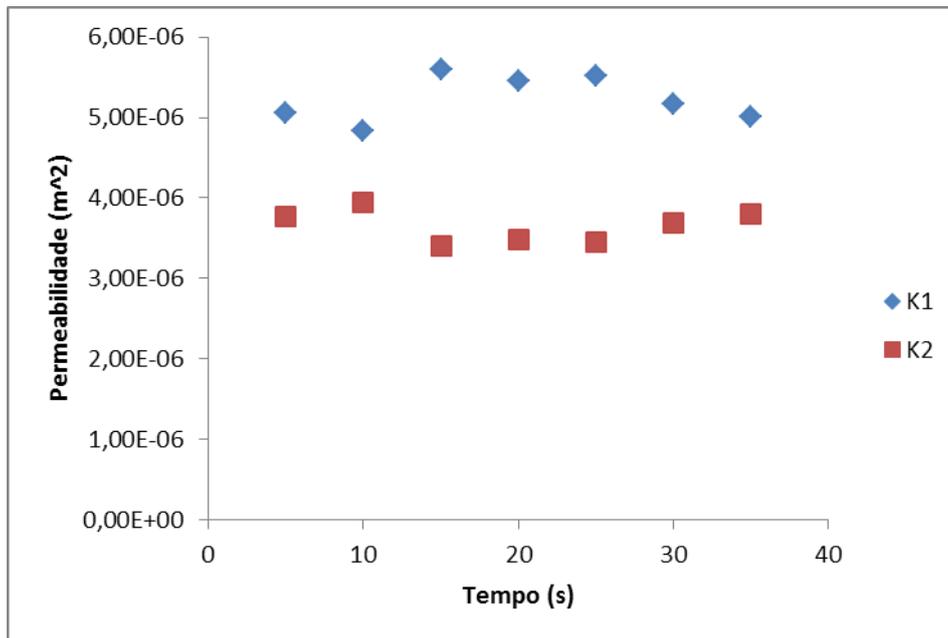


Figura 52: Variação da permeabilidade nas direções 1 e 2 com o tempo.

Os valores $R1/R2$ e $R2/R1$ também foram calculados por meio da obtenção dos coeficientes angulares. Com eles, os valores de permeabilidade da peça puderam ser calculados.

O tempo de *race-tracking* foi obtido a partir do tempo em que o fluido de teste chegou na tampa inferior do molde de acrílico e foi de 57 segundos. A pressão de vácuo medida pelo manômetro variou de 1,051 bar no início do experimento para 1,216 bar em $t=5$ segundos, e permaneceu constante nesse valor durante todo o experimento.

Os principais resultados são resumidos na Tabela 18.

Tabela 18: Resultados dos Cálculos para Permeabilidade e Race-tracking

Coeficiente α	14,196	Tempo R1 (s)	35
k (m ²)	4,361E-06	Tempo R2 (s)	43
Permeabilidade (Câmera)		Inclinação R1/R2	1,948
K1 (m²)	2,239E-06	Inclinação R2/R1	0,831
K2 (m²)	5,248E-06	Tempo de <i>race-tracking</i> (s)	57
Permeabilidade (Sensor)			
KV1 (m²)	2,156E-06		

Pelos resultados da Tabela 18, a permeabilidade calculada usando a resposta do sensor elétrico linear foi 6,12% menos que a calculada pelo método de detecção da frente de escoamento por imagens. Por possuir diferença pequena se pode concluir que o sensor desenvolvido nos experimentos I, II e III pode ser usado como um método alternativo ao método de captura de imagens.

O tempo de *race-tracking* igual a 57 segundos confirma que o fluido de teste escoou preferencialmente nas bordas do molde e que a preforma foi preenchida das bordas para o centro no interior, como mostrou o sistema de captura de imagens.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões

5.1 – Conclusões

Após obtenção e análise dos resultados chegaram-se as seguintes conclusões:

- Os experimentos I e II mostram que uma relação estatisticamente válida entre a diferença de potencial, medida entre os filamentos do sensor, e a posição da frente de escoamento pode ser obtida e que ela pode ser usada para monitorar o preenchimento do molde.
- O experimento III mostrou que é possível desenvolver novos arranjos dos filamentos sem que a posição relativa entre os filamento necessite ser precisa. Isso inclusive ajuda a reduzir o tempo utilizado na fase de preparo do molde e do sistema de instrumentação. Entretanto, novos experimentos devem ser executados para confirmação dessa conclusão.
- Pelos resultados obtidos nos experimentos IV e V, foi observada uma forte influência da temperatura nas leituras do sensor indicando uma potencialidade para o monitoramento de mudanças de temperatura. Isso permite uma melhor caracterização do ponto a partir do qual a peça pode ser desmoldada levando à redução do tempo de fabricação da peça e, dessa forma, aumentando a produtividade da unidade.

- Os dados obtidos no experimento VI acenam para o desenvolvimento de arranjos mais complexos, utilizando 3 ou mais filamentos simultaneamente. Eles mostram que é possível distinguir sinais para cada um dos filamentos sensitivos desde que o conjunto esteja calibrado adequadamente.
- No experimento VII, foi construída com sucesso a unidade de processamento de placas compósitas por RTM. Um sistema de câmeras pôde ser montado para monitorar a fase de preenchimento do molde por um fluido de teste e validar os dados do sensor desenvolvido. Os resultados mostram uma boa correlação entre os métodos de monitoramento da frente de escoamento pelas imagens da câmera e pela resposta do sensor. A permeabilidade medida foi $2,239E-06 \text{ m}^2$, utilizando o sistema de imagens e $2,156E-06 \text{ m}^2$ na mesma direção utilizando o sensor desenvolvido. Esses resultados possuem mesma ordem de grandeza e possuem um desvio pequeno de, aproximadamente, 6,12%.

5.2 – Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos resultados desse trabalho são sugeridos os seguintes itens:

- Estudo de validação do sensor para a medição de temperatura aprofundando o conhecimento sobre o sensor e ampliando suas aplicações;

- Aplicação de um sistema de aquisição de dados automatizados como forma de obter leituras simultâneas com arranjos de filamentos mais complexos;
- Realização de um estudo na unidade RTM com tecidos nas mais variadas arquiteturas e comparar os resultados de permeabilidade.

Referências Bibliográficas

Bickerton, S. **Modeling and evaluation of the filling stage of injection/compression moulding.** Manufacturing Processes for Advanced Composites, p. 303-356, 2003.

Devillard, M.; Hsiao, Kuang-Ting; Advani, S. G. **Flow sensing and control strategies to address race-tracking disturbances in resin transfer molding — part II: automation and validation.**

K. L. Adams, W. B. Russel e L. Rebenfeld, **Radial Penetration of a Viscous Liquid Into a Planar Anisotropic Porous Medium,** Int. J. Multiphase Flow, v 14, no 2, p. 203-215, 1988.

Barooah, P.; Berker, B.; Sun J. Q. **Lineal Sensors for Liquid Injection Molding of Advanced Composite Materials.** Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Delaware, Newark. Fevereiro 2003.

Gabriel 2. Rowe, Jun H. Yi, Kevin G. Chiu, Jason Tan, Alexander V. Mamishev, Bob Minaie. **Fill-Front and Cure Progress Monitoring for VARTM With Auto-Calibrating Dielectric Sensors**, SAMPE 2005, Long Beach, Califórnia, 2005. Disponível em: <<http://www.ee.washington.edu/research/seal/publications.html>> Acesso em Novembro 2012.

Jeffrey M. Lawrence, John Barr, Rajat Karmakar, Suresh G. Advan2. **Characterization of preform permeability in the presence of race tracking**. Composites: Part A, v 35, p. 1393–1405, 2004.

Luthy, T.; Ermanni, P. **Linear direct current sensing system for flow monitoring in Liquid Composite Moulding**. Composites: Part A, v 33, p. 385-397, 2002.

J.R. Weitzenböck, R.A. Sheno, P.A. Wilson. **Radial flow permeability measurement. Part A: Theory**. Composites: Part A, v 30, p. 781–796, 1999.

J.R. Weitzenböck, R.A. Sheno, P.A. Wilson. **Radial flow permeability measurement. Part B: Application**. Composites: Part A, v 30, p. 797–813, 1999.

E. Heardman, C. Lekakou, M.G. Bader. **Flow monitoring and permeability measurement under constant and transient flow conditions**. Composites Science and Technology, v 64, p. 1239–1249, 2004.

Callister *et al*, **Materials Science and Engineering**, pág 667, 2007.

Amorim Júnior, W. F. **Processamento de placa espessa de compósito através de Moldagem por Transferência de Resina**. Tese de doutorado apresentada a COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

A. Endruweit, P. McGregor, A.C. Long, M.S. Johnson. **Influence of the fabric architecture on the variations in experimentally determined in-plane permeability values**. Composites Science and Technology, v 66, p. 1778–1792, 2006.

Beckwith S.W., Hyland C.R., **Resin Transfer Moulding: A Decade of Technology Advances**, SAMPE Journal, v 34(6), November/December 1998, p. 7-19.

F.C. Campbell, **Manufacturing Processes for Advanced Composites**, Editora Elsevier, p. 303-356, 2004.

Mantel, S.C., Cohen, D., **Filament Winding, Processing of Composites**, Hanser, 2000.

Taylor, A., **RTM Material Developments for Improved Processability and Performance**, SAMPE Journal, no 36, v. 4, p. 17-24, Julho-Agosto 2000.

Seeman Composites Inc., <http://www.seemanncomposites.com>, (acesso em Setembro 2013).

Rigas E.I., Mulkern T.J., Walsh S.M., Nguyen S.E, **Effects of Processing Conditions on Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding Process (VARTM)**, Army Research Laboratory, Report ARL-TR-2480, Maio 2001.

Karal M., **AST Composite Wing Program - Executive Summary**, NASA/CR-20001-210650, Março 2001.

Gebart B.R., Strombeck L.A., **Principles of Liquid Moulding, Processing of Composites**, Hanser, p. 359-386, 2000.

Ulmer R., Bickerton S., Fernyhough A., **The effect of yarn length and diameter on permeability and compaction response of flax fibre mats**, Composites: Part A, v. 42, p. 723–732, 2011.

Lee D. H., Lee W. I., Kang M. K., **Analysis and minimization of void formation during resin transfer molding process**, Composites Science and Technology, v. 66, p. 3281–3289, 2006.

Talvensaari H., Ladstatter E., Billinger W., **Permeability of stitched preform packages**, Composite Structures, v. 71, p. 371–377, 2005.

Ding L., Shih C., Liang Z., Zhang C., Wang B., **In situ measurement and monitoring of whole-field permeability profile of fiber preform for liquid composite molding processes**, Composites: Part A, v. 34, p.779–789, 2003.

Bickerton S., Sozer E.M., Simacek P., Advani S.G., **Fabric structure and mold curvature effects on preform permeability and mold filling in the RTM process. Part II. Predictions and comparisons with experiments**, Composites: Part A, v. 3, p. 439–458, 2000.

Apêndices

Apêndice A1 – Tabela de resultados do experimento IV

Tabela referente à primeira execução do experimento IV

T (°C)	V(volts)	T (°C)	V(volts)	T (°C)	V(volts)
18	7,56	43	7,24	68	6,84
19	7,54	44	7,23	69	6,83
20	7,54	45	7,21	70	6,81
21	7,54	46	7,19	71	6,79
22	7,55	47	7,17	72	6,77
23	7,56	48	7,15	73	6,76
24	7,54	49	7,14	74	6,74
25	7,55	50	7,12	75	6,73
26	7,52	51	7,1	76	6,72
27	7,51	52	7,08	77	6,71
28	7,49	53	7,07	78	6,7
29	7,47	54	7,05	79	6,69
30	7,46	55	7,04	80	6,68
31	7,44	56	7,03		
32	7,43	57	7,02		
33	7,41	58	6,98		
34	7,4	59	6,97		
35	7,38	60	6,96		
36	7,36	61	6,94		
37	7,35	62	6,95		
38	7,32	63	6,91		
39	7,31	64	6,89		
40	7,29	65	6,88		
41	7,27	66	6,86		
42	7,26	67	6,85		

Tabela referente à segunda execução do experimento IV

T (°C)	V(volts)	T (°C)	V(volts)	T (°C)	V(volts)
29	8,93	54	8,71	79	8,66
30	8,92	55	8,7	80	8,65
31	8,91	56	8,69		
32	8,9	57	8,7		
33	8,89	58	8,71		
34	8,85	59	8,73		
35	8,87	60	8,75		
36	8,85	61	8,74		
37	8,84	62	8,74		
38	8,85	63	8,73		
39	8,83	64	8,72		
40	8,84	65	8,72		
41	8,82	66	8,73		
42	8,82	67	8,72		
43	8,81	68	8,71		
44	8,8	69	8,7		
45	8,79	70	8,69		
46	8,78	71	8,69		
47	8,79	72	8,68		
48	8,77	73	8,67		
49	8,76	74	8,65		
50	8,76	75	8,66		
51	8,75	76	8,67		
52	8,74	77	8,67		
53	8,72	78	8,67		

Apêndice A2 – Tabela de resultados do experimento V

Tabela referente à primeira execução do experimento V

T (°C)	V(volts)	T (°C)	V(volts)
70	8,62	46	8,71
69	8,63	45	8,74
68	8,64	44	8,76
67	8,66	43	8,75
66	8,67	42	8,83
65	8,68	41	8,82
64	8,69	40	8,85
63	8,7	39	8,87
62	8,72	38	8,88
61	8,71	37	8,88
60	8,72	36	8,89
59	8,7	35	8,9
58	8,71	34	8,9
57	8,75	33	8,93
56	8,78	32	8,94
55	8,68	31	8,95
54	8,66	30	8,98
53	8,68	29	8,93
52	8,66		
51	8,64		
50	8,82		
49	8,83		
48	8,71		
47	8,73		

Tabela referente à segunda execução do experimento V

T (°C)	V(volts)	T (°C)	V(volts)
85	8,62	60	8,76
84	8,63	59	8,77
83	8,63	58	8,8
82	8,62	57	8,78
81	8,63	56	8,8
80	8,63	55	8,79
79	8,63	54	8,78
78	8,64	53	8,76
77	8,66	52	8,78
76	8,68	51	8,78
75	8,7	50	8,79
74	8,71	49	8,81
73	8,71	48	8,83
72	8,72	47	8,81
71	8,7	46	8,84
70	8,7	45	8,83
69	8,72	43	8,88
68	8,73	42	8,89
67	8,74	41	8,9
66	8,73	40	8,87
65	8,75	39	8,89
64	8,75	38	8,9
63	8,74	36	8,88
62	8,75	35	8,9
61	8,75		

Apêndice A3 – Tabela de resultados do experimento VII

Tabela referente ao gráfico Fa versus tempo

Tempo (s)	Fa
5	7,68
10	20,83
15	64,19
20	183,32
25	253,94
30	303,06
35	403,53