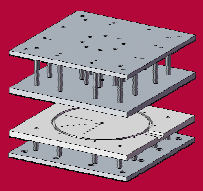


Monitorização do fluxo no processo de moldação por transferência de resina (RTM)

José Carlos Machado Cerqueira

Relatório de Projecto

Orientador INEGI: *Doutor Nuno André Curado Mateus Correia*
Orientador FEUP: *Professor António Paulo Monteiro Batista*

Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP

inegi motor de inovação

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

OPÇÃO DE PRODUÇÃO, DESENVOLVIMENTO E ENGENHARIA AUTOMÓVEL

2007/2008

Dedico este trabalho aos meus pais, irmã e a todos aqueles que o tornaram possível.

Resumo

A permeabilidade é uma propriedade dos reforços que desempenha um papel importante nos processos de moldação por injecção de resina (LCM). Este trabalho pretende estudar a possibilidade do uso de termopares como sensores para detecção da frente de fluxo em moldes metálicos e posterior cálculo da permeabilidade. Pretende-se assim conceber um método para medição de permeabilidades relativamente económico uma vez que os termopares são sensores de baixo custo.

No INEGI tem vindo a ser desenvolvido um projecto que apresenta como principal objectivo o controlo da frente de fluxo, de sistemas de resinas carregadas com nanofluidos, por aplicação de campos magnéticos adequados. Com o método proposto neste trabalho poderíamos, de uma forma relativamente simples, efectuar a monitorização da frente de fluxo de diferentes sistemas de resinas em processos LCM e cálculo de permeabilidades de reforços.

Para o sucesso do uso de termopares é necessário que a resina e o meio molde que suporta os termopares estejam a diferentes temperaturas A monitorização da frente de fluxo foi conseguida numa configuração onde se mantiveram os meios moldes a diferentes temperaturas e injectando a resina à temperatura ambiente. A transferência de energia interna, por condução, do meio molde superior para a resina, tornou possível a detecção da resina "quente" pelos termopares colocados no meio molde inferior, este a temperatura ligeiramente inferior à do meio molde superior.

A realização deste estudo demonstrou que é possível a detecção da frente de fluxo em moldes metálicos recorrendo a termopares, contudo induz-se no cálculo da permeabilidade um erro devido às diferentes temperaturas dos meios moldes. A viscosidade da resina varia com a temperatura, pelo que haverá diferentes valores de viscosidade junto aos meios moldes superior e inferior. Este erro pode ser evitado se for usado, em substituição da resina, um óleo que tenha uma dependência mínima da viscosidade com a temperatura.

Monitoring the flow in the Resin Transfer Molding (RTM) process

Abstract

Permeability is a property of reinforcements which plays an important role in Liquid Composite Molding (LCM). This study seeks to investigate the possibility of the use of thermocouples as sensors to detect the front flow in metal moulds for calculation of permeability. The aim is to devise a relatively economic method for permeability measurement since thermocouples are low-cost sensors.

At INEGI there is a project running on the control of the front flow of resin systems loaded with nanofluids, with the application of appropriate magnetic fields. The method proposed in this paper could, in a relatively simple way, aid the monitoring of the front flow systems, of different resins in LCM processes and measure reinforcements permeability.

For the success of the use of thermocouples it is necessary that the resin and lower half mould that supports the thermocouples, are at different temperatures. Monitoring of the front flow was achieved in a set-up where the half moulds were maintained at different temperatures and the resin was injected at room temperature. The transfer of internal energy, by conduction, from the upper plate to the resin, made possible the detection of "hot" resin by thermocouples placed on the lower mould, which temperature is slightly lower.

The completion of this study showed that it is possible to detect the front flow in metal moulds using thermocouples although this procedure leads to an error in permeability calculation due to the different temperatures of the half moulds. The resin viscosity varies with temperature, so different viscosities will be found near the upper and lower moulds. This error can be avoided if the resin is replaced by oil having a minimal dependence of viscosity with temperature.

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador no INEGI, o Doutor Nuno André Curado Mateus Correia, não só pelo facto de estar sempre disponível para ajudar a solucionar eventuais problemas, mas também pela possibilidade que me foi dada para participar noutras actividades da Instituição e ao Professor António Paulo Monteiro Batista que se mostrou sempre disponível ao longo do decorrer deste Projecto.

Quero também agradecer ao Eng.º Alcides Sá pela colaboração aquando do projecto do molde, ao Fábio Neto pela ajuda na realização de ensaios e à Carolina Vasconcelos pelas dicas fornecidas para a elaboração deste documento.

Agradeço de uma forma geral a todos os membros da Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas do INEGI, que se mostraram sempre prontos a ajudar.

Índice de Conteúdos

Introdução 1

Apresentação da Instituição 2

1 – Materiais compósitos 3

1.1 - Principais técnicas de processamento dos materiais compósitos 5

2 – Estado da arte 7

2.1 – Caracterização da permeabilidade 8

2.2 – Técnicas para a medição da permeabilidade 9

2.3 – Tipos de sensores usados para monitorizar a frente de fluxo 12

2.4 – Possíveis dificuldades na medição de permeabilidade 15

2.5 – Diferentes escalas dentro do processamento de compósitos 16

2.6 – Modelos analíticos e ferramentas de simulação 17

2.7 - Variações de permeabilidade e tipo de distribuição 18

2.8– Cálculo da permeabilidade recorrendo a termopares 19

3 – Trabalho experimental 22

3.1 - Moldação por transferência de Resina (RTM) 22

3.2 - Projecto do molde 24

3.3 – Colocação dos termopares no molde 25

3.4 - Set-up do sistema de medição e procedimento experimental 28

3.5 - Viscosidade da resina 30

4 – Resultados 32

4.1 - Configuração 1 32

4.2 - Configuração 2 33

4.3 - Configuração 3 34

4.4 – Calculo da permeabilidade para a configuração 3 35

5- Conclusão 40

6 – Referências Bibliográficas 41

7 - Anexos 43

7.1 – Anexo A: Fotografias dos sistemas de medição 43

7.2 – Anexo B: Propriedades da resina utilizada 44

7.3 – Anexo C: Propriedades da manta utilizada 47

7.4 – Anexo D: Exemplo de dados adquiridos 51

Introdução

A monitorização da frente de fluxo nos processos de moldação por injecção de resina (LCM), e posterior cálculo da permeabilidade dos reforços, é uma questão que há muitos anos preocupa os investigadores.

Os métodos existentes para detecção da frente de fluxo usam, na generalidade, sensores que são dispendiosos, disturbam a frente de fluxo e alguns inclusive ficam integrados na peça causando defeitos estruturais. O que se propõem com este estudo é o uso de termopares como sensores em moldes metálicos, uma vez que estes são robustos, de baixo custo, não influenciam significativamente a frente de fluxo e consequentemente os valores de permeabilidade.

O cálculo da permeabilidade é importante na medida em que permitirá comparar diferentes sistemas de resinas, entre elas, resinas carregadas com nanofluidos A aplicação deste tipo de resinas no processo LCM tem como principal objectivo verificar a possibilidade de controlar a fase de enchimento, o que permitiria: diminuir o número de alimentadores das peças e aumentar a velocidade de enchimento, isto com recurso a campos magnéticos adequados.

A utilização simultânea de moldes metálicos com termopares como sensores para detecção da frente de fluxo não é uma abordagem nova, outros autores [1] já o tentaram sem sucesso evidente. Este trabalho limita-se à detecção da frente de fluxo e posterior cálculo da permeabilidade, ou seja, não entra em conta de uma forma rigorosa com diversos parâmetros que influenciam a permeabilidade.

Apresentação da Instituição

"O INEGI é uma Instituição de interface entre a Universidade e a Indústria vocacionada para a realização de actividade de Inovação e Transferência de Tecnologia orientada para o tecido industrial. Nasceu em 1986 no seio do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)."

A Instituição INEGI subdivide-se em várias Unidades, sendo que uma delas é a Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas (UMEC), que é composta de investigadores de diferentes áreas da Engenharia. As competências desta unidade vão para além do processamento de materiais compósitos, uma vez que dispões de vários laboratórios, tais como o Laboratório de Fumo e Fogo, Laboratório de Ensaios Mecânicos, Laboratório de Polímeros que permitem o teste de materiais produzidos ou simplesmente matérias-primas.

A área de aplicação dos materiais compósitos está neste momento em grande expansão, e como tal, empresas que vêem nestes materiais o seu futuro, necessitam que lhes seja transferido conhecimento. É competência da UMEC toda essa transferência de conhecimento e tecnologia para as empresas, de modo a estas se tornarem competitivas e vigorarem no mercado nacional e internacional.

1 - Materiais compósitos

As vantagens dos materiais compósitos são conhecidas desde a antiguidade, e o seu estudo tem aplicações em vários domínios da ciência e engenharia. A construção civil (madeira e cimento), a biomecânica (osso), engenharia espacial e equipamentos desportivos são exemplos de áreas em que os materiais compósitos têm dado um grande contributo. A palavra compósito (do latim compositu, composto) significa de uma forma geral, misturado, heterogéneo; artificial ou a nível técnico, material constituído pela mistura de duas ou mais substancias [2]. No entanto, a definição de material compósito não é definitiva nem consensual. Segundo as recomendações IUPAC [3], um material compósito é um material formado por diversos componentes, exibindo múltiplos e diferentes domínios de fase (não gasosos), em que pelo menos um dos domínios de fase é um domínio de fase contínuo. Por domínio de fase entende-se uma região de material com composição química e estado físico uniformes. Um domínio de fase contínuo consiste num domínio de fase único presente numa mistura heterogénea através da qual se pode definir um caminho contínuo que liga todas as fronteiras dos restantes domínios de fase presentes, sem no entanto as atravessar. O domínio de fase contínuo é vulgarmente denominado no contexto dos materiais compósitos por matriz (figura 1).

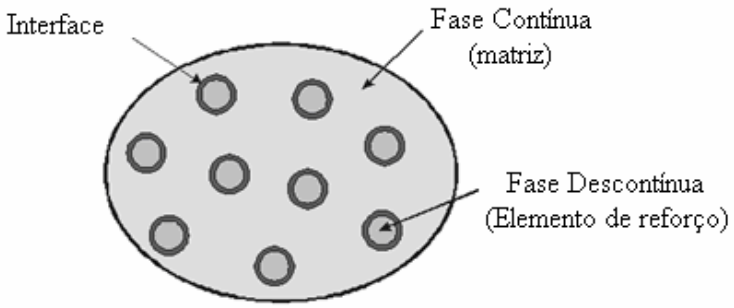


Figura 1 – Fases de um material compósito

Por vezes é considerada uma fase adicional denominada interface entre a fase continua e as fases descontínuas (figura 1).

O objectivo em construir um material compósito é obter um material cujas propriedades sejam diferentes das propriedades dos seus constituintes, seja por motivos

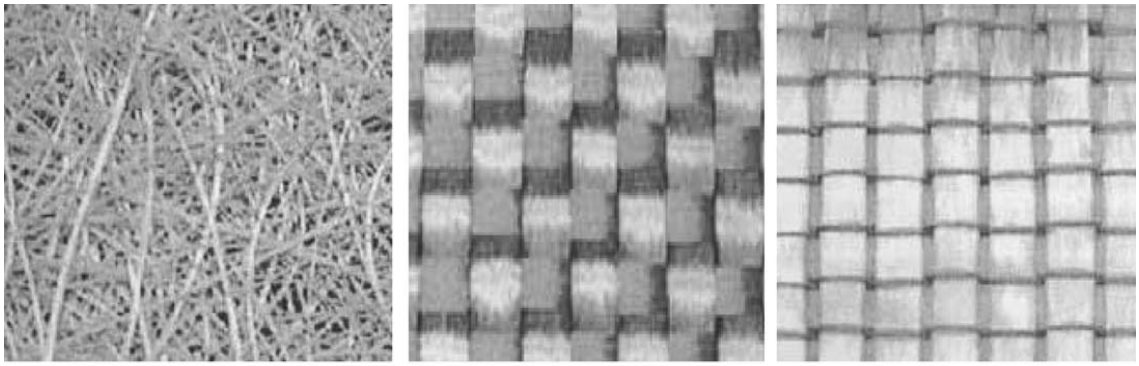
mecânicos, económicos, ou mesmo estéticos. De um ponto de vista estrutural, pretende-se um material cujas propriedades mecânicas sejam superiores às propriedades de cada um dos constituintes. De seguida apresenta-se uma possível classificação dos compósitos de duas fases na área da mecânica, classificação quanto ao tipo de matriz e de fibra.

• Classificação quanto ao tipo de fibra:

– compósito particulado: partículas de vários tamanhos e formas que se encontram dispersas pela matriz. Devido ao carácter aleatório da dispersão, estes compósitos podem ser considerados quase-isotropicos.

– compósito de fibras descontinuas (ou fibras curtas): contêm fibras curtas como fase de reforço. Podem estar orientadas numa mesma direcção ou orientadas aleatoriamente. No primeiro caso, o compósito pode ser considerado ortotrópico e no segundo, quase-isotrópico (figura 2a).

– compósito de fibras contínuas: as fibras podem ser todas paralelas (fibras unidireccionais) ou formarem ângulos rectos entre si (fibras cruzadas (figura2b), ou orientadas em varias direcções (fibras multi-direccionais).



(a) (b)

Figura 2 – Tipos de reforços

• Classificação quanto ao tipo de matriz

– compósito de matriz polimérica

– compósito de matriz metálica

– compósito de matriz cerâmica

Os compósitos de matriz polimérica são os mais usados e dentro deste tipo, podemos distinguir entre dois tipos de matriz: a termoplástica e a termoendurecível. A matriz termoplástica, que amolece com o aquecimento e endurece com o arrefecimento. Isto permite que o processo de fabrico seja mais fácil de executar, podendo estas ser aquecidas várias vezes. A matriz termoendurecível, que é formada por uma reacção química aquando da adição do endurecedor ou catalisador. Sendo uma reacção irreversível, por ser um processo exotérmico, a temperatura influência o tempo de cura, sendo normalmente realizada em fornos ou estufas de temperatura controlada Alguns termoendurecíveis, tal como as resinas epóxidas, não libertam produtos voláteis e são mais fáceis de produzir, outras, como as resinas fenólicas tem produtos secundários voláteis. As resinas são normalmente de três tipos: poliéster, vinilester e epoxida.

A resina poliéster é a mais usada de todas, é normalmente viscosa, mas a viscosidade pode ser reduzida pela adição de estireno em doses até 50%, o que faz com que a cura, reticulação da transformação líquido/sólido, seja retardada. Estas resinas tem um tempo limitado de armazenamento, uma vez que ao longo do tempo vão-se transformando, acabam por gelificar e deixam de ser úteis. Esta resina tem taxas de polimerização muito baixas pelo que é necessário a adição de catalisadores (não toma parte da reacção, mas sim activa a reacção) e aceleradores para obter o resultado previsto num período aceitável de tempo. É importante o cuidado na adição do catalisador e do acelerador para um bom controlo da reacção e obter as melhores propriedades mecânicas.

A resina de vinilester é semelhante na sua estrutura à poliéster, com uma alteração na sua cadeia que lhe permite uma maior resistência ao choque, rigidez, resiliência e resistência à água.

Finalmente a resina epoxida é a que tem melhor comportamento nas propriedades mecânicas e resistência à degradação ambiental, o que conduz a uma maior utilização em componentes de aviação. Normalmente é bem identificável pela sua cor castanha e tem bom processamento devido à sua baixa viscosidade.

A ausência de grupos de éster permite que este tenha uma excelente resistência à água.

1.1 - Principais técnicas de processamento dos materiais compósitos

O processamento de materiais compósitos, de um modo geral, pode classificar--se em moldação com molde aberto ou fechado. Em moldação com molde aberto o

gecoat e o laminado são expostos ao ar durante o processamento. A base deste processo é a impregnação das fibras com resina e o uso de rolos para consolidar e remover o ar do laminado.

Na moldação com molde fechado, os compósitos são processados no interior de dois meios moldes ou com auxílio de um saco de vácuo. Existe uma variedade de métodos de processamento quer seja com molde aberto ou fechado.

Molde aberto:

- Moldação manual (*Hand Lay-Up*)
- Moldação por projecção com pistola (*Spray-Up*)
- Enrolamento Filamentar (*Filament Winding*)

Molde fechado:

- Moldação com injecção de resina (L C M)
    - Moldação por Transferência de Resina (RTM)
    - Moldação por Transferência de Resina com Vácuo (VARTM)
    - Moldação por Injecção com Reacção (RIM)
    - Moldação por Injecção com Reacção Estrutural (SRIM)
    - Moldação por Injecção com Reacção Reforçada (RRIM)
    - Infusão (SCRIMP)
    - Pultrusão com injecção (*Injection Pultrusion*)
- Pultrusão (*Pultrusion*)
- Moldação em Autoclave (*Autoclave Molding*)
- Moldação por Centrifugação (*Centrifugal Casting*)
- Laminação Continua (*Panel Continuous*)
- Moldação por Termocompressão (*Compression Molding*)

2 - Estado da arte

Aquando da produção industrial de peças, com alguma complexidade, pelo processo RTM, são observados grandes desvios padrão no enchimento. Se ocorrerem bolhas de ar numa área funcional da peça, esta fica inutilizada ou, para a reparar é necessário uma grande quantidade de trabalho.

Uma característica importante do processo de moldação com injecção de resina (LCM), do qual se destacam o RTM e VARTM é a distância que o fluxo tem de percorrer através das fibras de reforço. A resina deverá impregnar a totalidade das cavidade, cheia previamente com fibra seca, antes de iniciar a sua cura. É necessária boa impregnação de modo a obter boas soldaduras interfaciais entre a fibra e a resina, e daí obter peças com boas propriedades mecânicas. Um projecto inadequado de um molde ou, moldação ineficiente, pode resultar em peças com pontos secos, ou seja, zonas onde a resina não impregnou a fibra.

No passado resultados satisfatórios só poderiam ser obtidos pela correcta escolha dos materiais, variáveis do processo e desenho do molde pelo método de tentativa erro. Uma vez que esta abordagem era bastante morosa e que acarretava custos, foram desenvolvidos programas para a simulação do fluxo de resina que se tornaram importantes na fase de projecto.

Estas simulações fornecem-nos uma aproximação do tempo de enchimento do molde, distribuição de pressão e a previsão do caminho percorrido pelo fluxo. Também permitem prever a localização das zonas de entrada de resina e saída de ar de modo a evitar pontos secos. O efeito do material e as variáveis no fluxo podem ser estudados sem recurso a experiências. O rigor da simulação depende da exactidão das propriedades do material que são inseridas, em particular a permeabilidade das fibras. Assim é extremamente importante a aquisição de dados de permeabilidade para as tecnologias LCM de um modo económico, visto serem necessárias muitas experiências e existirem muitos tipos de reforços no mercado.

A permeabilidade é uma propriedade inerente dos materiais porosos que pode ser caracterizada pela sua resistência ao fluxo de fluidos mediante um gradiente de pressão. É uma característica do material que obedece à Lei de Darcy (equação1):

$$\langle \boldsymbol{v} \rangle = -\frac{[K]}{n} \cdot \langle \boldsymbol{\nabla} p \rangle \qquad \text{(Equação 1)}$$

Onde v é a velocidade superficial do fluido, que é dado pelo caudal volúmico a dividir pela secção da porosidade média, K é o tensor da permeabilidade da fibra empilhada, η é a viscosidade do fluido, e ∇p é o gradiente de pressão. Esta relação foi observada pela primeira vez pelo físico Francês Darcy quando estava a medir taxa de fluxo da água através de areia, e desde estão esta Lei, passou a ser utilizada para descrever o fluxo de fluidos através de meios porosos como é o caso da resina através dos reforços .

2.1 - Caracterização da permeabilidade

Antes de descrever os métodos para a caracterização da permeabilidade, devemos distinguir a chamada permeabilidade saturada e insaturada. No caso da permeabilidade saturada, as fibras de reforço são previamente impregnadas com o fluido de teste, um novo fluido é injectado e substitui o presente enquanto percorre o reforço. O segundo tipo de permeabilidade é a insaturada, neste caso o fluido percorre o reforço substituindo o ar existente neste. Todas as medições de permeabilidade são baseadas na Lei de Darcy. Deve notar-se que a lei de Darcy foi observada para o fluxo em equilíbrio num meio poroso saturado. Por esse motivo, existe uma preocupação sobre a validade da lei Darcy em casos de fluxos insaturados. O fluxo de resina durante o processamento de um compósito envolve um meio insaturado seco. Para fluxos insaturados, existe uma fronteira entre o fluxo totalmente saturado e preformas secas, onde este fluxo é conduzido não só pela pressão aplicada externamente, mas também pela capilaridade dentro dos fios, constituídos por várias fibras individuais contínuas (Figura 3). É importante referir que a impregnação do reforço dá-se segundo dois mecanismos distintos, sendo a primeira o *inter-tow* também chamado *macro-tow* e o *intra-tow* também chamado *micro-tow*. Para este segundo mecanismo a força de condução não será apenas a aplicada pelo gradiente de pressão, mas também pela pressão capilar que existe nos canais entre os filamentos dentro de cada fio. Por esta razão poderão ser obtidos diferentes valores de permeabilidade dependendo do método de teste, devido a influências de diversos factores.

Portanto, existe uma diferença entre a permeabilidade saturada e insaturada No caso de pressão injecção baixa, a resina fluirá a velocidade superior dentro fios devido à pressão capilar. Se uma pressão alta é aplicada, o fluxo dentro dos fios será mais lento.

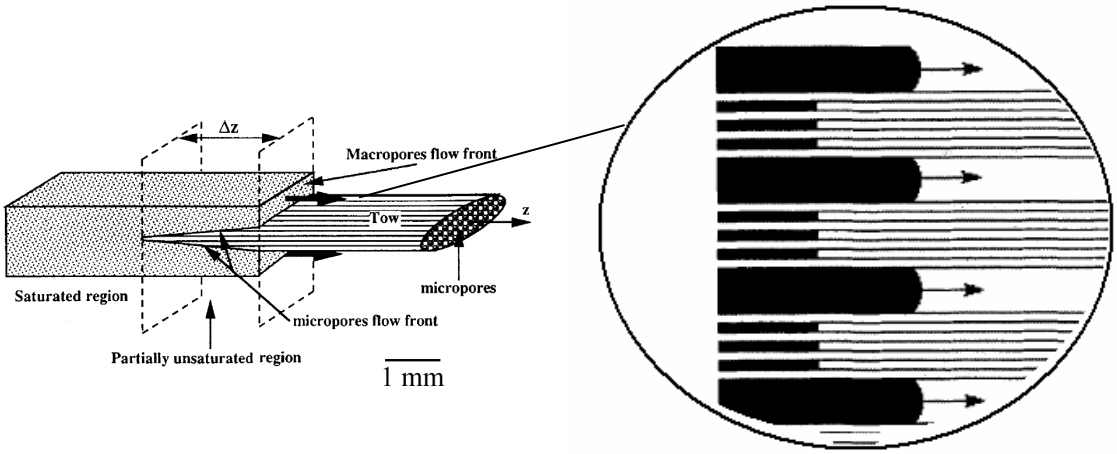


Figura 3 – Diferentes regiões durante a impregnação

2.2 - Técnicas para a medição da permeabilidade

Os dois métodos mais utilizados para medir a permeabilidade no plano são o método do fluxo unidireccional e do fluxo radial. Ambos os métodos podem medir permeabilidades de fluxos insaturados e saturados com fluxo constante ou com pressão de injecção constante (figura 4). No caso de um teste com a configuração unidireccional, o fluido, com uma viscosidade conhecida, é injectado ao longo de uma linha. Através do avanço da frente de fluxo, a permeabilidade ao longo da direcção do fluxo pode ser determinada. Para uma configuração com injecção central, a permeabilidade ao longo das duas direcções principais pode ser obtida com base na posição da frente de fluxo como função. Várias configurações foram construídas dependendo do âmbito da medição. Frequentemente, para fluxos unidireccionais, a posição da frente de fluxo em função de tempo é capturada com uma câmara de filmar, pelo que o lado superior do molde é feito num material transparente. A desvantagem deste método é o possível problema com fuga de resina entre o molde e os tecidos *race tracking*, devido ao desalinhamento do tecido que cria lacunas entre o reforço e parede ou devido à deformação do molde que permite criar um corredor para a resina, ou seja, uma zona onde a resina pode fluir sem grande obstrução. Este problema é discutido em pormenor mais à frente.

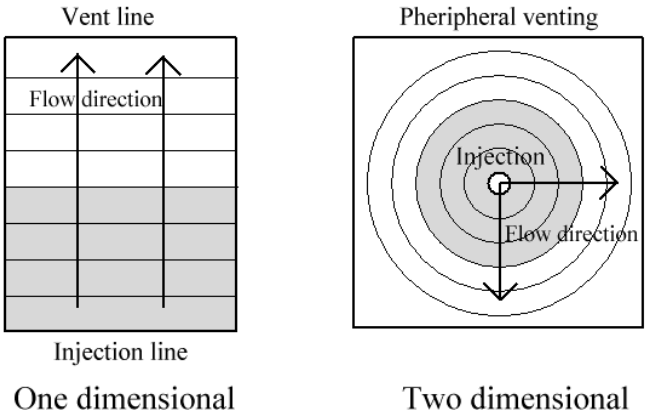


Figura 4: Caracterização da permeabilidade com configuração a uma e duas dimensões

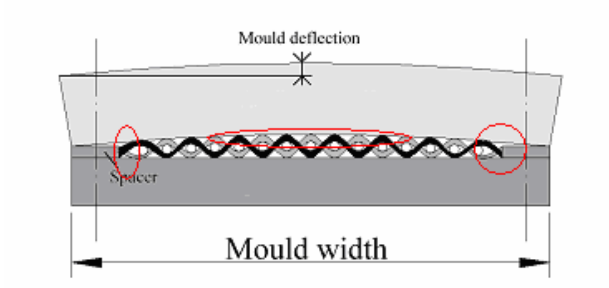


Figura 5: Regiões onde podem ocorrerem corredores de resina

Se for considerada a configuração a uma dimensão [4], o problema com a baixa rigidez dos meios moldes (figura 5) pode ser evitado através da utilização de uma pequena largura. Se for usada uma configuração a duas dimensões, o problema pode surgir com a fuga de resina entre o molde e os tecidos devido à deflexão dos meios moldes que surge especialmente se for usado um meio molde superior ou inferior transparente, tipicamente uma placa de acrílico. Por esse motivo são colocadas geralmente barras de metal como reforço do molde, fazendo com que algumas posições da frente de fluxo não possam ser capturadas pela câmara.

O método de medição considerado mais vantajoso é o radial, que nos fornece rapidamente uma medida da anisotropia e orientações principais de permeabilidade, que não é possível com uma medição unidireccional. Se usarmos o método do fluxo unidireccional, necessitamos de pelo menos três ensaios para obter a mesma informação Em 2000, foi realizado um estudo [5] para comparar diferentes técnicas de medição de

permeabilidade sobre diferentes reforços. Neste estudo verificou-se uma boa repetitibilidade, mas ainda assim uma grande dispersão de valores está presente, causado pelo processo de fabrico dos reforços, manuseamento, preparação das amostras e taxa de compressão aquando do fecho do molde.

Apesar destas investigações, ainda é difícil obter dados correctos para a permeabilidade correspondente a um determinado tecido. Existem técnicas de medição, contudo faltam normas, o que resulta num intervalo de valores de permeabilidade para o mesmo tecido. Em 2002, Hoes et Al. [6] apresentam uma ferramenta (Figura 6), que permite a medição de permeabilidade no plano de todos os tipos de reforços não condutores de uma maneira razoavelmente rápida. Glicose é injectada centralmente utilizando queda de pressão constante. A viscosidade dinâmica tem que ser medida antes de cada ensaio, para evitar erros devido a pequenas alterações de temperatura ou desvios na concentração. Durante a medição, a queda de pressão tem de ser bem controlada. As posições da frente de fluxo em função do tempo são registradas usando sensores em várias localizações.

Os sensores são orientadas em diferentes direcções (0º, 22,5º, 45º, 67,5º, 90º, 180º, 270º) para poder definir as direcções principais dos reforços. Juntamente com as posições dos sensores e do tempo de chegada de resina, é possível extrair as direcções principais e respectivas permeabilidades. Com essa ferramenta, foi encontrada uma larga dispersão de valores permeabilidade.

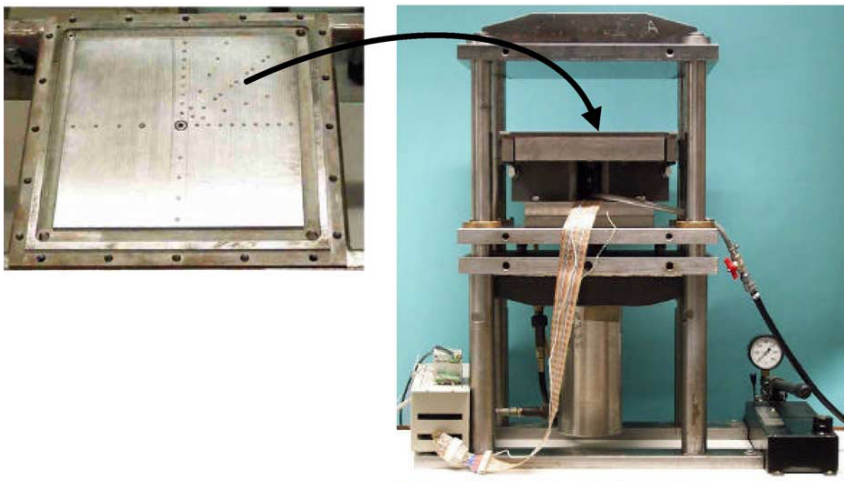


Figura 6: Configuração utilizada por Hoes [6]

Uma das principais razões para esta grande dispersão é o empilhamento das camadas [7]. Parnas [8] construiu um equipamento similar ao de Hoes, mas a nova

versão é também capaz de medir valores de permeabilidade em materiais condutores. Esta configuração também contém mais sensores para poder capturar distúrbios no fluxo e permitir identificar possíveis correlações entre ambas as permeabilidades.

2.3 - Tipos de sensores usados para monitorizar a frente de fluxo [1]

A monitorização da frente de fluxo permite detectar como esta se propaga e verificar se permanecem pontos não impregnados dentro do molde. Os principais tipos de sensores usados para a monitorização da frente de fluxo são:

- *SMART Weave*
- Sensores de pressão
- Termopares
- Dieléctricos
- Ultrasónicos
- Fibras ópticas
- *Point voltage and lineal voltage sensors*
- Câmara de filmar

Os sensores *SMART weave* são constituídos por uma grelha de fios condutores, em que metade estão localizados entre camadas numa determinada direcção e a outra metade entre outras camadas e orientados ortogonalmente. Quando a resina fluí através da grelha de fios os circuitos eléctricos constituídos por estes fios são fechados, a mudança de tensão indica a localização da frente de fluxo. Este tipo de sensores proporciona um acompanhamento contínuo de todo o enchimento. No entanto, os fios permanecem na peça final produzida, o que pode causar um defeito estrutural nesta. Uma outra desvantagem deste tipo de sensor é que a sua presença influência o fluxo da resina.

Os sensores de pressão convertem os valores de pressão em sinais eléctricos. No tipo de sensores que utiliza extensómetros, a pressão é convertida num sinal eléctrico pela deformação física do extensómetro que está ligado ao diafragma do transdutor de pressão. O diafragma deflecte quando é aplicada pressão, e provoca uma mudança na

resistência eléctrica que é proporcional à pressão. No entanto, colocar vários sensores de pressão na parede do molde é uma solução cara.

Os termopares são utilizados para medir a temperatura. A junção de medição ou junção quente é anexada aos meios em que a temperatura será medida, e a junção referência é anexada a um dispositivo de medição. Quando a junção de medida é aquecida, uma pequena diferença de tensão devido à força electromotriz ocorre entre esses dois fios. Se a temperatura de referência, T_{ref} é mantida constante, a tensão V torna-se directamente proporcional à temperatura da junção de medida, T_{med}:

$$V = \alpha(T_{\text{hot}} - T_{\text{ref}}) \qquad \text{(Equação 2)}$$

Onde α é chamado de coeficiente Seebeck. Os termopares são amplamente utilizados para monitorizar a cura de resina. Para prever o grau de cura da resina utilizando termopares, tem de se saber o histórico da resina. A reacção de cura de um sistema resina termoendurecível é exotérmica e, portanto, a temperatura aumenta devido ao calor libertado durante a cura, sendo monitorizada pelos termopares. Também é possível monitorizar a frente de fluxo, se existe uma considerável diferença de temperatura entre a resina e paredes do molde. O uso de termopares aplica-se no âmbito de uma das duas seguintes condições: o polímero é aquecido antes da injecção enquanto as paredes do molde são mantidas a uma temperatura mais baixa, ou a resina a injectar é mantida à temperatura ambiente, enquanto que as paredes do molde são aquecidas [1]. O processo de monitorização com recurso a termopares apenas é conseguido recorrendo a moldes não metálicos.

A análise dieléctrica (DEA) fornece-nos informações que estão fortemente correlacionadas com vários parâmetros, tais como mobilidade molecular, grau de cristalização, viscosidade, temperatura de transição vítrea e o grau de cura. A análise DEA mede características eléctricas do material como a condutância e da capacitância em função do tempo, temperatura e frequência sinal.

Com os sensores ultrasónicos o acompanhamento do fluxo de resina dá-se com a ajuda de um gerador de impulsos, o sistema gera um sinal acústico que é detectado por um detector de ultra-som do lado oposto ao gerador. Estes sinais fornecem informações de dois tipos: velocidade do som e atenuação. A chegada da frente fluxo é detectada por qualquer mudança nestas variáveis.

Os sensores de fibra óptica utilizam, para controlar o fluxo de resina, uma luz infravermelha como fonte. Um sinal infravermelho é transmitido através da fibra óptica, a intensidade do sinal é monitorizado na outra extremidade. A luz é transmitida através da fibra óptica até a resina atingir os sensores, mas logo que a resina atinja a fibra óptica a luz é reflectida, o que torna possível monitorizar a posição da frente de fluxo da resina.

Os sensores de *point voltage* and *lineal voltage* consistem em dois cabos eléctricos paralelos e um circuito eléctrico ligado a eles. Estes fios condutores são colocados a uma distância (na ordem de alguns milímetros) um do outro sobre um filme electricamente isolado, e então ligados à cavidade do molde. O circuito utilizado para este tipo de sensores é composto de dois elementos de resistência: um de elevada resistência utilizado como um divisor de tensão, e a resistência gerada entre os fios. Vários pares de fios podem ser colocados em diferentes localizações do molde para o acompanhamento detalhado da frente de fluxo da resina. Uma tensão específica é fornecida a cada circuito. Enquanto a resina avança na direcção longitudinal vai ocupar o espaço entre os fios, fazendo com que a resistência eléctrica varie. Consequentemente, a leitura da tensão sobre esta mudança de resistência permite estimar a posição da frente de fluxo da resina. A desvantagem deste tipo de sensor é a perturbação da frente de fluxo. Os sensores de *point voltage*, similares ao funcionamento dos sensores de *lineal voltage* de acompanhamento do fluxo, sensores estes baseados em corrente contínua DC. Quando a resina electricamente condutora chega à ponta deste sensor, os dois pólos de um circuito eléctrico são fechados, e a mudança de tensão de saída é lida. As principais vantagens deste sensor de *point voltage* em relação a um *lineal voltage* são o facto de não haver necessidade da difícil calibração; durabilidade e uma simples e rigorosa avaliação dos dados. No entanto, cada sensor *point voltage* monitoriza apenas uma determinada localização discreta na cavidade do molde. Assim, para um acompanhamento detalhado, devem ser utilizados muitos sensores em conjunto.

O progresso do fluido, através do reforço, também pode ser efectuado com recurso a uma câmara. Medindo a orientação e o valor do eixo maior e menor da elipse da frente de fluxo, a orientação e o valor do máximo da permeabilidade dos reforços pode ser calculada.

2.4 - Possíveis dificuldades na medição da permeabilidade

Um dos principais problemas com as configurações a uma dimensão é que, durante um teste pode ocorrer um fluxo entre o reforço e as paredes inferior e superior do molde ou pelas laterais (Figura 7). Este último fluxo é preferencial ao longo das paredes da cavidade. Este fenómeno não é apenas devido ao corte imperfeito do tecido ou o desfiar de fios do tecido nas laterais, que é inevitável quando se corta o material, mesmo quando o tecido é cortado perfeitamente com as dimensões da cavidade, podem ocorrer corredores de resina [9], devido à pressão de injecção do fluido, que faz com que os fios das laterais sem apoio dobrem. Este fluxo pode ser evitado através da aplicação de uma faixa de silicone ao longo das bordas livres da amostra, aplicando cola, ou colando uma fita sobre as bordas do material. Em 2004, Lawrence e Al. [10] propôs uma técnica para evitar os possíveis erros causados pelos corredores de resina. Com base em dados obtidos por uma câmara em função do tempo, é extraída informação de sensores lineares virtuais, perto da região onde ocorrem corredores de resina. Com os dados obtidos, realiza-se uma análise dimensional para descrever o fluxo na presença de corredores de modo a torná-los independentes da geometria e permeabilidade do tecido. Devido aos efeitos do fluxo nas laterais do molde uma configuração bidimensional é a mais adequada para tecidos. A configuração bidimensional normalmente é construída com um meio molde transparente. Este meio molde é feito de um vidro ou acrílico, tipicamente uma placa com espessura entre 2 e 5 centímetros. O topo transparente é frequentemente coberto com uma armação de aço para minimizar o problema de deformação dos moldes [11]. Outra desvantagem da injecção radial é a complexidade na medição de dados, tanto dos valores de permeabilidade no plano como da elipse da frente de fluxo e do ângulo rotação (Figura 8). É importante também referir o problema de executar medições em fluxos saturados, embora já tenham sido propostas algumas configurações que são capazes de determinar a permeabilidade atrás da frente de fluxo no plano [9].

Um problema actual com as duas técnicas de medição é o empilhamento das camadas de reforço. Como Hoes et Al. [7] mostraram, este efeito pode ser utilizado para explicar a grande dispersão para os resultados obtidos com medições de permeabilidade. A primeira conclusão de Mogavero [12], a partir de estudos com compressão, foi que a interferência *nesting* pode causar uma significativa diminuição da espessura por

cruzamento permanentemente quando múltiplas camadas do mesmo material ou múltiplas camadas de diferentes materiais são combinados. No entanto, verificou-se em testes de compressão realizados num vasto leque de camadas empilhadas, que estas se cruzam permanentemente, contudo a interferência devida a este efeito pode ser avaliada e representada. Resultados muito precisos poderiam, então, ser obtidos para o comportamento da compressão em camadas múltiplas. Baseada nesta investigação, a influência na permeabilidade devida à interferência pode ser caracterizada.

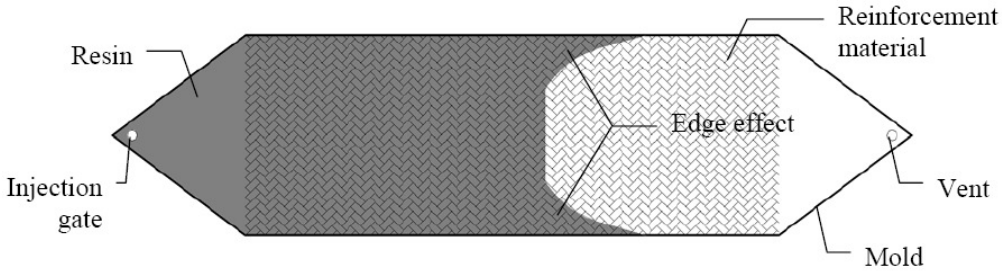


Figura 7: diferentes regiões durante a impregnação

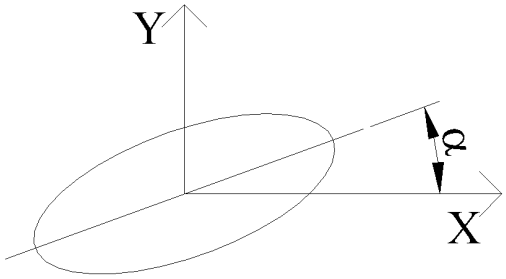


Figura 8: Frente de fluxo elíptica e respectivo ângulo de rotação

2.5 - Diferentes escalas dentro do processamento de materiais compósitos

Dentro do processamento de materiais compósitos, dependendo do âmbito da investigação, as quatro diferentes escalas podem ser consideradas (Figura 9).

- Micro escala: 10 μm. - 500 μm.
- Meso escala ou nível celular: 500 μm. - 20 milímetros
- Macro escala: 5 milímetros - 0,5 metros
- Escala da peça: 0,1 m - 10 metros

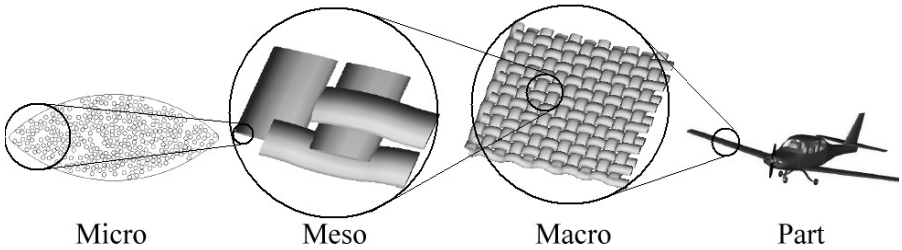


Figura 9 – Diferentes escalas

2.6 – Modelos analíticos e ferramentas de simulação

Em 2000, Yu et Al. [13] construíram um modelo geral de permeabilidade simplificado para diferentes preformas tendo em conta propriedades da micro e meso escala. O resultado desta investigação mostra que a permeabilidade das preformas é essencialmente determinada pelas lacunas ou canais entre os conjuntos de fios para os reforços investigados, e o efeito das micro-estrutura destes para a permeabilidade é negligenciável. Os resultados previstos por este modelo são comparados com essas experiências e um bom acordo é encontrado numa vasta gama de porosidades. Outra possibilidade para medir a permeabilidade em matrizes de conjuntos de fios unidireccionais ou outros reforços está na utilização de ferramentas de simulação.

Modelos analíticos só podem ser construídos por unidades de células regulares de reforços (figura 10). Para cada tipo de unidades de células, outro modelo tem de ser criado com condições fronteira adequadas. No processamento pela técnica RTM, é utilizado um vasto leque de reforços. Por esse motivo, existe a necessidade de ferramentas que permitam prever os valores de permeabilidade para uma arbitrariedade de reforços num curto espaço de tempo. Desde o início dos anos noventa, várias estratégias de simulação foram desenvolvidas.

O objectivo das ferramentas de simulação é o de descrever a geometria (variável) do reforço e resolver equações de Navier-Stokes para determinar o tensor da permeabilidade. Dentro de todas estas simulações, não é assumida a tensão de corte (fluido Newtoniano).

O principal inconveniente dos modelos é a grande quantidade de tempo necessário para construir o modelo. Para cada variação de um parâmetro, tem de se construir um novo modelo.

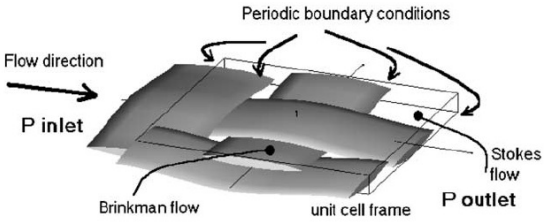


Figura 10 – Unidade de célula de reforço.

2.7 - Variações de permeabilidade e tipo de distribuição

Um problema geral é a elevada dispersão de valores reais de permeabilidade [14, 15, 16]. A permeabilidade está relacionada com a arquitectura do reforço, o tipo de material, fracção volúmica e deformação durante a colocação no molde, especialmente nos moldes que têm cantos e duplas curvaturas. Dispersões de valores de permeabilidade podem ter diferentes fontes. Além disso, a permeabilidade varia devido à incoerência no corte do tecido, empilhamento e colocação no molde. Às vezes isso fará com que corredores de resina, não intencionais, apareçam (regiões livres de fibras através dos quais a resina pode fluir com muita facilidade devido à permeabilidade muito superior). As incertezas da permeabilidade em reforços devido à compactação, deformação e impróprio posicionamento dos reforços dentro de um molde em torno de saliências e cantos, fazem significativa diferença no fluxo durante a impregnação. Na preparação dos reforços devemos manuseá-los cuidadosamente de modo a reduzir o grau de incoerência, no entanto, é quase inevitável ter variações de propriedades do reforço.

Em 2000, Pan e Al. [16] desenvolveram a primeira ferramenta para caracterizar a distribuição do valor da permeabilidade para uma configuração unidireccional. Eles também tentaram identificar os quatro parâmetros que mais influenciam as medições de permeabilidade. Em 2002, Hoes e Al. construíram um equipamento para caracterizar a dispersão para valores de permeabilidade para materiais de reforço não condutores [15] utilizando sensores eléctricos.

Hoes et Al. [10], realizaram uma série de experiências para caracterizar a distribuição de permeabilidade de diferentes tipos de reforços. Para todas as medições, o ensaio foi realizado para determinar o tipo de distribuição, e para todas se concluiu,

com um nível de confiança de 95%, que os dados seguem uma distribuição normal. Também Endruweit et Al. [17] aproxima os dados de permeabilidade gerados com uma função de distribuição normal.

2.8 – Cálculo da permeabilidade recorrendo a termopares [56]

Nesta secção são explicadas as hipóteses subjacentes à abordagem de medição de permeabilidade pelo método de fluxo radial a duas dimensões O fluxo bidimensional em meios porosos é geralmente descrito pela lei de Darcy, como foi atrás referido, aqui em coordenadas polares (equação 3):

$$v = -\frac{K}{\mu}\frac{\partial P}{\partial r}. \qquad \text{(Equação 3)}$$

A velocidade do volume líquido médio v é uma função da permeabilidade K, da viscosidade dinâmica do fluido μ e do gradiente de pressão $\partial P/\partial r$. Para as condições fronteira do setup experimental Weitzenböck et Al resolveram a equação3. A solução é um modelo de permeabilidade que caracteriza a permeabilidade dada a frente de fluxo, o raio do ponto de injecção, o raio da frente de fluxo, o tempo e a pressão de injecção. De seguida apresenta-se uma lista de hipóteses em que se baseia a abordagem utilizada:

- Todas as experiências são consideradas a pressão de injecção constante onde a frente de fluxo é medida durante a experiência. Como consequência da pressão constante, o fluxo é instável assim como o gradiente pressão e a velocidade da frente de fluxo muda com o tempo. A pressão na frente de fluxo é a atmosférica.
- O fluxo microscópico é desprezado. Durante uma experiência o fluxo não ocorre apenas nos poros de um tecido ou manta, mas também num nível microscópico no interior de cada feixe de fibra. No entanto, actualmente não existe qualquer medida técnica, que permita a medição simultânea de fluxo microscópico e macroscópico.
- Os efeitos da força gravítica e tensão superficial são ignorados.
- O material poroso é homogéneo com interligação do espaço poroso. Além disso, é inelástico, o que significa que não se move ou deforma durante a injecção.
- A viscosidade permanece constante durante toda a experiência porque:
    - O fluido utilizado para na experiência é Newtoniano e incompressível.

- A experiência é realizada sob condições isotérmicas.
- Não ocorre cura durante a injecção.

- Na experiência com fluxo radial, a frente de fluxo está a avançar durante toda a duração da experiência. Na primeira fase o tecido seco é molhado pela frente de fluxo que avança e desloca o ar. O domínio molhado pressupõe-se totalmente saturado com o líquido de teste (sem bolhas).
- O tensor da permeabilidade é simétrico e define-se como "uma quantidade com significado físico que satisfaz uma certa lei de transformação". A transformação referida é a transformação por rotação dos eixos. As propriedades importantes dos tensores são diagonalização e invariância. A diagonalização de tensores simétricos significa que existe um conjunto de eixos ortogonais (eixos principais), onde todos os termos não diagonais do tensor são nulos. Portanto, a fim de mostrar que o tensor da permeabilidade para o reforço das fibras no processo RTM é um tensor simétrico de segunda ordem tem de se mostrar que os valores principais de permeabilidade são invariantes. Medições efectuadas em diferentes direcções têm de resultar no mesmo valor para a permeabilidade principal e suas orientações.

Para calcular a permeabilidade num meio isotrópico o gradiente de pressão dentro do molde tem de ser determinado em função da posição da frente de fluxo. Isto é conseguido pela resolução da equação de Laplace em coordenadas polares. Substituindo a nova distribuição pressão na Eq. (3) e integrando usando as condições fronteira $\varepsilon(d_{rf} / d_t) = v$ na frente de fluxo *e* $r_f = r_o$ em $t = 0$, a permeabilidade é obtida, segundo [56] por:

$$K = \left\{ r_f^2 \left[2 \ln\left(r_f / r_o \right) - 1 \right] + r_o^2 \right\} \frac{1}{t} \frac{\mu \varepsilon}{4 \Delta P} \qquad \text{(Equação 4)}$$

Onde ε é a porosidade, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, t é o tempo a partir do início da injecção para quando um ponto especificado da cavidade é atingido e r_f e r_o são os raios da frente de fluxo e raio do ponto de injecção respectivamente. ΔP é a diferença de pressão entre na entrada P_o e a pressão na frente fluxo P_f. A pressão de entrada é normalmente medida como a pressão acima da pressão atmosférica. Daí ΔP é igual à pressão aplicada na entrada P_o. O raio r está relacionado com o sistema de eixos coordenados x, y por $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. A equação (4) é o modelo da permeabilidade em

testes com fluxo radial para materiais isotrópicos e a pressão de injecção constante (a duas dimensões).

O uso de termopares implica como já foi referido uma diferença de temperaturas entre os meios moldes e a resina. Em estudos realizados com moldes metálicos a energia interna da resina, a temperatura superior, é transferida para os meios moldes. O equilíbrio térmico é atingido ao fim de um curto espaço de tempo, para o caso de moldes em materiais com condutividades térmicas elevadas, tal como o alumínio. O equilíbrio uma vez atingido impede a monitorização da frente de fluxo e inviabiliza o uso de termopares como sensores para detecção.

Tuncol et Al. aconselham o uso de termopares para moldes com baixa condutividade térmica, elevado fluxo de resina, grandes diferenças de temperatura entre o molde e a resina e para resinas com elevado calor específico e desaconselham o seu uso para moldes metálicos.

A seguir faz-se uma descrição de todo o procedimento experimental, desde o set-up montado aos ensaios realizados no sentido de encontrar uma configuração que permita o uso de termopares em moldes metálicos.

3 - Trabalho experimental

Uma vez realizada uma abordagem aos tipos de permeabilidade, métodos de a calcular, tipos de sensores usados na detecção da frente de fluxo e modos de injecção de resina, conclui-se que para este estudo a permeabilidade que se pretende calcular é a permeabilidade insaturada, por ser muito próxima do processo real, onde o fluido percorre o reforço substituindo o ar presente. O método aqui utilizado é do fluxo radial, por ser considerado vantajoso, e fornecer rapidamente uma medida da anisotropia e orientações principais da permeabilidade, que não é possível com uma medição unidireccional.

A técnica de processamento utilizada neste estudo é a moldação por transferência de resina (RTM), utilizando uma pressão de injecção constante. De seguida far-se-á uma breve descrição deste processo de modo a melhor entender o set-up que se pretende montar.

3.1 - Moldação por Transferência de Resina (RTM)

O processo de moldação por transferência de resina é um dos processos mais usados e consiste em preencher a cavidade de um molde, rígido e fechado, injectando uma resina por um, ou vários pontos, dependendo do tamanho do componente (figura 11). Os reforços são colocados no interior do molde antes de o fechar. A resina impregna o reforço e inicia o processo de cura, formando a peça em material compósito. Normalmente são usadas resinas de poliésteres, epóxidas e vinilesteres que podem ser preenchidas com cargas de modo a reduzir os custos. Diferentes tipos de moldes podem ser usados dependendo da quantidade de produção esperada. Pode ser aplicado calor ao molde para diminuir o tempo de cura, em tais casos pode ser necessário o uso de moldes em aço. Podem ser usadas resinas de baixa retracção nestes moldes para melhorar o acabamento superficial e tolerâncias mais apertadas. Alternativamente RTM de baixa pressão permite reduzir os custos de equipamentos a serem usados.

Vantagens

- Peças acabadas de ambos os lados
- Necessidade de pouca mão-de-obra em relação à moldação manual
- Possibilidade de fabricar a peça no mesmo sítio onde será instalada

- Maior produtividade relativamente à moldação manual
- Baixo desperdício
- Emissão mínima de vapores de estireno
- Investimento médio em equipamento
- Moldação de formas complicadas

Desvantagens

- Requer-se uma especialização para fabricação de moldes
- Processo que requer mão-de-obra com formação
- Este processo só se justifica para quantidade média-alta de produção
- Alteração da peça/molde só é conveniente depois da amortização do molde

Aplicações

- Pequenas peças para industria automóvel e marítima
- Peças para a construção civil

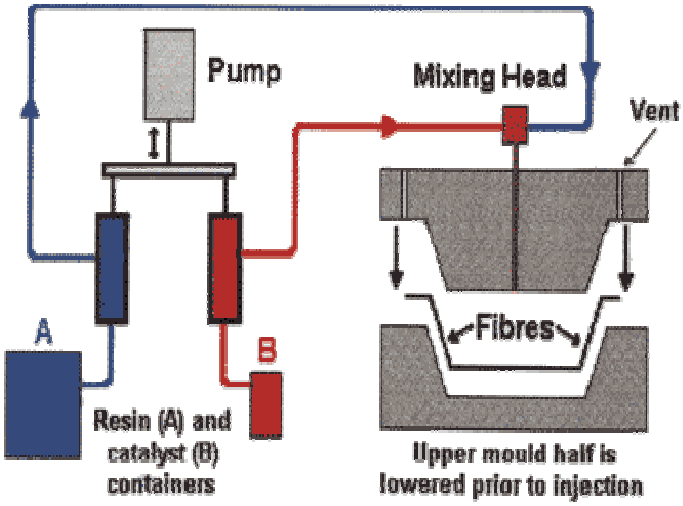


Figura 11 – Moldação por injecção de resina (RTM)

O projecto do molde foi realizado tendo em consideração vários aspectos tais como a deformação, dimensão e características do material.

3.2 - Projecto do Molde

O material seleccionado para o molde, de entre os materiais metálicos, foi o alumínio pelo facto de ser um material não magnético, característica que vai ser importante aquando da introdução de campos magnéticos, para controlo da frente de fluxo de sistemas de resinas carregadas com nanofluidos. Nesta decisão também foi importante o facto de ser um material suficientemente resistente para suportar a força de fecho da prensa. O alumínio com uma condutividade térmica de 237 W/(m·K), é um bom condutor de calor, e consequentemente a transferência de calor, por condução, entre o molde e a resina será elevada. Caso não fosse necessário um molde metálico outro material, não magnético e mau condutor seria preferível, pelo facto de se prever um rápido equilíbrio de temperatura entre a resina e o molde.

Após a selecção do material houve necessidade de medição da dimensão máxima dos pratos da prensa e da furação necessária para a montagem do molde na prensa. Foram modelados quatro pratos recorrendo ao software Solidworks e respectivos pinos de ligação que para além de permitirem a passagem de toda a cablagem dos sensores e tubo de injecção entre placas conferem uma maior rigidez às duas placas centrais.

O ponto onde a permeabilidade atinge o seu valor estacionário afasta-se do ponto de injecção com o aumento do raio de entrada. Isto pode ter importantes implicações se é utilizado um molde pequeno para a medição de permeabilidade. Quanto maior o raio do ponto de injecção, mais tempo é necessário para que a frente fluxo venha a convergir para um valor estacionário, pelo que o raio do ponto de injecção deve ser o menor possível de modo a obtermos um fluxo que não é influenciado pelo raio e consequentemente uma dimensão do molde menor.

O meio molde inferior foi maquinado de modo a permitir a colocação de termopares, espaçadores e um canal que permitirá recolher o excesso de resina (figura12). Quanto ao molde superior apenas, foi maquinado um furo central, de 8 mm, para instalar um acessório de ligação de modo a conectar o molde ao pote de pressão.

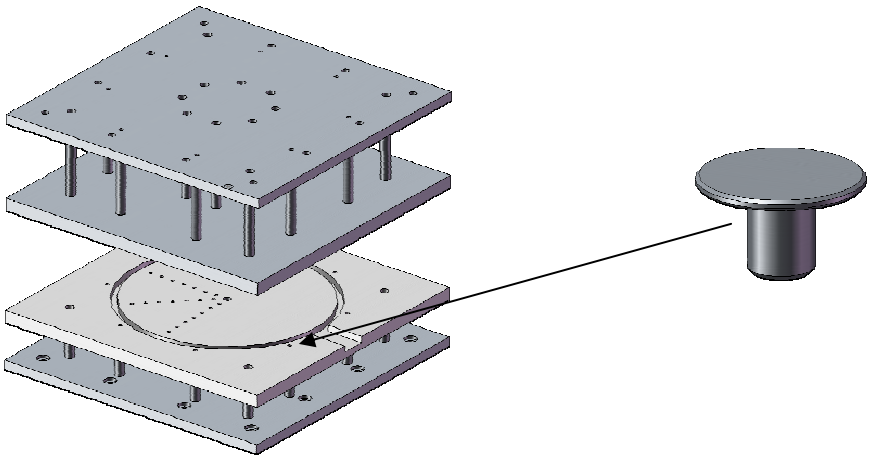


Figura 12 – Molde e pormenor do espaçador

3.3 - Colocação dos termopares no molde

O transdutor para medir temperatura mais utilizado é o termopar uma vez que é robusto, barato, pode operar numa vasta gama de temperaturas é muito versátil e útil como sensor. No entanto, os termopares têm alguns requisitos no condicionamento de sinal, o que faz com que os equipamentos para aquisição sejam dispendiosos. O sinal típico de um termopar apresenta as seguintes características:

- Saída em voltagem da ordem dos mV
- Saída não linear (excepto termopares tipo K)

Um termopar opera sobre o princípio de que a junção de dois metais diferentes gera uma tensão que varia de acordo com temperatura. No entanto é difícil medir essa tensão porque a saída é da ordem dos mV, não linear e para ligar o termopar à placa de aquisição é necessário criar a chamada compensação de referência ou compensação da junção fria. O método da compensação da junção fria pode ser feita de duas formas, com recurso a hardware ou software de compensação.

O tipo de termopar escolhido de entre os vários disponíveis foi o do tipo T pelo facto de o limite de erro ser menor para a gama de temperaturas em que pretendemos operar (tabela 1).

Tabela 1 – Erro para diferentes tipos de termopares

Tipo de termopar	Faixa de Temperatura	Limite de erro standard	Limite de erro especial
T	0 a 370ºC	+1ºC ou +0,75%	+0,5ºC ou 0,4%
J	0 a 760ºC	+2,2ºC ou +0,75%	+1,1ºC ou +0,4%
E	0 a 870ºC	+1,7ºC ou +0,5%	+1ºC ou +0,4%
K/N	0 a 1260ºC	+2,2ºC ou +0,75%	+1,1ºC ou 0,4%
S/R	0 a 1480ºC	+1,5ºC ou +0,25%	0,6ºC ou 0,1%
B	870 a 1700ºC	+0,5%	+0,25%

Esta tabela de erros está baseada na NORMA ASTM E 230, segundo Aits-90 (escala internacional de temperatura).

Os termopares seleccionados, após soldadura da junção de medição quente, foram montados no meio molde inferior a 0º, 45º e 90º de modo a permitir calcular as principais direcções de permeabilidade no caso de reforços anisotrópicos (figura 13). A montagem levou em conta o facto de que a junção deve influenciar o mínimo possível a frente de fluxo de resina. Entre o molde e a junção quente foram montados uns acessórios com baixa condutividade térmica de modo a reduzir a transferência de calor por condução (figura 14). A colocação deste material deve-se ao facto de a transferência de calor da resina para o molde e deste para o termopar ser quase instantânea. O alumínio apresenta elevada condutividade térmica, pelo que corríamos o risco de, mesmo antes da frente de fluxo da resina atingir a junção quente, a temperatura do termopar se alterasse devido ao calor transmitido pelo molde.

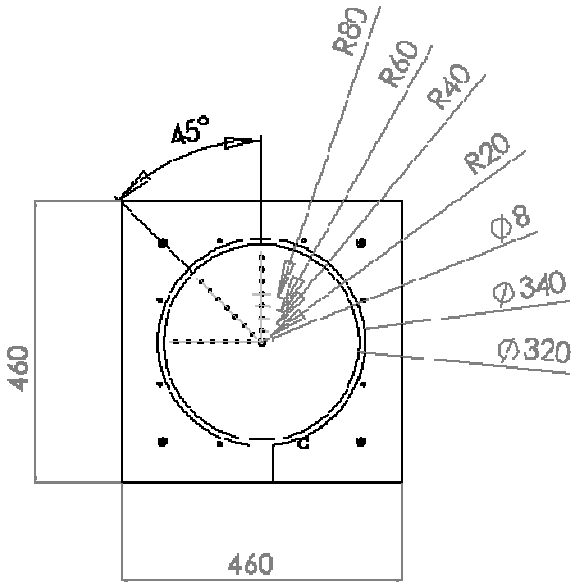


Figura 13 – Localização dos termopares

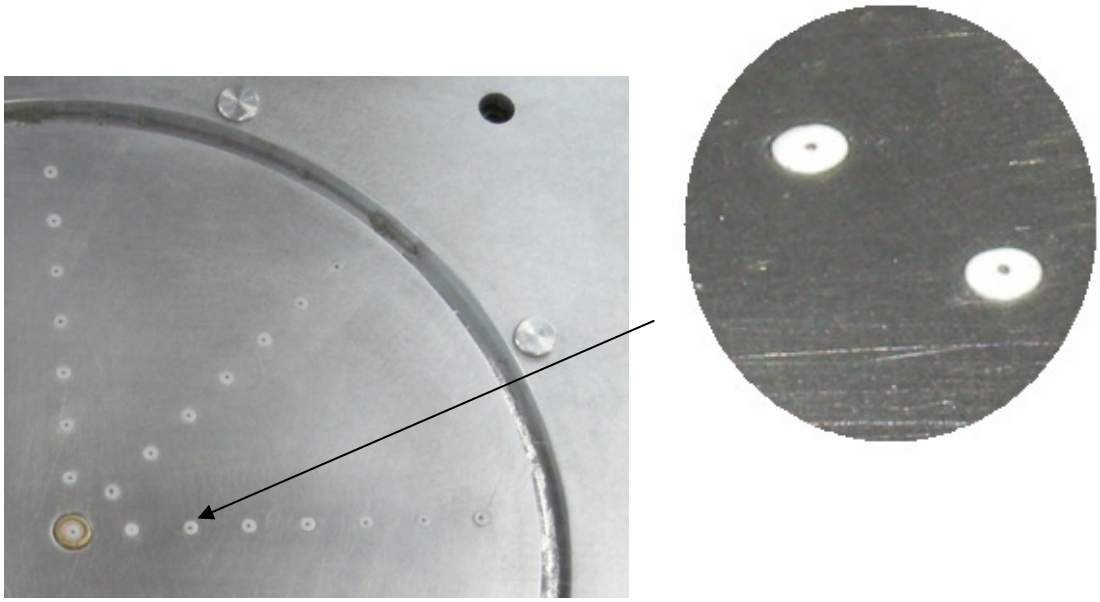


Figura 14 – Molde e pormenor da junta quente

Montados os acessórios e respectivos termopares foi aplicado silicone no lado oposto à junção quente do molde de modo a evitar fugas de resina e também para suportar o termopar. Uma vez curado o silicone foi aplicada uma cola que dará mais rigidez no suporte do termopar (figura 15).

Figura 15 – Sequência de montagem dos termopares

3.4 – Set-up do sistema de medição e procedimento experimental

Os equipamentos necessários para efectuar a monitorização da frente de fluxo e cálculo da permeabilidade, a pressão constante, e recorrendo a termopares como sensores são:

- Cortante
- Balança
- Pote de pressão
- Prensa de pratos quentes
- Placa de aquisição
- Computador

O corte da fibra deve ser realizado de modo que não hajam grandes variações, para tal recorreu-se a um cortante, projectado especificamente para este molde (figura 16).

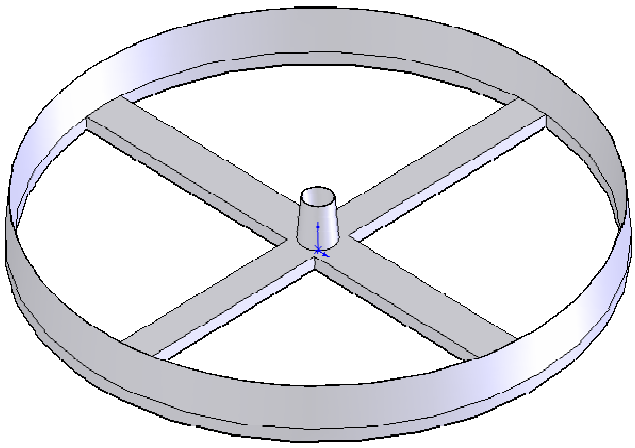


Figura 16 – Cortante

Os ensaios vão ser realizados a pressão constante, pelo que se torna necessário o uso de um pote de pressão, para a injecção da resina para o interior do molde. A prensa de pratos quentes, para além de conferir rigidez ao molde, permite-nos o aquecimento dos pratos em simultâneo ou independentemente. O sistema de aquisição é composto

por uma placa de aquisição com dois módulos de condicionamento de sinal para termopares e um computador que permite a monitorização em tempo real e armazenamento dos dados. Os módulos de condicionamento de sinal desta placa de aquisição realizam, para além da amplificação, a compensação de junta fria.

O set-up de medição foi montado conforme se ilustra na figura 17. O pote de pressão é conectado à rede de ar comprimido e ao ponto de injecção no molde, e este fixo na prensa. Os termopares são ligados à placa de aquisição que se encontra ligada ao computador de forma a podermos observar em tempo real o ensaio.

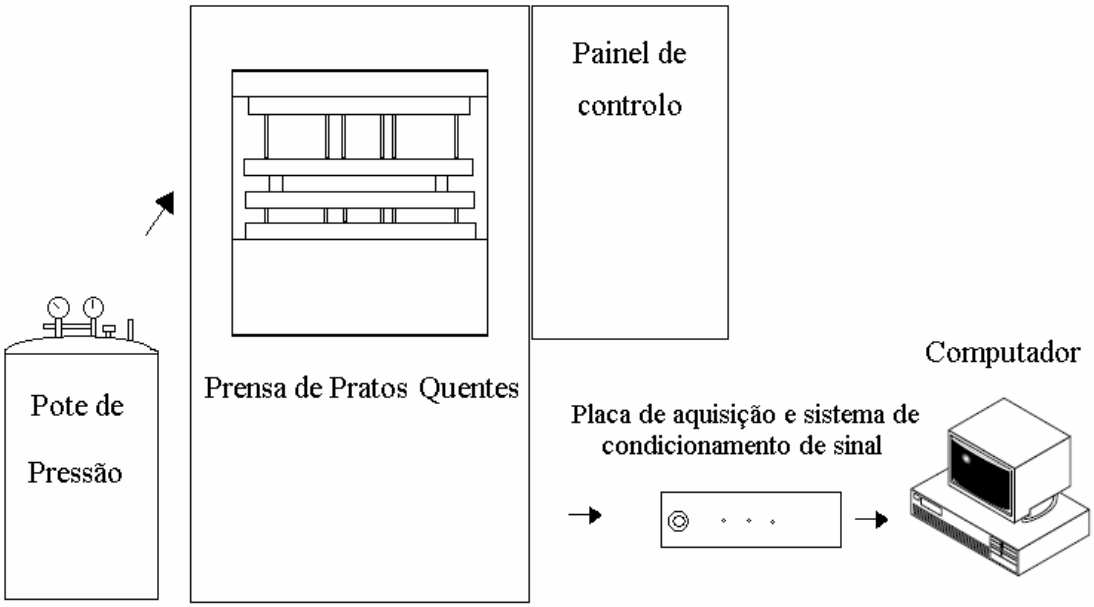


Figura 17 - Configuração do sistema de detecção da frente de fluxo

Antes de se iniciarem os ensaios foram feitos cálculos (ficheiro Excel em anexo) para determinar o peso de fibra necessário (120.5g) para perfazer uma percentagem de fibra de 30% do volume do molde. Aquando da pesagem das fibras verificou-se que eram necessárias cinco camadas para preencher este volume, contudo devido à variação do peso de cada camada tornou-se necessária a pesagem antes de cada ensaio, para a obtenção de valores mais precisos.

As fibras empilhadas e pesadas são posicionadas no molde cuidadosamente (figura 17) de modo a não termos variações de permeabilidade. A prensa é fechada, o programa de aquisição é colocado a correr e quase simultaneamente inicia-se a injecção

de resina (Fotografias no Anexo A). Após a detecção da passagem de resina pelo segundo termopar, a aquisição de dados e a injecção de resina é concluída.

O passo que se segue é retirar a fibra impregnada e limpeza do molde com panos embebidos em acetona, uma vez limpo pode realizar-se um novo ensaio.

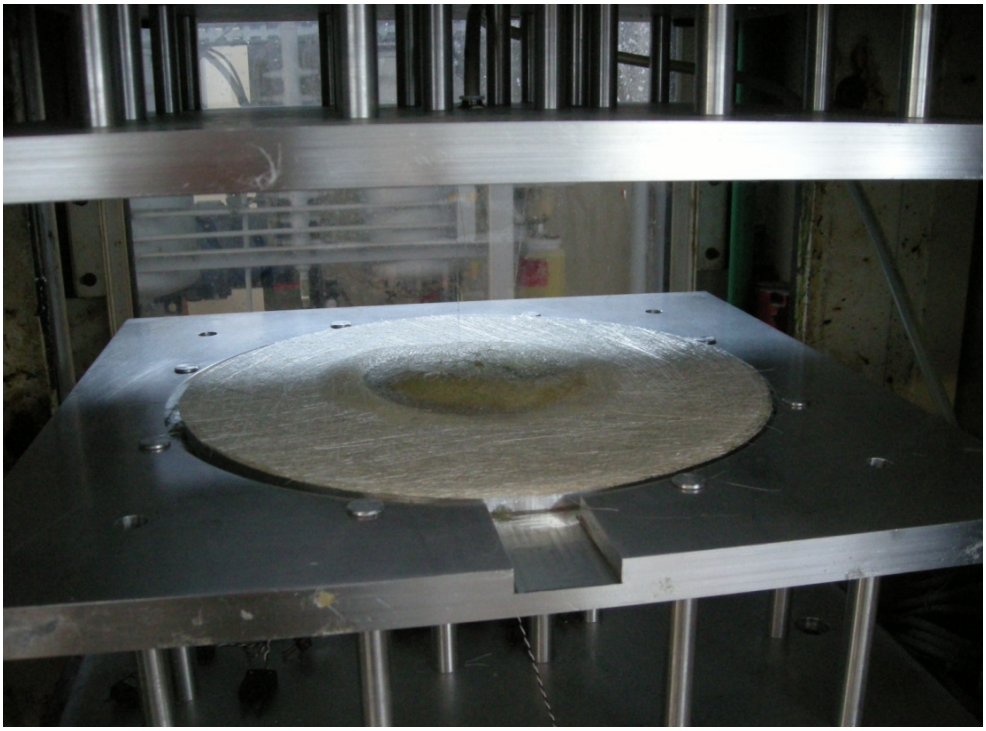


Figura 18 – Posicionamento das fibras no interior do molde

A medição da temperatura da resina antes da colocação no pote de pressão serve apenas para podermos avaliar a diferença de temperatura entre a resina e o molde necessária à detecção da frente de fluxo, os valores de temperatura necessários para cálculo da viscosidade são-nos fornecidos pelos termopares.

3.5 - Viscosidade da resina

Se o processo usado para produzir uma peça é o LCM, a viscosidade da resina injectada desempenha um papel importante. Variabilidade da frente de fluxo em função do tempo, e também a variabilidade da viscosidade tem influência sobre a qualidade da impregnação. Antes de mais, são apresentados valores de viscosidade para uma resina termoendurecível.

Com base nos valores medidos para a resina vinilester usada, Derakane 411- 45 (Anexo B) e sabendo que a dependência da viscosidade com a temperatura é dada pela

equação de Arrhenius (equação 5), foi traçado o (gráfico 1) onde se pode verificar a dependência da viscosidade com a variação da temperatura:

$$\mu = Ae^{b/T} \qquad \text{(Equação 5)}$$

Onde μ é a viscosidade, A e b constantes específicas do material e T a temperatura absoluta em Kelvin.

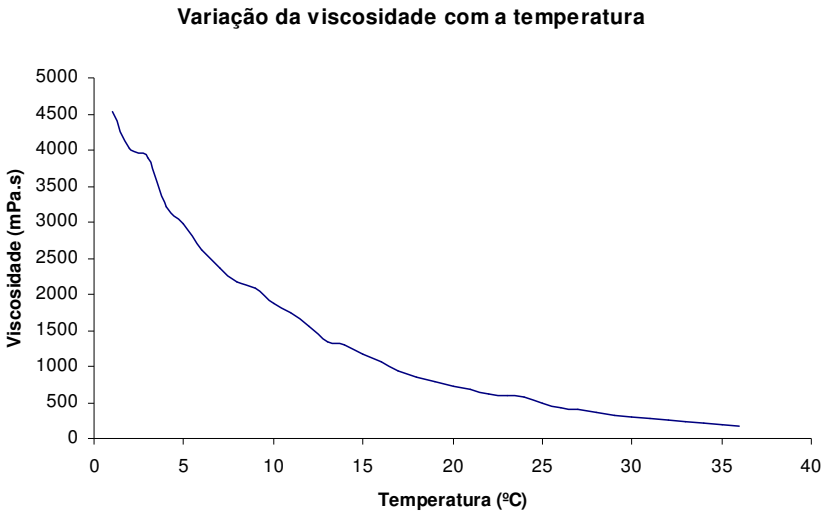


Gráfico 1 - Viscosidade da resina Derakane 411- 45 em função da temperatura

4 – Resultados

Os termopares ligados à placa de aquisição são os que se apresentam na (figura 19), estando o termopar 1 localizado na zona de injecção e o segundo a 20 mm de distância deste.

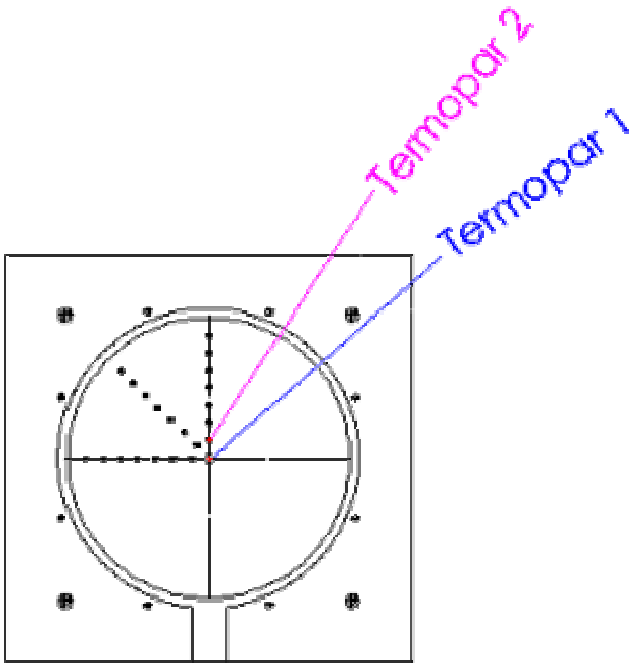


Figura 19 – Posicionamento dos termopares no interior do molde

A seguir apresentam-se os dados de cada configuração testada e respectivas conclusões.

4.1 - Configuração 1

Esta primeira configuração com a resina à temperatura ambiente e molde ligeiramente aquecido foi a primeira a ser testada por uma questão prática. As condições em que foi realizada esta experiência enumeram-se a seguir:

- T_{resina} = 15 ºC
- T_{amb} = 16 ºC
- T_{molde} = 20.5 ºC
- P_{inj} = 2 bar

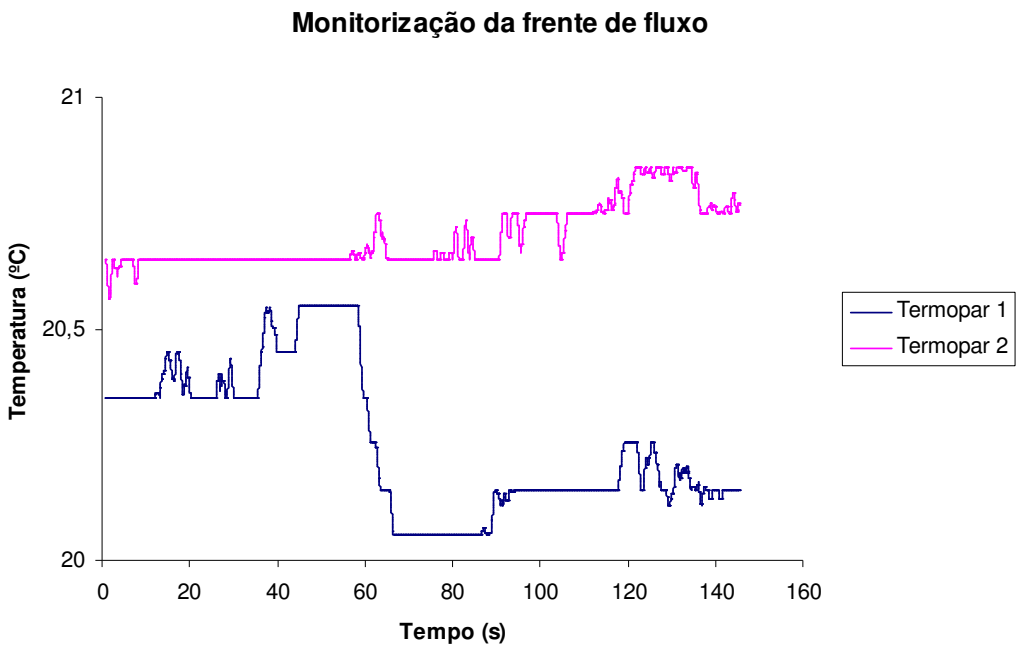


Gráfico 2 – Resultado do primeiro ensaio

Nesta configuração verificou-se que uma diferença de temperatura de 5.5 ºC entre o molde e a resina não torna evidente a detecção da frente de fluxo no segundo termopar (gráfico 2). Quando a resina passa pelo segundo termopar encontra-se sensivelmente à mesma temperatura do molde, o que inviabiliza a detecção, devido a uma rápida transferência da energia interna do molde, por condução, para a resina.

Recorrendo a esta montagem não é possível o cálculo a permeabilidade. Para efectuar o é necessário a detecção de uma segunda posição em função do tempo. De modo detectar a frente de fluxo no segundo termopar aumenta-se a diferença de temperaturas entre o molde e a resina.

4.2 - Configuração 2

As condições da segunda configuração são semelhantes à da primeira com excepção da resina que foi arrefecida.

- T_{resina} = 8 ºC
- T_{amb} = 15 ºC
- T_{molde} = 20.5 ºC
- P_{inj} = 2 bar

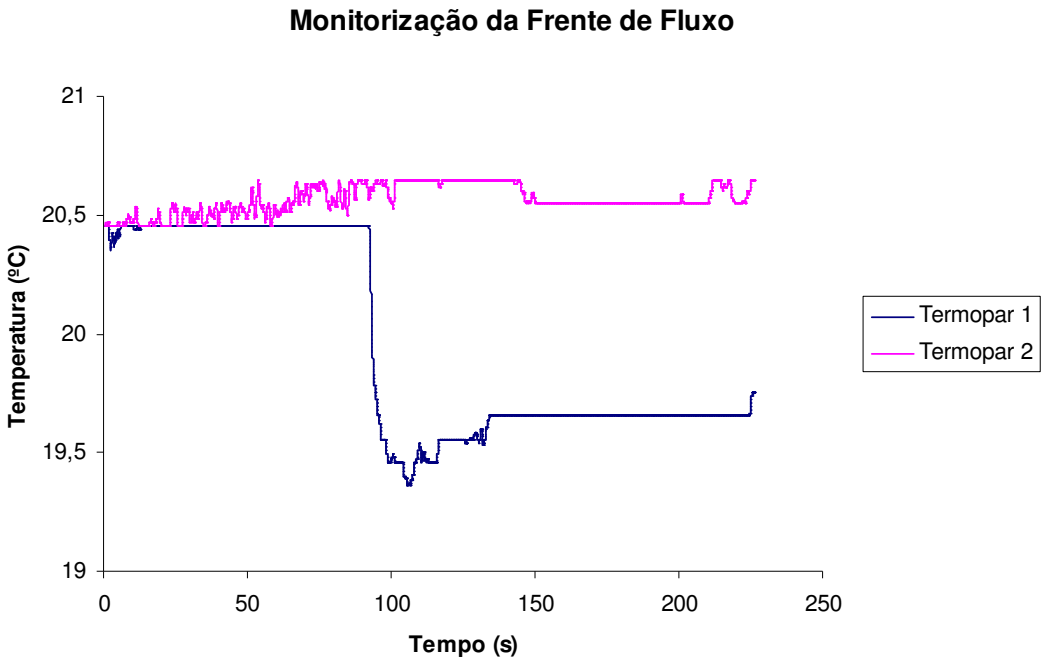


Gráfico 3 – Resultado do segundo ensaio

Com esta configuração verificou-se, tal como na primeira que é possível a detecção da entrada de resina, aqui de uma forma mais evidente (gráfico 3). A diferença de temperatura que inicialmente era de 12.5 ºC, aquando da entrada de resina no molde é de 1 ºC, que se revela insuficiente para a detecção da frente de fluxo pelo segundo termopar. Esta pequena diferença de temperatura justifica-se pelo facto da viscosidade da resina a 8 ºC ser muito baixa e como tal é necessário muito tempo para percorrer o caminho do pote ao molde. Durante este percurso ocorreu transferência de calor do ar e do molde para a resina. Verificou-se também a necessidade de aumentar a pressão de injecção, devido ao aumento da viscosidade.

Após vários ensaios, e verificando-se sempre a não detecção de forma evidente da frente de fluxo no segundo termopar, partiu-se para uma nova abordagem, e que de seguida se passa a explicar.

4.3 - Configuração 3

Na terceira configuração testada o molde superior foi aquecido a uma temperatura de aproximadamente 33 ºC. As condições são as seguintes:

- Tresina = 15 ºC
- Tamb = 16 ºC
- Tprato superior = 33 ºC
- Tprato inferior = 28 ºC
- P_{inj} = 1.5 bar

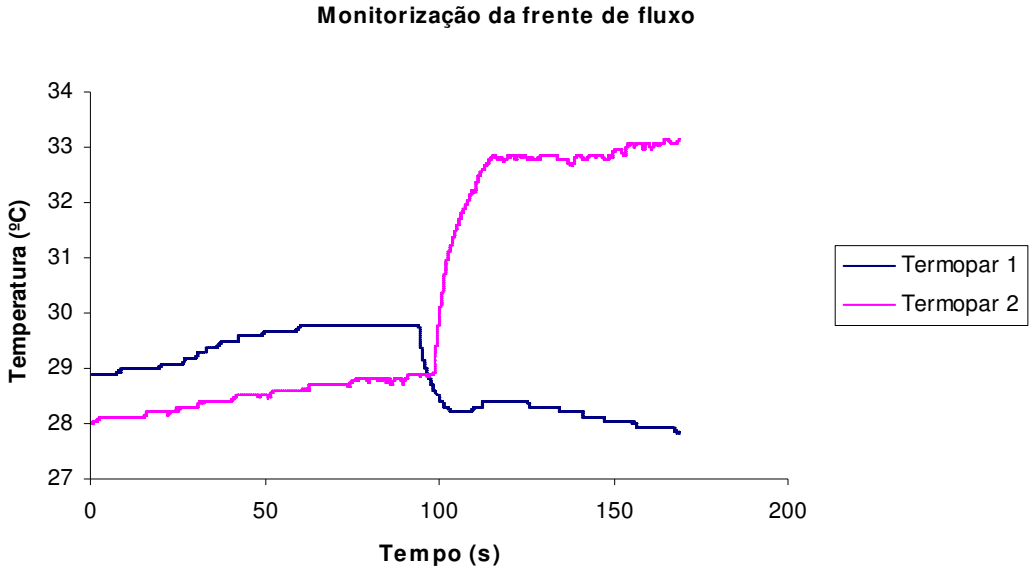


Gráfico 4 – Resultado do terceiro ensaio

Nesta nova abordagem ao problema foi possível detectar, quer a entrada da resina no molde, quer a frente de fluxo num raio de 20mm do ponto de injecção (gráfico 4). Isto foi conseguido pelo aquecimento do prato superior da prensa de pratos quentes. No ponto de entrada de resina no molde verificou-se um decréscimo de temperatura, este devido à temperatura inferior da resina. A detecção da frente de fluxo pelo segundo termopar deveu-se ao aquecimento da resina provocado pela transferência de calor do prato superior. Com este sistema é possível a detecção da frente de fluxo e posterior cálculo de um valor de permeabilidade e que se passa a fazer seguidamente.

4.4 – Análise de resultados para a configuração 3

O cálculo da permeabilidade é efectuado recorrendo à (equação 4), conforme foi atrás referido, para uma manta isotrópica da *Vetrotex* com a referência CM 631 (Anexo C) com uma densidade de 300 g/m^2.

A partir dos dados registado pela placa de aquisição é possível calcular o tempo que a resina necessita para chegar ao termopar 2 desde a entrada no molde (dados no

CD em anexo). O raio de entrada de resina r_0 e a localização do segundo termopar r_f são constantes e iguais a 0.004 m e 0.02 m respectivamente. A porosidade é calculada a partir do volume de fibra e volume cavidade do molde para espaçadores de 2 mm, a viscosidade da resina é retirada do (gráfico 1) em função da temperatura. Para estas condições a permeabilidade foi calculada para diferentes ensaios.

Ensaio 1

Condições:

- mf = 127.80g
- Tresina = 15ºC
- Tamb=16ºC
- Tprato superior=33ºC
- P_{inj} = 1.50 bar

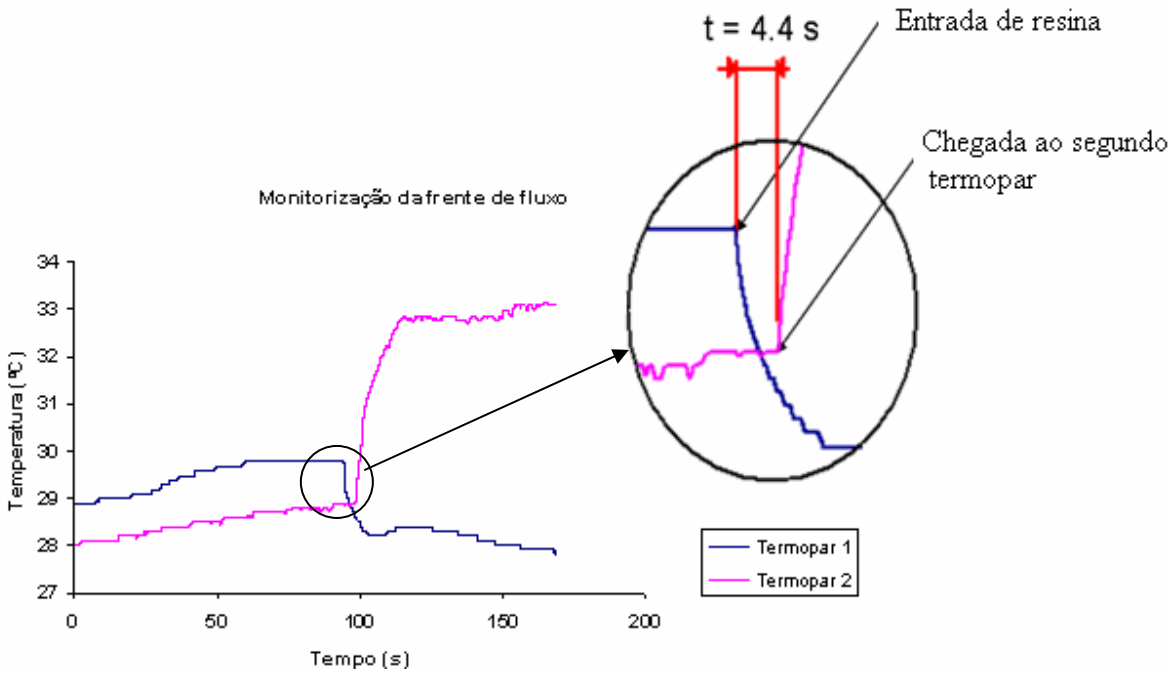


Gráfico 5 – Pormenor da detecção pelos dois termopares

Para uma massa de fibra de 127.8 g temos uma porosidade ε = 68.02%, um tempo de chegada ao segundo termopar de 4.4 s (Anexo D) e uma viscosidade que vai depender da temperatura. O valor de permeabilidade vai depender da temperatura a que se calcula a viscosidade. Apresentam-se de seguida os cálculos de permeabilidade

considerando a temperatura da resina como sendo igual à temperatura do molde superior, inferior e uma temperatura média destas.

- μ = 0.23 Pa.s $\Rightarrow$ K = 4.46 x 10^{-11} m2 (T= 33 ºC) – molde superior
- μ = 0.36 Pa.s $\Rightarrow$ K = 7.05 x 10^{-11} m2 (T=28 ºC) – molde inferior
- μ = 0.23 Pa.s $\Rightarrow$ K = 5.61 x 10^{-11} m2 (T= 30.5 ºC) – média de temperaturas

Ensaio 2

Condições:

- mf = 122.78g
- Tresina = 15ºC
- Tamb=16ºC
- Tprato superior=33ºC
- P_{inj} = 1.5 bar

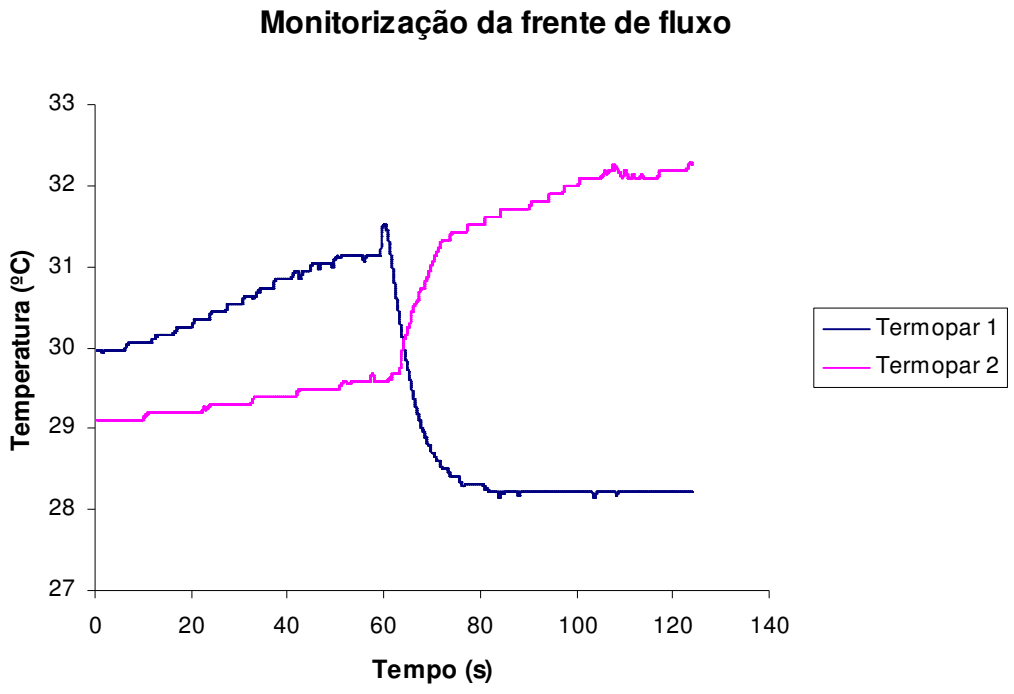


Gráfico 6 – Resultados do segundo ensaio

Neste segundo ensaio a diferença de temperaturas entre o molde superior e inferior foi reduzida (gráfico 6). Para as condições referidas, e com um tempo de chegada da resina ao segundo termopar t = 1.66 s, a permeabilidade é de:

- μ = 0.23 Pa.s $\Rightarrow$ K = 1.19 x 10 $^{-10}$ m2 (T= 33 ºC) – molde superior
- μ = 0.33 Pa.s $\Rightarrow$ K = 1.72 x 10 $^{-10}$ m2 (T=29 ºC) – molde inferior
- μ = 0.27 Pa.s $\Rightarrow$ K = 1.43 x 10 $^{-10}$ m2 (T= 31 ºC) – média de temperaturas

Ensaio 3

Condições:

- mf = 126.01g
- Tresina = 15ºC
- Tamb=16ºC
- Tprato superior=33ºC
- P_{inj} = 1.5 bar

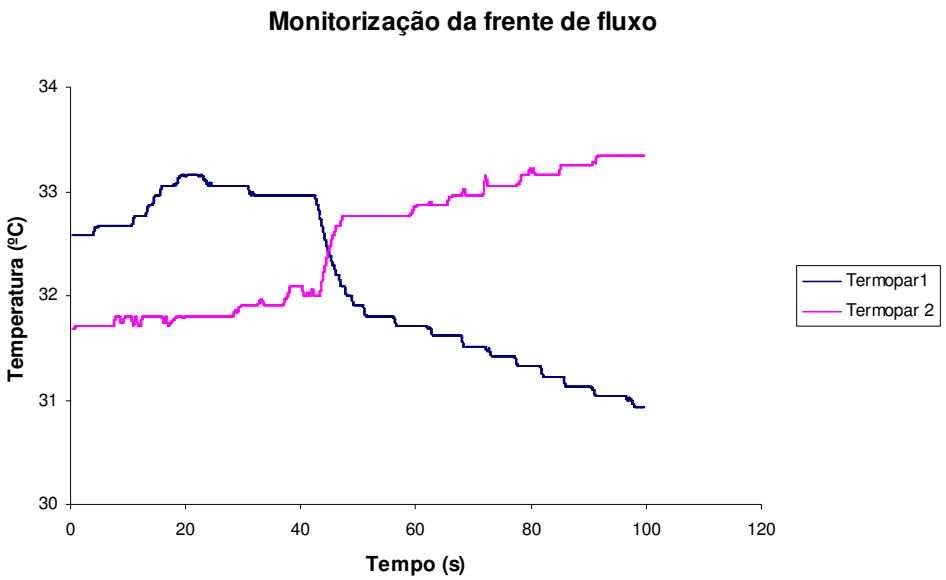


Gráfico 7 – Resultados do segundo ensaio

Neste ensaio a diferença de temperaturas foi reduzida para cerca de 1.5 ºC (gráfico7), verificando-se um tempo de chegada da resina do primeiro ao segundo termopar de 0.74 s.

- μ = 0.23 Pa.s $\Rightarrow$ K = 2.64 x 10 $^{-10}$ m2 (T= 33 ºC) – molde superior
- μ = 0.25 Pa.s $\Rightarrow$ K = 2.98 x 10 $^{-10}$ m2 (T=31.7 ºC) – molde inferior
- μ = 0.24 Pa.s $\Rightarrow$ K = 2.81 x 10 $^{-10}$ m2 (T= 31 ºC) – média de temperaturas

Como seria de esperar a permeabilidade, tende para um valor, à medida que se reduz a diferença de temperaturas do molde. Neste último ensaio e para uma diferença de temperatura de 1.5 ºC o erro máximo é de 11.4%, mas que será possível diminuir pela redução da diferença de temperaturas.

No cálculo de permeabilidades estão presentes grandes amplitudes de valores devido a factores como percentagem de fibra, arquitectura do reforço que possui fraca reprodutibilidade, corte, empilhamento e deformação aquando da colocação no molde.

Estudos afirmam [15] que os valores de permeabilidade de experiências repetidas nas mesmas condições estendem-se por uma grande amplitude e seguem uma distribuição normal. A mediana de valores de permeabilidade medidos localiza-se no centro da amplitude de 25 a 75% da variação de valores, esta amplitude é pequena em comparação com a amplitude total de valores de permeabilidade. De seguida (figura 20) apresenta-se um exemplo de uma comparação de distribuições de valores de permeabilidade para tecidos e fios entrançados onde podemos observar a amplitude de valores de permeabilidade para os referidos tecidos. Para caracterização estatística será necessária a realização de mais experiências, no exemplo referido foram realizadas 64 experiências.

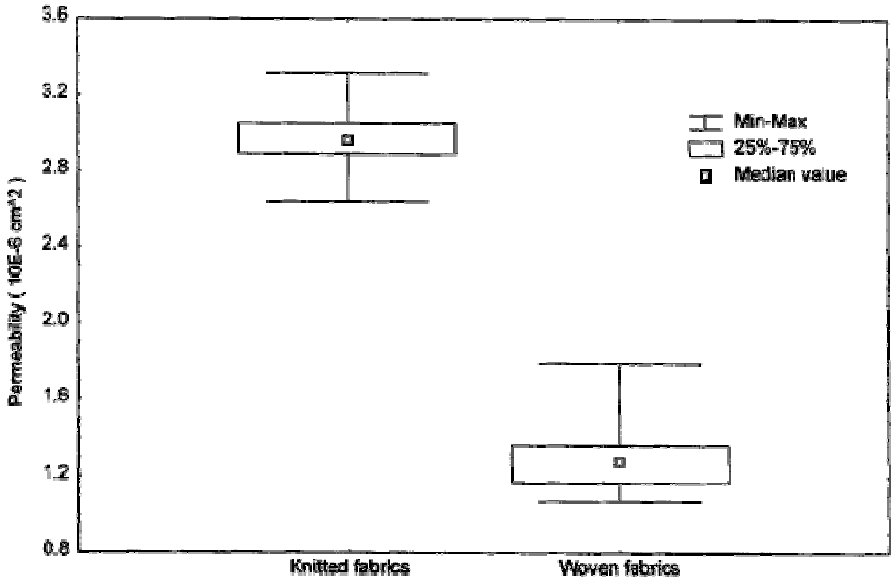


Figura 20 – Comparação da dispersão de valores de permeabilidades [15]

5 - Conclusões

Ao longo deste relatório é feita uma descrição de como é conseguida a monitorização do fluxo de resina e posterior cálculo da permeabilidade em moldes metálicos usando os termopares como sensores. A monitorização e consequente cálculo podem ser realizadas mantendo o meio molde superior a temperatura superior à do meio molde inferior e injectando resina à temperatura ambiente. Nesta abordagem ocorre uma transferência de calor, essencialmente por condução, para a resina, que permitirá detectar a frente de fluxo aquando da passagem pelos termopares a temperatura mais baixa no meio molde inferior.

Os valores de permeabilidade encontrados são da mesma ordem de grandeza de outros estudos, contudo será necessário para o cálculo fiável da permeabilidade a realização de ensaios com as seguintes condições:

- Utilização de mais termopares de modo a controlar a temperatura em mais zonas do molde
- Substituição da resina por um óleo em que a dependência da viscosidade com a temperatura seja mínima
- Colocação de um sensor de pressão, para esta configuração, na zona de injecção

A permeabilidade calculada por este método encontra-se entre os valores calculados usando os dados de viscosidade à temperatura do meio molde inferior e superior. Com recurso a um óleo em que dependência da viscosidade seja mínima com a temperatura, o valor de permeabilidade será independente da temperatura dos meios moldes. No que respeita ao uso de um sensor de pressão este é conveniente para ensaios a pressão de injecção constante, uma vez que o valor lido no pote de pressão, para além de não ter precisão, não corresponde exactamente ao valor de pressão no ponto de injecção devido a perdas de pressão no tubo.

6 - Referências bibliográficas

[1] G. Tuncol, Murat Danisman, Alper Kayer, E. Murat Sozer. Constrains on monitoring resin flow in the resin transfer molding (RTM) process by using thermocouple sensors, Composites, Part A 38 1363_1386, 2007

[2] Infopedia (2003-2006). Porto editora.

[3] Work, W. J., Horie, K., Hess, M. e Stepto, R. F. T. (2004). Definitions of terms related to polymer blends, composites, and multiphase polymeric materials (iupac recommendations 2004). Pure and Applied Chemistry, 76(11):1985–2007.

[4] P. Ferland, D. Guittard, and F. Trochu. Concurrent methods for permeability measurement in resin transfer moulding. Polymer composites, 17(1):149_158, 1996.

[5] T.S. Lundstrom, R. Stenberg, R. Bergstrom, H. Partanen, and P.A. Birkeland. In-plane permeability measurements: a Nordic round robin study. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing,
31(1):29_43, 2000.

[6] K. Hoes, D. Dinescu, H. Sol, M. Vanheule, R.S. Parnas, Y. Luo, and I. Verpoest. New set-up for measurement of permeability properties of fibrous reinforcements for rtm. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 33(7):959_969, 2002.

[7] K. Hoes, D. Dinescu, H. Sol, R.S. Parnas, and S. Lomov. Study of nesting induces scatter of permeability values in layered reinforcement fabrics. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 35(12):1407_1418, 2004.

[8] Qiang Liu, Richard S Parnas, and Hermione S Gi_ard. New setup for in-plane permeability measurement. Composites Part A, In press, corrected proof, 2006.

[9] J.P. Chick. Material characterisation for flow modelling in structural reaction injection moulding. Polymer Composites, 17(1):124_135, 1996.

[10] J.M. Lawrence, J. Barr, R. Karmakar, and S.G. Advani. Characterization of preform permeability in the presence of race tracking. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 35(12):1393_1405, 2004.

[11] B.R. Gebart and P. Lidstrom. Measurement of in-plane permeability of anisotropic fibre reinforcements. Polymer composites, 17(1):43_51,1996.

[12] R. Gauvin and M. Chibani. The modelling of mould filling in resin transfer moulding. In International Polymer Processing, pages 42_46,1986.

[13] B.M. Yu and L.J. Lee. A simplified in-plane permeability model for textile fabrics. Polymer Composites, 21(5):660_685, 2000.

[14] K. Hoes, D. Dinescu, H. Sol, M. Vanheule, R.S. Parnas, Y. Luo, and I. Verpoest. New set-up for measurement of permeability properties of fibrous reinforcements for RTM. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 33(7):959_969, 2002.

[15] R. Pan, Z. Y. Liang, C. Zhang, and B. Wang. Statistical characterization of fiber permeability for composite manufacturing. Polymer Composites, 21(6):996_1006, 2000.

[16] Qiang Liu, Richard S Parnas, and Hermione S Gi_ard. New setup for in-plane permeability measurement. Composites Part A, In press, corrected proof, 2006.

[17] A. Endruweit and A.C. Long. Influence of stochastic variations in the fibre spacing on the permeability of bi-directional textile fabrics. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 37(5):679_694, 2006.

[18] Weitzenböck JR, Shenoi RA, Wilson PA. Radial flow permeability measurement, Polymer Composites, Part A 30 781-796, 1999.

7 - Anexos

7.1 - Anexo A: Fotografias dos sistemas de medição

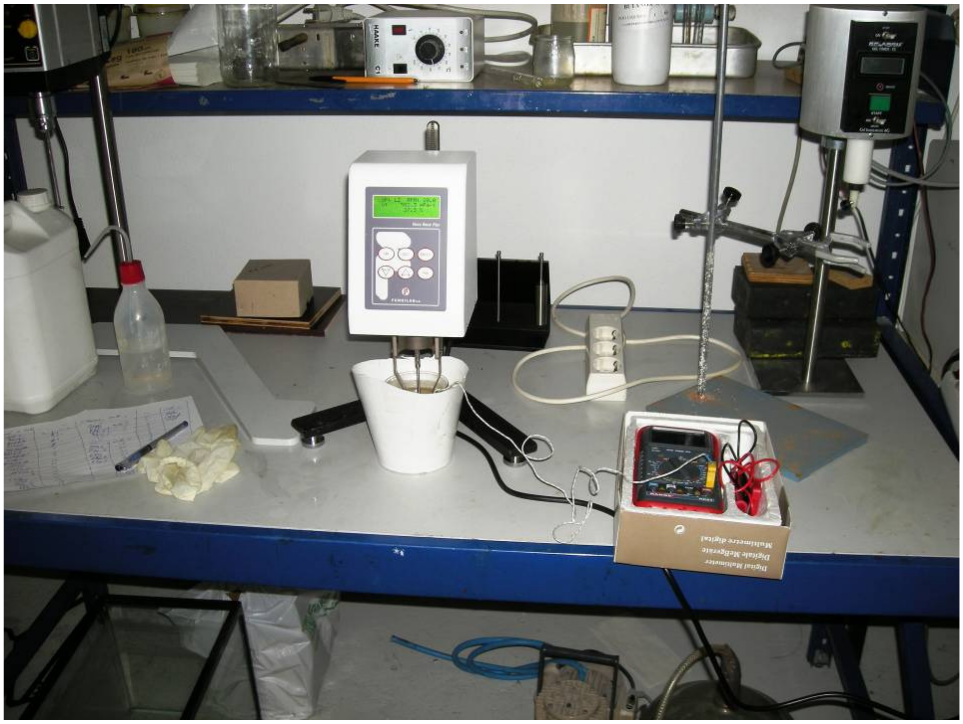


Figura 21 – Sistema de medição de viscosidade

Figura 22 – Sistema de aquisição de dados

7.2 - Anexo B: Propriedades da resina utilizada

DERAKANE*

Epoxy Vinyl Ester Resins

DERAKANE* 411 resins

- DERAKANE 411 resins are Bisphenol-A Epoxy based vinyl esters, designed to provide superior toughness and a high degree of chemical resistance
- DERAKANE 411 resins show very high resistance to a wide range of acids, alkalies, bleaches and organic solvents.
- They are the preferred choice for maximum resistance to caustic alkalis, hypochlorite bleaches and hot water.
- They exhibit excellent mechanical properties over the entire service temperature range and have very high damage resistance, even down to -60°C.
- DERAKANE 411C-50 resin has low viscosity which makes it the resin of choice for resin injection or vacuum infusion processes.
- When properly formulated and cured, all DERAKANE 411 resins comply with FDA regulation 21 CFR 177.2420, covering materials intended for repeated use in contact with food.

Liquid Resin Properties

Property	411-35	411-45	411-50	411-C50
Brookfield Viscosity mPa.s at 25°C/77°F	2000	500	350	125
Flash Point (°C) tag open cup	34	34	32	32
Specific Gravity uncured at 25°C/77°F	1.073	1.04	1.03	1.02
Acid Number (maximum)	.	8.5	.	8
Storage Stability (months)	6	6	6	3

Dow Plastics

Page 1 of 3

Trademark of the Dow Chemical Company

Typical Gel times

using MEKP* as catalyst and 2,4-P as retarder

Temperature		10-20 minutes	20-40 minutes	40-60 minutes
Cool, 15-20°C approx. 60°F	MEKP	1.25%	1.25%	1.25%
	CoOct	0.30%	0.30%	0.20%
	DMA	0.20%	0.05%	0.03%
	2,4-P	-	-	-
Warm, 21-27°C approx. 70°F	MEKP	1.50%	1.50%	1.25%
	CoOct	0.30%	0.20%	0.20%
	DMA	0.05%	0.05%	0.05%
	2,4-P	-	0.05%	0.075%
Hot, 27-32°C approx. 80°F	MEKP	1.25%	1.00%	1.25%
	CoOct	0.20%	0.20%	0.20%
	DMA	0.05%	-	
	2,4-P	-	-	0.10%

Using Benzoyl Peroxide

Temperature		10-20 minutes	20-40 minutes	40-60 minutes
Cool, 15-20°C approx. 60°F	BPO	2.00%	1.50%	1.50%
	DMA	0.20%	0.15%	0.10%
Warm, 21-27°C approx. 70°F	BPO	1.50%	1.00%	1.00%
	DMA	0.15%	0.10%	0.05%
Hot, 27-32°C approx. 80°F	BPO	1.00%	1.00%	0.75%
	DMA	0.10%	0.05%	0.05%

Using CUHP Preparations (Trigonox® 239/Luperox® Cu80/Interox® VP160A/Andonox® CHM-50)

Temperature		10-20 minutes	20-40 minutes	40-60 minutes
Cool, 15-20°C approx. 60°F	Peroxide	2.00%	2.00%	2.00%
	CoOct	0.50%	0.30%	0.40%
	DMA	0.20%	0.10%	0.20%
	2,4-P	-	-	0.05%
Warm, 21-27°C approx. 70°F	Peroxide	2.00%	2.00%	2.00%
	CoOct	0.60%	0.30%	0.50%
	2,4-P	-	-	0.05%
Hot, 27-32°C approx. 80°F	Peroxide	1.50%	1.50%	1.50%
	CoOct	0.40%	0.50%	0.40%
	2,4-P	-	0.06%	0.10%

* Materials used with DERAKANE 411series resins are 6% Cobalt (CoOct) preparation, 100% dimethylaniline (DMA), MEKP (8.5% active oxygen), 98% BPO powder, the CUHP preparations mentioned above, 100% Tertiary Butyl Catechol (TBC) and 100% 2,4-pentanedione (2-4P). Because of the active nature of these products and the differences in the cure additives from different sources, gel time can vary. Always test gel times with a small amount of resin before formulating large amounts.

Dow Plastics

Page 2 of 3

*Trademark of the Dow Chemical Company

Clear Cast Resin Properties

PROPERTY<1>,<2>	
Tensile Strength, MPa	76-83
Tensile modulus, GPa	3.4
Elongation %	5.0 - 8.0
Flexural Strength, MPa	110-124
Flexural Modulus, GPa	3.1
Heat distortion temp. °C	99-104
Barcol Hardness	35

<1> Typical post-cured properties, not to be construed as specifications.
<2> The data given are indicated to highlight the property differences existing between the various families of DERAKANE resins. Specific values listed for a particular resin represent typical properties for other members of that resin family.

Typical Laminate Properties

Property	All mat	Alternating Mat/WR	6mm Laminate
Tensile Strength, MPa	113	241	142
Tensile Modulus, GPa	8.3	16	12
Flexural Strength, MPa	165	262	204
Flexural Modulus, GPa	7.6	16	9.1
Compressive Strength, MPa	220		
Compressive Modulus, GPa	6.2		
Glass Content %	30	50	40

Mat(M) - chopped strand mat - 450 gsm; WR - Woven Roving - 810 gsm; 6mm Laminate - V/M/M/V/WR/M/WR/M; V - Veil

Comparison of physical properties of hand lay-up laminates made with DERAKANE* resins

	ASTM D3299 Spec. Value	411-45	ASTM D3299 Spec. Value	411-45
Temp °C	Flexural Strength, MPa		Flexural Modulus, GPa	
Ambient	131	204	5.5	7.1
66		197		7.0
93		189		5.9
107		101		3.4
121		34		1.6
149		22		1.6
Temp °C	Tensile Strength, MPa		Tensile Modulus, GPa	
Ambient	83.0	142.7		11.0
66		173.1		12.5
93		150.3		10.3
107		125.5		7.7
121		80.7		5.2
149		53.1		

NOTICE: The information and data contained herein do not constitute sales specifications. The property values may be changed without notice. No liability, warranty or guarantee of product performance, can be inferred from this document. It is the Buyer's responsibility to determine whether Dow products are appropriate for Buyer's use and to ensure that Buyer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. No freedom from any patent or other intellectual property rights is granted or to be inferred. March 1996.

Dow Plastics

Page 3 of 3

*Trademark of the Dow Chemical Company

7.3 - Anexo C: Propriedades da fibra utilizada

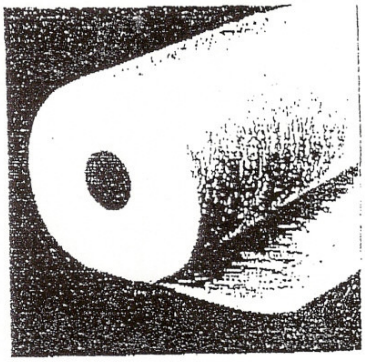
mk makipa
Máquinas e Produtos Químicos para Poliester Reforçado, Lda.

Mat de fils coupés CM 631

Vetrotex

1.05.91

Le mat CM 631 est réalisé à partir de fils de titres normaux, coupés à une longueur de 50 mm. Leur liaison est assurée par un liant poudre, très soluble dans le styrène, assurant une parfaite compatibilité avec des résines polyesters. L'ensimage du fil et le liant sont aussi adaptés à l'utilisation de ce mat pour le renfort de résines époxy, vinylester et résines anticorrosion en général.



Propriétés

- bonne déformabilité
- imprégnation facile
- débullage facile
- grande translucidité des stratifiés
- bonne résistance à l'hydrolyse et aux agents chimiques
- résistance traction élevée permettant la réalisation de bandes pour enroulement

Identification

Exemple : CM 631 - C - 450

CM 631 : référence de ce mat de fils coupés
C ou R : C = un seul bord coupé, ou pas de bord coupé,
R = deux bords coupés
450 : masse surfacique (g / m²)

Caractéristiques Techniques (valeurs nominales)

L'ensimage contient un agent de pontage silane.
Les caractéristiques des mats CM 631 standards sont indiquées ci-dessous.

MASSE SURFACIQUE (g / m²)	PERTE AU FEU (%)	HUMIDITE (%)	RESISTANCE TRACTION (daN / 15 cm)	SOLUBILITE DANS LE STYRENE (%)
ISO 3374	ISO 1887	ISO 3344	ISO 3342	ISO 2558
300	4,5	< 0,2	mini 15	maxi 20
450	3,9	< 0,2	20	20
600	3,8	< 0,2	25	20

Le mat CM 631 a reçu l'agrément de LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING, DET NORSKE VERITAS et RINA, pour la construction de bateaux en polyester renforcé de fibres de verre.

CASAL DO MONTE - ROMARIZ
SANTA MARIA DA FEIRA
3700 S. JOÃO DA MADEIRA
TELEFS. (056) 911071 - 911072 - 911073
FAX (056) 911070

CONTRIBUINTE N.º 502190205
SOCIEDADE POR QUOTAS
CAPITAL SOCIAL REALIZ. 15.000.000$00
REGISTADA NA CONSERV. REG. COM. DE STA. MARIA DA FEIRA SOB O N.º 3317

BANK:
BORGES & IRMÃO - PEREIRÓ - ACC 22831053/01
COMERCIAL PORTUGUÊS-MAIA - ACC 009912361
C. G. DEPÓSITOS-MAIA - ACC 0429016415630

MEMBERSHIP
C. C. LUSO - ALEMÃ
C. C. LUSO-BELGA-LUXEMBURGUES.
C. C. LUSO - ITALIANA
C. C. LUSO - ESPANHOLA

Présentations standards

Masse Surfacique (g / m²)	Largeur (cm)	Dimensions des rouleaux		
		Diamètre (cm)	Longueur (m)	Masse (kg)
300	120 - 130	35	150	64 - 59
450	120 - 130	35	110	59 - 64
600	120 - 130	35	80	58 - 62

Sur demande, et sous réserve d'une quantité minimum, le mat CM 631 peut être livré en d'autres largeurs et masses surfaciques.
Un rouleau est réputé complet s'il contient 70 % au moins de la longueur nominale.

Emballages individuels et collectifs

- **Emballages individuels :**

Chaque rouleau est :

– bobiné sur un tube carton de diamètre intérieur 100 mm et extérieur 108 mm,
– placé dans un carton individuel de 35 x 35 cm de section et de hauteur égale à la largeur du mat.

- **Emballages collectifs :**

Les cartons sont palettisés par 9 pour les largeurs inférieures ou égales à 200 cm, et placés sur une palette de 110 x 110 cm. Les largeurs égales à 102 cm peuvent être disposées horizontalement par 3 sur des palettes de 9 cartons horizontaux. L'ensemble est rendu solidaire par une housse thermorétractée.

Largeur du rouleau (cm)	Dimensions de la palette L x l x h (cm)	Masse de la palette (kg)		
		Masse surfacique (g / m²)		
		300	450	600
120	110 x 110 x 135	486	531	522
130	110 x 110 x 145	531	576	568

- **Emballages de dimensions hors standard :**

Les rouleaux de largeurs supérieures à 200 cm sont emballés dans des sacs polyéthylène, mis dans des caisses en bois à claire-voie contenant 9 rouleaux horizontaux. Pour les largeurs comprises entre 250 et 2[illegible] cm, il est également possible d'emballer les rouleaux dans des cartons.
Les bandes sont emballées dans des cartons de 35 x 35 x h (variable entre 120 et 150 cm). Ces cartons contiennent le maximum de bandes possible et sont palettisés par 9.

Stockage

Le mat CM 631 doit être conservé dans son emballage d'origine à l'abri de la chaleur et de l'humidité. Les meilleures conditions sont des températures comprises entre 15 et 25°C, et une humidité relative entre 45 et 65 %.

VETROTEX se réserve le droit de modifier ce document sans information préalable.

Vetrotex

maikiprel®
Máquinas e Produtos Químicos para Poliester Reforçado, Lda.

CM 631 C
MAT À FILS COUPÉS POUR MOULAGE AU CONTACT

DESCRIPTION

CM 631 C est un mat à liant poudre, fil fin qui apporte: imprégnation rapide, moulage rapide, facilité d'application pour les formes difficiles et ébullage facilité. Le liant et l'ensimage contribuent aux caractéristiques supérieures de ce produit.

PROPRIÉTÉS

1. PERTE AU FEU (NORMES UNIPLAST 318; ISO/DIS 1887)

Masse par unité de surface	Perte nominale	Masse par unité de surface	Perte nominale
225 g/m²	5.5%		
300 g/m²	5.0%	450 g/m²	4.5%
375 g/m²	4.5%	600 g/m²	4.5%

NIVEAU DE SOLUBILITÉ DANS LE STYRENE (UNIPLAST 296/IV; ISO 2558)

Masse par unité de surface	Maximum	Masse par unité de surface	Maximum
225 g/m²	20 secondes		
300 g/m²	20 secondes	450 g/m²	20 secondes
375 g/m²	20 secondes	600 g/m²	20 secondes

3. RÉSISTANCE À LA TRACTION (UNIPLAST 296/V; ISO/DIS 3374.2)

Masse par unité de surface	minimum N/15 cm	Masse par unité de surface	minimum N/15 cm
225 g/m²	100		
300 g/m²	108	450 g/m²	180
375 g/m²	135	600 g/m²	250

4. MASSE PAR UNITÉ DE SURFACE (UNIPLAST 296/III; ISO/DIS 3374.2)

Masse par unité de surface	Moyenne sur la valeur nominale	Masse par unité de surface	Moyenne sur la valeur nominale
225 g/m²	±10%		
300 g/m²	±10%	450 g/m²	±10%
375 g/m²	±10%	600 g/m²	±10%

5. TAUX D'HUMIDITÉ (UNIPLAST 296/III; ISO/DIS 3374.2)

Masse par unité de surface	Maximum
Tous grammages	0.25%

6. DURÉE DE MAGASINAGE
Indéfinie si stocké au sec (taux d'humidité ⩽ 65%, Température ⩽ 25°C.

7. CODIFICATION (UNIPLAST/ISO)

225 g/m²	EC 11.5	18
300 g/m²	EC 11.5	26
375 g/m² 450 g/m² 600 m/g²	EC 11.5	40

8. PROPRIÉTÉS VISUELLES

8.1 Couleur: le mat est blanc et propre, sans poussière, huile ou autres formes de contamination.

8.2 Fibres en surface peu liées: le mat a un minimum de fibres peu liées qui pourraient poser des problèmes pendant la mise en oeuvre.

8.3 Points mous: le mat est exempt de parties molles qui pourraient ne pas rester liées ensemble pendant la découpe et la manipulation.

8.4 Points durs: Le mat est exempt de surfaces à fort taux de liant qui pourraient ne pas s'imprégner d'une façon satisfaisante pendant la mise en oeuvre.

8.5 Le mat est exempt de surfaces fines ou de trous qui pourraient entraîner des taux résine/verre élevés.

DIMENSIONS

Le mat 631 C est produit en rouleaux qui ont les dimensions suivantes:

masse par unité de surface g/m²	Largeur avec découpe sur bord	Longuer
225, 300, 375, 450, 600.	1.02; 1.20 1.30; 1.55 2.04; 2.50 3.10	75 ÷ 140

* 35% des rouleaux dans une même expédition peuvent être composés de plusieurs petites longuers de manière à obtenir la longueur nominale. La longueur minimum d'une pièce sera de 10 m.

UTILISATION

La mat 631 C a été mis au point pour les utilisations marines et génie chimique, et toutes les applications nécessitant une résistance mécanique à sec importante et une bonne moulabilité.
Le mat 631 C est utilisé pour renforcer les résines Polyester et anti-corrosion telles les Bisphénol A, vinylester et époxy.

Les avantages de ce mant sont:
— Drapabilité supérieure,
— Conformation rapide au moule,
— Imprégnation trés rapide,
— Mouillage rapide,
— Gain en résine, travail et poids,

PRIÉTÉS MÉCANIQUES DU STRATIFIÉ

Propriétés	Résultats	Unités	Méthode de test
% de verre	34.5	%	ISO R 1887
Resistance flexion (sec)	235	MPa	ISO R 178
Résistance flexion (humide)	250	MPa	ISO R 178
Module flexion (sec)	9.2	GPa	ISO R 178
Résistance traction (sec)	155	GPa	ISO R 527
Module traction (sec)	8.5	GPa	ISO R 527
Module traction (humide)	7.5	GPa	ISO R 527
Absorption d'eau aprés 7 jours	0.25	%	ISO R 62

Mat: 631 450 g/m², 4 plis

Résine standard: type A, BS 3532

Épaisseur du stratifié: 2,7 mm

Le stratifié a été polymérisé au préalable pendant 24 heures à 16 - 20°C et ensuite étuvé pendant 16 h. à 40°C.

EMBALLAGE

1. ROULEAUX

Le mat 631 C est bobiné sur des tubes de diamètre 10 cm. Les rouleaux sont emballés dans des boîtes en carton. Le poids net moyen des rouleaux est:

g/m²	102 cm	120	130	204
225	41	49	53	83
300	46	54	58	92
375	48	56	61	95
450	50	59	65	101
600	49	58	62	98

2. PALETTES

Dans le cas de rouleaux de largueur 120 à 204 cm, chaque palette comporte 9 cartons placés verticalement. Pour les rouleaux de largueur 102, chaque palette comporte 9 cartons placés verticalement plus 3 cartons placés horizontalement.
Les palettes et les cartons sont protégés par un film Polyéthylène thermorétractable.
Les palettes ainsi constituées ont les dimensions suivantes:

Longueur cm	Largeur cm	Hauteur cm	Volume m³	Poids net kg
110	110	155 225↓	1,87 2,70↓	515 830↓

Le poids net moyen des palettes est:

g/m²	102 cm	120	130	204
225	490 kg	440	475	745
300	550	485	525	830
375	570	500	550	860
450	600	535	580	910
600	605	520	560	880

IDENTIFICATION DU PRODUIT

Chaque carton porte une étiquette indiquant:
— Type de mat et code produit,
— Largeur du rouleau,
— Longueur du rouleau,
— Date de fabrication,
— Numéro de lot,
— Code de production,
— Poids.

Les chiffres, informations ou conseils, sont donnes uniquement comme indications-guide; VITROFIL S.p.A. n'accepte aucune responsabilité pour les résultats obtenus, ni pour leur utilisation en infraction à droits de brevets.

7.4 - Anexo D: Exemplo de dados adquiridos

t (s)	Termopar 1	Termopar 2
93,7	29,772	28,898
93,72	29,772	28,898
93,74	29,869	28,898
93,76	29,869	28,898
93,78	29,869	28,898
93,8	29,772	28,898
93,82	29,772	28,898
93,84	29,772	28,898
93,86	29,869	28,898
93,88	29,772	28,898
93,9	29,772	28,898
93,92	29,772	28,898
93,94	29,772	28,898
93,96	29,772	28,898
93,98	29,772	28,898

t (s)	Termopar 1	Termopar 2
98,24	28,606	28,898
98,26	28,606	28,898
98,28	28,606	28,898
98,3	28,606	28,898
98,32	28,606	28,898
98,34	28,606	28,898
98,36	28,606	28,898
98,38	28,606	28,898
98,4	28,606	28,898
98,42	28,606	28,898
98,44	28,606	28,995
98,46	28,606	28,995
98,48	28,606	28,995
98,5	28,606	29,092
98,52	28,606	29,092
98,54	28,606	29,092
98,56	28,606	29,189
98,58	28,606	29,189
98,6	28,606	29,189

Relatório de Projecto Final do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Monitorização do fluxo no processo de moldação por transferência de resina (RTM)

José Carlos Machado Cerqueira
06 / 02/ 2008

Aprovado em _____ / _____ / _____
Nota_____

José Carlos Machado Cerqueira
(Aluno de Projecto)

Professor Lucas Filipe Martins da Silva
(Presidente)

Professor João Francisco Silva
(Arguente)