

PRODUÇÃO DE COMPONENTES EM MATERIAIS COMPÓSITOS POR INFUSÃO DE RESINA

R. Franco¹, L. Sutherland², C. Guedes Soares³

Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval, Instituto Superior Técnico,
Lisboa, Portugal

¹rodrigo.franco@mar.ist.utl.pt, ²leigh@mar.ist.utl.pt, ³guedess@mar.ist.utl.pt

Resumo

A produção de navios em materiais compósitos a partir de técnicas em ‘molde fechado’ tem evoluído bastante por todo o mundo, especialmente a Infusão de Resina. Esta evolução é devida a redução de custos, regulações ambientais e à alta qualidade dos laminados fabricados a partir dessas técnicas. O processo de Infusão de Resina consiste essencialmente na utilização de pressão de vácuo para fazer escoar a resina por camadas de fabricados secos (colocados num molde e cobertos por um saco de vácuo) através de tubulações colocadas de uma forma criteriosa. Uma vez começada uma Infusão pouco se pode fazer para corrigir quaisquer erros; que normalmente levam à perda total da peça. Por esse motivo, a experiência é adquirida por um processo de tentativa e erro. Aqui, é apresentada uma revisão dos conhecimentos disponíveis, tentativas iniciais para utilização do processo para a produção de painéis teste e é descrito o ganho de experiência conseguida. Apresentam-se em detalhe testes de flexão, impacto e de queima realizados nos laminados fabricados, e finalmente conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

1 Introdução

Um material compósito consiste num material de base (a matriz – resina) e um reforço de determinado tipo (fibras – vidro, carbono ou aramida), para aumentar a força e rigidez da matriz. Quando os reforços de fibras são combinados com os sistemas de resina, podem então ser obtidas propriedades excepcionais (alta resistência e rigidez, facilidade de moldar placas complexas, alta resistência ao ambiente combinada com baixas densidades) o que torna o compósito resultante superior aos metais para muitas aplicações. As propriedades finais de um compósito não são apenas função das propriedades individuais dos materiais, mas também função do modo como os compósitos são produzidos. Existem vários processos para a produção de compósitos, no entanto, devido às novas regulamentações ambientais começa-se a optar por processos em ‘molde-fechado’, especialmente a Infusão de Resina. Esta nova opção não é apenas devida a essas regulamentações, pois

conseguem-se laminados com elevadíssima qualidade e excelentes propriedades mecânicas.

2 Especificação da Arte de Infusão de Resina

Para compreensão do processo de Infusão de Resina, a RINA (2006) elabora um documento bastante útil. A Infusão de Resina oferece a vantagem de se usarem fibras padrão e sistemas de resina levemente modificados para criar componentes com muito poucas imperfeições, com um conteúdo de fibra perto do ótimo e com um custo inferior ao de sistemas semelhantes. O processo permite um rápido fabrico do produto e pode ser efectuado e curado o laminado à temperatura ambiente ou até a baixas temperaturas. Este processo é também conhecido pela sua imprevisibilidade, principalmente no escoamento de resina, pela sua complexidade no posicionamento das linhas de alimentação de resina e de vácuo e também pela susceptibilidade de falha do sistema de vácuo.

A teoria básica da Infusão de Resina consiste em que quando algo é colocado sob vácuo e estão lacunas presentes, o fluido é conduzido a preencher essas lacunas e a saturar o componente. No caso dos compósitos, as lacunas são aberturas nas fibras secas, e a resina irá preenchê-las sendo 'puxada' pela fonte de vácuo.

Para se elaborar uma boa Infusão é necessário ter em conta vários aspectos de montagem e uma sequência lógica do processo.

O molde deve possuir determinadas características, como ser resistente para suportar a depressão criada no processo para a transfega da resina e ser de dimensões superiores às da peça que se pretende fabricar para que se seja possível fixar o saco de vácuo e as linhas de vácuo.

A Infusão de Resina pode ter sucesso com qualquer espessura total dos fabricados, ainda que como regra geral, quanto mais espesso o conjunto de fabricados, maior é o cuidado a ter para se realizar uma boa Infusão.

As resinas para Infusão têm de ser de viscosidade inferior às usadas nos métodos tradicionais, isto para se escoarem mais facilmente pelo conjunto de fabricados.

Os meios de fluxo têm como função direccionar a resina, proveniente dos recipientes de alimentação, para toda a peça. No topo dos fabricados, acima de um tecido removível ("peel ply"), pode ser colocada uma rede de distribuição, bastante permeável, que facilita a distribuição da resina por toda a peça. Existem vários tipos de tubulações usados na Infusão de Resina. O tubo de alimentação de resina ("Feed Pipe") é proveniente do recipiente da resina e ligado a outro componente, no molde, que permite o escoamento da resina para a peça. Esse outro componente, consiste no tubo de distribuição de resina ("Feed Distribution Pipe") e é geralmente perfurado para permitir essa distribuição.

O vácuo é o suporte principal de todo o sistema, e assim, este requer um planeamento cuidadoso para que se mantenha operacional do início ao fim da Infusão. É aconselhado o uso de bombas de vácuo especialmente desenhadas para este propósito. Outro componente bastante importante consiste no escape de resina

(“resin trap”). É um sistema vital de defesa que impede que o excesso de resina, que se escoar nos fabricados, entre no sistema de vácuo e especialmente na bomba de vácuo.

Uma vez os consumíveis e materiais a infundir aplicados no molde, o saco de vácuo pode ser colocado. O saco de vácuo tem de ser colocado com bastante cuidado para não ser danificado. Pode estar sujeito a pequenas perfurações que serão difíceis de ver mas que podem arruinar o processo. Aplica-se o vácuo lentamente até ao ponto em que o saco começa a fixar ao laminado. É absolutamente vital que não fiquem nenhuma ‘pontes’ na peça – isso criará um rio virtual de escoamento de resina. Esta operação deve ser realizada com os reguladores de escoamento de resina desligados. É extremamente importante não começar a infusão sem ter a certeza que a pressão de vácuo correcta tenha sido obtida, pois a infusão é um processo irreversível.

Tendo a certeza que estas operações anteriores foram completadas com sucesso, pode-se então ligar os reguladores de escoamento de resina, permitindo que a resina se dirija ao molde. Uma vez infundido o componente, a resina continuará a fazer o seu ciclo. Se a alimentação de resina estiver fechada nesta fase, o vácuo continuará a puxar resina da peça, essencialmente drenando e reduzindo a quantidade de resina junto às áreas de saída de resina.

A infusão é vista como uma “arte escura” devido à variedade do escoamento e à previsão dessa circulação. Devido a esse facto, um considerável planeamento e trabalho de testes pode ser feito para minimizar os riscos, e assegurar que certas margens possam ser incorporadas para problemas.

3 Componente Experimental

Neste capítulo dá-se início à produção de painéis teste pelo processo de Infusão de Resina e pelo Processo Manual (“Hand Lay-up”) e elaboram-se testes para determinar as propriedades dos laminados fabricados.

3.1 Preparação da Infusão de Resina

Antes de realmente se dar início ao processo, é necessária a montagem de todos os componentes necessários e previamente adquiridos. Os materiais encomendados são os apresentados na “Tabela I”.

Um molde de vidro com 8mm de espessura é montado sobre dois cavaletes, para ser possível uma visualização do escoamento inferior. Estando o molde pronto para serem colocados os materiais, é necessário cortar os materiais (fabricados, tecido removível, plástico perfurado, rede de distribuição e saco de vácuo, dispostos com esta sequência) com as dimensões correctas para as peças que se pretende fabricar. Estando todos os materiais devidamente cortados, podem então ser colocados sobre o molde. De seguida, pode ser colocada a massa vedante nos extremos do vidro. Esta massa vedante permite a fixação ao molde e posteriormente ao saco de vácuo.

<ul style="list-style-type: none"> - Lata de 25 Kg de resina isoftálica Crystic 701PA; - 1L de catalisador peróxido de metiletilcetona; - Desmoldante Z 5.0 (Slipcoat System); - Bomba de vácuo de 9m³/h; - Manómetro; - Mangueira transparente reforçada Heliflex com 16 mm de diâmetro; - Tubo em espiral para distribuição da resina; - Massa vedante; 	<ul style="list-style-type: none"> - Fibras de vidro unidireccionais de 600 g/m²; - Fibras de vidro +/-45° de 468 g/m²; - Fibras de vidro 0°/90° de 710 g/m²; - Saco de vácuo; - Tecido removível; - Plástico perfurado; - Rede de distribuição; - Feltro; - Fita isolante; - T's para ligação das mangueiras;
--	---

Tabela 1 – Materiais Encomendados

Começa-se então a colocar os dispositivos de vácuo e resina que irão ficar dentro do saco de vácuo, que consistem nas espirais condutoras de vácuo e resina. Nessas espirais, são adaptados os T's (pequenos tubos de plástico em forma de T), que servirão de ligação às mangueiras de vácuo e resina provenientes da zona exterior ao molde. No extremo onde está colocada a espiral de vácuo, são colocadas duas tiras de tecido removível sobreposto com feltro, funcionando como travamento da resina quando chega a essa zona, mas também como passagem do ar quando o vácuo é aplicado.

A partir daqui pode proceder-se à ligação das mangueiras de vácuo e resina aos T's e posteriormente à colocação do saco de vácuo. Em todas as arestas do molde são necessárias dobras, no saco de vácuo, que darão 'folga', para garantir que quando se aplicar o vácuo o saco não se rasgue devido a esticamentos forçados. Essas dobras são feitas através de pequenos excertos de massa vedante. É muito importante que o saco de vácuo se ajuste ao tamanho do molde e que não existam zonas onde possa faltar o vácuo para ajustar ao molde. Estando o saco de vácuo correctamente colocado, é necessária verificação de todos os pormenores para garantir que realmente não existem aberturas. Estando a mangueira de alimentação de resina fechada e ligando a bomba de vácuo, esse processo de verificação é facilitado pelo som emitido da passagem de ar nessas zonas críticas. Mas antes disso é necessário o arranjo do escape de resina e sua ligação à bomba de vácuo. Construiu-se um escape de resina constituído por um frasco de vidro com uma tampa de madeira resistente com dois furos para ligação das mangueiras.

No outro extremo da montagem encontra-se a alimentação de resina. A mangueira de alimentação de resina direcciona-se a um balde onde está a resina, estando essa devidamente fixa a esse balde.

3.2 Experimentação da Infusão de Resina

Nesta fase, pretende-se a realização de várias infusões, utilizando diferentes fabricados e diferentes números de camadas desses fabricados, por forma a verificar

a evolução do escoamento de resina em diferentes condições. Além disso, com o decorrer das experiências, pretende-se também melhorar o método consoante os entraves observados.

3.2.1 Verificação da Utilidade da Rede de Distribuição na Infusão de Resina

A primeira infusão foi elaborada com tecidos +/-45°. Colocaram-se duas faixas separadas, cada uma com três camadas de fabricados. Uma das faixas possuía além dos fabricados, tecido removível, plástico perfurado e a rede de distribuição. Com esta experiência pretendia-se verificar a diferença do comportamento da resina ao percorrer os tecidos com os dispositivos auxiliares de distribuição ou sem eles. Considerou-se que a uma pressão de vácuo de 0.8bar se poderia praticar a Infusão.

Decidiu-se colocar uma quantidade de resina igual ao peso dos tecidos, com um acréscimo de 25% devido a perdas e neste caso com adição de catalisador a 4% (em que o tempo de gel da resina é de 25 minutos).

É notável a diferença de velocidade da resina entre as duas configurações dos tecidos. No componente com aplicação da rede de distribuição, a resina percorre com uma velocidade bastante superior, chegando inclusive ao final dos fabricados com um tempo de infusão de 15 minutos, enquanto que no outro caso a resina ainda se encontrava bastante atrasada. Passou-se a pressão de vácuo para cerca de 0.55bar e fechou-se a alimentação de resina (pois a resina já apresentava sinais de gelificação no balde). As peças são deixadas a curar com essa pressão de vácuo e foi decidido que apenas se desliga a bomba de vácuo quando se considerarem as peças curadas.

Esta experiência foi muito importante para verificar que realmente os componentes adicionados aos tecidos realmente são indispensáveis para a infusão em camada única (“single-skin”). As peças obtidas mostram-se na “*Figura 1*” e “*Figura 2*”.



Figura 1 – Placa fabricada com rede de distribuição



Figura 2 – Placa fabricada sem rede de distribuição

3.2.2 1ª Tentativa com Unidireccional (5 camadas)

Nesta infusão utilizaram-se 5 camadas de tecidos unidireccionais com 600g/m², novamente com a adição de catalisador a 4%.

Neste caso conseguiu-se atingir uma pressão de vácuo a rondar os 0.9bar. Iniciou-se então a infusão e verificou-se que o escoamento da resina era bastante rápido pois aos 9 minutos de infusão a resina já tinha completado a parte superior do laminado. No entanto, na parte inferior o escoamento estava atrasado cerca de 10cm. O escoamento inferior apenas aos 25 minutos tinha finalizado a sua impregnação. Nesse momento cortou-se a alimentação de resina e passou-se a pressão de vácuo para os 0.55bar. Depois de retirar todos os consumíveis, passadas 2 horas, verificou-se que a peça obtida tinha uma óptima qualidade de superfície.

3.2.3 Repetição da 1ª Tentativa (Verificação da estabilidade do processo)

Esta infusão é em tudo semelhante à anterior e serviu apenas para, além de ganhar experiência com o método, realmente identificar se existiriam diferenças aquando da realização de duas infusões em tudo semelhantes mas realizadas em momentos diferentes. A infusão decorreu de forma semelhante, com um tempo de impregnação do escoamento superior de 9 minutos e do escoamento inferior de 24 minutos.

3.2.4 1ª Tentativa com +/-45° (5 camadas)

Nesta infusão aplicaram-se 5 camadas de tecidos +/-45° de 468g/m² e efectuou-se monitorização do escoamento, utilizando-se novamente catalisador a 4%.

Um pormenor teste desta infusão reside no facto de se tentar aproximar a infusão o mais possível do praticado na Indústria. Para isso, as camadas de tecido removível e plástico perfurado foram divididas em duas metades, ligando-as através de fita-cola. Quando se diz que se pretende aproximar do praticado na indústria, quer-se dizer que quando se fabricam placas de maiores dimensões, com certeza que se terá de recorrer à junção de determinados componentes para conseguir cobrir todos os fabricados.

O escoamento inferior percorria os fabricados com cerca de 10cm de atraso e foi evidente uma maior dificuldade da resina impregnar os tecidos na sua fase final. Aos 30 minutos de infusão fechou-se a alimentação de resina e deixou-se o laminado sujeito a uma pressão de vácuo de 0.8bar esperando a completa saturação dos tecidos. Aos 35 minutos, verificando que já não havia movimentação de fluido na zona da lacuna, passou-se a pressão de vácuo para os 0.55bar. Verificou-se então que a lacuna existente no laminado era precisamente no local onde tinha sido colocado um excerto de fita-cola na zona mais afastada da alimentação de resina. Portanto verifica-se que esse obstáculo imposto tem influência na progressão do escoamento. Desligou-se a bomba passadas 2 horas do início da infusão e a peça estava em boas condições (devidamente curada) com a excepção do defeito devido ao obstáculo imposto, como é visível na “*Figura 3*”.

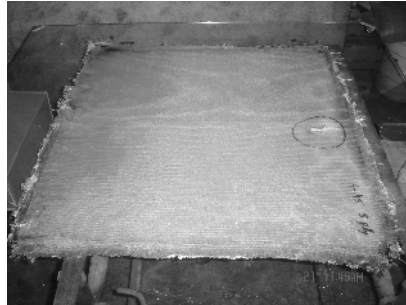


Figura 3 – Placa obtida com detalhe de não impregnação

3.2.5 1ª Tentativa com 0°/90° (5 camadas)

Neste caso fabricou-se uma placa com 5 camadas de fabricados 0°/90° de 710g/m², nas mesmas condições. Verificou-se novamente um atraso do escoamento inferior de 10cm em relação ao escoamento superior. Esse escoamento inferior impregnou completamente os tecidos passados 20 minutos do início da infusão. A peça obtida estava em perfeitas condições e com uma excelente qualidade de superfície passadas 2 horas do início da infusão.

3.2.6 2ª Tentativa com 0°/90° (10 camadas)

A resina tem bastante dificuldade em impregnar os tecidos inferiores nas zonas mais afastadas da alimentação de resina. Neste caso o escoamento inferior apresentava com um atraso de 20 cm. O escoamento superior apenas se finalizou aos 23 minutos, e por esse motivo houve o receio de a resina começar a gelificar não estando a parte inferior completa. Aos 35 minutos fechou-se a alimentação de resina e passou-se a pressão de vácuo para os 0.55bar. O escoamento inferior não chegou ao final dos fabricados. A primeira conclusão a que se chegou foi que o tempo de gel da resina poderia ser limitado para a peça que estava a fabricar. Como o tempo de gel da resina, com uma adição de 4% de catalisador seria de 25 minutos, este tempo podia implicar que a resina começasse a gelificar sem que a peça estivesse totalmente impregnada. Na infusão seguinte tenta-se colmatar esse erro, para verificar se é devido a esse facto o problema encontrado.

3.2.7 2ª Tentativa com +/-45° (10 camadas com adição de catalisador a 3%)

Neste caso tenta-se também infundir uma placa com 10 camadas, tentando colmatar o problema da infusão anterior aplicando catalisador a 3%. Foram utilizados os tecidos +/-45° e outra variante desta infusão é o facto de apenas se utilizar um excedente de resina a rondar os 15%, pois nas infusões anteriores verificou-se que o desperdício de resina era bastante.

Quando o escoamento superior finalizou os tecidos superiores, o escoamento inferior apresentava apenas 20cm de atraso. Outro estudo incorporado nesta infusão

consiste na aplicação de metades de tecido removível juntas por excertos de fita-cola mas de muito menor dimensão do que os excertos utilizados no outro caso, e verificou-se que não tiveram influência na infusão. Aos 40 minutos começou a entrar resina para a mangueira de vácuo direccionada ao escape de resina, e os tecidos inferiores ainda não estavam completamente impregnados. Passada 1 hora do início da infusão passou-se a pressão de vácuo para os 0.55bar pois verificou-se que a resina já não conseguia preencher essa lacuna. Aqui, o problema não terá sido do tempo de gel da resina pois essa continuava a escoar para o escape de resina. Na tentativa de perceber o problema, foram postas várias hipóteses. O problema poderia ocorrer devido à posição das tiras de travamento da resina, pois a não impregnação dos tecidos ocorria sensivelmente na zona central do laminado, o que poderia indicar que nessa zona central a resina não era 'puxada' com tanta intensidade (pois nessa zona o saco de vácuo está completamente 'colado' ao molde). Outra causa do problema pode ser devido à rede de distribuição que é um pouco maior que os tecidos e a resina percorre os seus extremos direccionando-se às tiras de travamento, optando por um caminho mais fácil.

3.2.8 3ª Tentativa com +/-45° (10 camadas e com distribuição central de resina)

Ainda na tentativa de obter um laminado completo com 10 camadas de fabricados, utilizaram-se as mesmas quantidades e tipo de materiais da infusão anterior. No entanto, neste caso utilizaram-se duas alimentações de resina, em que a primeira se situa exactamente no mesmo sítio dos casos anteriores, mas existe uma segunda espiral condutora de resina a meio da peça, paralela à anterior. Portanto, é ligada uma segunda mangueira de alimentação de resina na parte lateral do molde que faz a alimentação para essa segunda espiral. A "*Figura 4*" ilustra essa configuração. O objectivo consistia em impor que a resina quando chegasse à segunda espiral (escoamento inferior) tivesse uma nova alimentação, fechando a primeira, tendo assim mais facilidade de se escoar pelo resto dos fabricados.



Figura 4 – Nova configuração

Quando o escoamento inferior atingiu a 2ª espiral o escoamento superior já tinha percorrido toda a parte superior dos tecidos. Quando se ligou a 2ª espiral, o escoamento inferior aumentou consideravelmente a sua velocidade, mas verificou-se também que teria aparecido alguma entrada de ar, pois a primeira parte do laminado começou a perder pressão de vácuo. A resina teve novamente bastantes dificuldades em impregnar a zona final dos fabricados, visto que apenas preencheu totalmente os

tecidos passados 45 minutos do início da infusão. A causa da perda de vácuo na primeira metade da peça poderá ter sido devida a alguma fissura no saco de vácuo mas também à ligação da 2ª mangueira de alimentação de resina com a 2ª espiral, pois nessa zona verificou-se que a resina destruiu a massa vedante, que fixava a mangueira ao molde, e assim essa mangueira não tinha um suporte adequado, podendo gerar entradas de ar.

A dificuldade no preenchimento final dos fabricados, pensa-se novamente que poderá ser devida às posições das tiras de travagem que facilitam a circulação do fluido nas zonas laterais da peça mas não o fazem correctamente na zona central. Pensa-se que este problema pode ser resolvido com a aplicação de uma terceira ‘tira’ na zona central da espiral condutora de vácuo.

Verificou-se o que se previa, um excesso de resina na zona inicial da peça, mas também se verificou outro facto importante – a impressão na zona central da peça da 2ª espiral condutora de resina. Esta impressão no laminado pode não ser um problema se não se desejar uma superfície perfeita como a do outro lado do laminado, no entanto, se desejar os dois lados do laminado com boa qualidade de superfície, a espiral condutora de resina colocada a meio de uma peça pode ser colocada numa dobra feita no saco de vácuo que impede o contacto da espiral com os fabricados mas permite a drenagem da resina.

3.3 *Fabrico de Placas pelo Processo Manual*

Pretende-se fabricar, manualmente, placas semelhantes às placas fabricadas por Infusão de Resina. No entanto, por limitação de material, apenas foram fabricados os seguintes painéis teste: unidireccional com 5 camadas, $\pm 45^\circ$ com 5 camadas e $0^\circ/90^\circ$ com 5 camadas.

As placas foram fabricadas colocando as camadas de fabricados uma por uma, impregnando cada uma com resina até ficar com uma aspecto translúcido, com o auxílio de um pincel e de um rolo.

Devido aos vapores criados pela laminagem, não foi possível o fabrico de mais painéis teste por este processo.

4 Testes para determinar as propriedades dos laminados

4.1 *Testes de Flexão*

A elaboração destes testes foi baseada numa Norma denominada por “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials [Metric]” (ASTM, 1986). Foi utilizado o método 1, descrito nessa norma, que consiste num provete simplesmente apoiado em dois pontos e carregado no ponto central (“Three-point Loading”).

Os laminados, fabricados, sujeitos aos testes de flexão foram os seguintes e com as respectivas denominações: $0^\circ/90^\circ$ com 10 camadas (**C**) e $0^\circ/90^\circ$ com 5 camadas (**B**),

fabricados por Infusão de Resina, e 0°/90° com 5 camadas (**BH**), fabricados por “Hand Lay-up”. Os provetes C, B e BH possuíam 20mm de largura e espessuras médias de 6.79, 3.51 e 4.26mm, respectivamente. Optou-se por uma distância entre os suportes de 120mm para os provetes **C** e de 70mm para os provetes **B** e **BH**.

Na “**Tabela 2**” apresentam-se os resultados obtidos para os provetes sujeitos aos testes de flexão e também se apresentam as distribuições desses valores para os provetes **B** e **BH**, na “**Figura 5**”, para comparação.

Seria de esperar que os provetes **B** e **C**, apresentassem resistências semelhantes, no entanto, os provetes **C** apresentam maiores resistências. Isto acontece porque, nesses provetes, na camada onde é aplicado o actuador hidráulico (onde acontece a força de compressão máxima e a consequente fractura do provete), a orientação das fibras é de 0°, enquanto que nos provetes **B** a orientação das fibras nessa camada é de 90°, pois foram cortados do laminado de forma diferente. A orientação das fibras a 0° corresponde a uma maior resistência do provete.

As resistências máximas dos provetes **BH** são, na sua maioria, inferiores às dos provetes **B**, e as rigidezes também são maiores para os provetes **B**. O valor inferior da resistência para o provete **BH4** pode ser devido a uma descontinuidade no laminado. Essa descontinuidade pode ser causada essencialmente por zonas não impregnadas de resina ou por espaços criados entre as fibras aquando da pressão realizada com o rolo para impregnar a resina. Com excepção do provete **BH1**, todos os outros provetes **BH** apresentam deflexões superiores às dos provetes **B**, o que demonstra que estes não têm muita resistência à flexão. Verifica-se que os provetes **C** apresentam maiores extensões devido à orientação das fibras na camada superior, os provetes aguentam mais tempo sem que se fracturem. Os provetes fabricados por Infusão de Resina comportam-se de melhor forma, o que mostra o quão é vantajoso o processo de Infusão de Resina neste aspecto.

Provetes	Resistência máxima [Mpa]	Extensões máximas [%]	Rigidez [Gpa]
B1	347,09	2,33	13,61
B2	407,79	1,38	14,30
B3	367,59	2,39	15,91
B4	461,88	2,18	16,57
B5	302,29	1,56	15,50
B6	394,65	2,74	14,53
Média	380,21	2,10	15,07
Coefficiente de Variação	0,14	0,25	0,07
C1	487,36	2,79	17,82
C2	467,46	0,99	16,49
C3	505,13	2,00	16,80
C4	516,47	1,97	18,23
C5	477,60	2,18	18,38
C6	497,84	2,89	17,00
Média	400,96	2,14	17,45
Coefficiente de Variação	0,04	0,32	0,05
BH1	352,74	2,14	11,91
BH2	343,02	3,24	11,36
BH3	325,64	3,00	9,75
BH4	288,39	3,67	9,77
BH5	316,80	2,50	10,74
BH6	334,84	3,56	9,50
Média	326,91	3,02	10,51
Coefficiente de Variação	0,07	0,20	0,09

Tabela 2 – Resultados dos Testes de Flexão

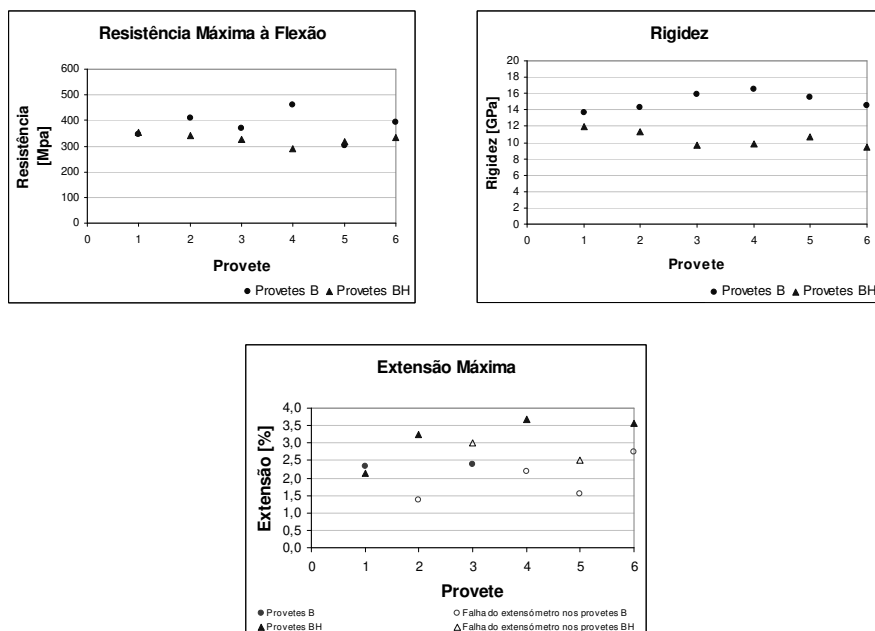


Figura 5 – Resistências, Rigidezes e Extensões dos provetes B e BH

4.2 Testes de Impacto

Visto o impacto ser um dos problemas mais comuns para os materiais compósitos, achou-se interessante realizar alguns testes de impacto para verificar quais as respostas dos laminados fabricados por Infusão de Resina e pelo processo manual.

Para a realização destes testes foi utilizada uma máquina de impacto IFWIT (“Instrumented Falling Weight Impact Tester”) (Sutherland L. S., Guedes Soares C., 2005), que funciona através da queda de um peso. O impacto controlado e repetido é conseguido com a queda de um ponteiro, acoplado a um peso, sobre um provete, de um forma definida e a uma dada velocidade de impacto. Durante o impacto, a força resistiva exercida pelo provete no ponteiro de impacto é medida em função do tempo e armazenada para futura análise do resultado. A nomenclatura dada aos provetes foi feita, novamente, através de letras e números: **A** – unidireccional com 5 camadas; **B** – +/-45° com 5 camadas; **C** – 0°/90° com 5 camadas; **D** – +/-45° com 10 camadas; todos estes fabricados por Infusão de Resina; **AH** – unidireccional com 5 camadas; **BH** – +/-45° com 5 camadas; **CH** – 0°/90° com 5 camadas; fabricados por “Hand Lay-up”. Os provetes A, B, C, AH, BH e CH possuem espessuras médias de 2.58, 2.16, 4.00, 3.39, 2.75 e 4.53mm, respectivamente.

Os resultados obtidos apresentam-se na “Tabela 3”. Desses resultados obtidos, mostram-se, a título de exemplo, os resultados fotográficos e gráficos (“Figura 6” à “Figura 9”) para os provetes **C** e **CH**, realizando uma comparação entre eles. Apenas

se aplicou uma energia de 100J no provete C5 para tentar uma perfuração, o que foi conseguido.

Provete	Pico da Força				Final			Velocidade nula		
	ForçaMax	Deflexão	Energia	Tempo	Deflexão	Energia	Tempo	DeflexãoMax	Energia	Tempo
-	[KN]	[mm]	[J]	[ms]	[mm]	[J]	[ms]	[mm]	[J]	[ms]
C1	8,48	8,014	29,94	5	1,665	11,38	10,2	8,031	30,08	5,2
C2	13,18	10,379	56,78	3,3	3,767	48,68	10,1	11,949	76,12	5,0
C3	4,24	5,017	10,22	5	1,901	5,53	10,8	5,120	10,66	5,8
C4	12,31	10,520	50,37	4,8	3,190	26,86	9,7	10,555	50,78	5,1
C5	14,65	11,775	69,96	3,2	6,647	85,72	12,5	13,943	97,20	5,6
D1	8,40	8,172	30,71	4,8	2,486	14,83	10,0	8,255	31,41	5,3
D2	10,11	10,778	50,91	4,9	3,882	31,36	10,5	10,906	52,19	5,4
D3	4,06	5,445	10,31	5,8	1,959	5,53	11,6	5,475	10,44	6,2
D4	9,63	12,761	64,03	4,1	6,126	68,04	15,0	15,031	79,98	6,9
A2	2,90	8,346	9,21	3,9	3,860	6,92	9,2	8,764	10,39	4,8
A3	1,92	6,490	5,39	4,7	2,613	3,19	9,5	6,528	5,46	5,0
A4	3,59	9,828	14,90	3	5,211	14,73	9,4	11,522	20,48	4,8
B2	1,89	7,617	5,32	5,3	2,852	2,63	10,7	7,681	5,44	5,8
B3	2,78	10,179	10,12	5,1	4,156	5,51	10,1	10,244	10,30	5,4
B4	4,31	11,852	19,28	4,2	3,640	9,86	9,0	11,978	19,82	4,6
AH1	1,72	5,922	4,93	4,2	2,332	3,08	9,5	6,092	5,22	5,0
AH2	2,59	8,425	9,59	4,5	3,423	5,95	9,3	8,499	9,78	5,0
AH3	3,64	10,494	18,32	3,7	4,121	13,88	9,2	10,987	20,02	4,6
AH4	3,79	11,201	19,23	2,8	7,444	27,24	14,1	15,014	30,07	6,2
BH1	1,83	7,081	5,04	5	2,797	2,64	10,3	7,196	5,24	5,6
BH2	2,89	9,089	9,92	4,5	3,453	5,04	9,3	9,212	10,27	5,0
BH3	4,39	11,957	19,55	4,2	4,424	10,47	8,8	12,120	20,26	4,7
BH4	5,46	13,343	27,83	3,7	4,983	16,36	8,3	13,738	29,98	4,4
CH1	3,85	5,283	10,33	5,2	2,300	6,42	11,4	5,425	10,87	6,1
CH2	8,01	9,378	31,59	5,3	3,827	17,52	10,8	9,471	32,33	5,8
CH3	10,67	10,450	50,20	4,8	3,502	27,80	10,1	10,547	51,24	5,3
CH4	13,21	12,949	80,15	4,7	4,722	51,28	10,1	13,056	81,55	5,2

Tabela 3 – Resultados dos testes de impacto

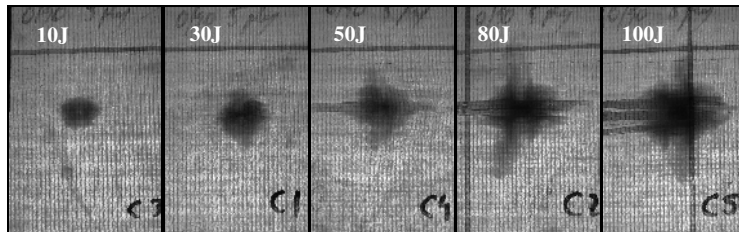


Figura 6 – Danos provocados por impacto nos provetes C

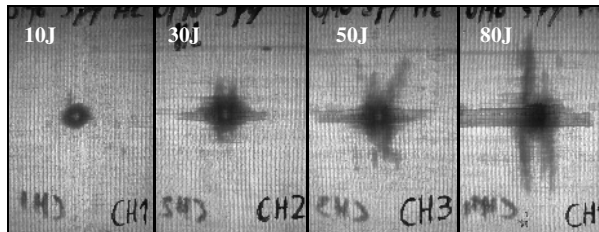


Figura 7 – Danos provocados por impacto nos provetes CH

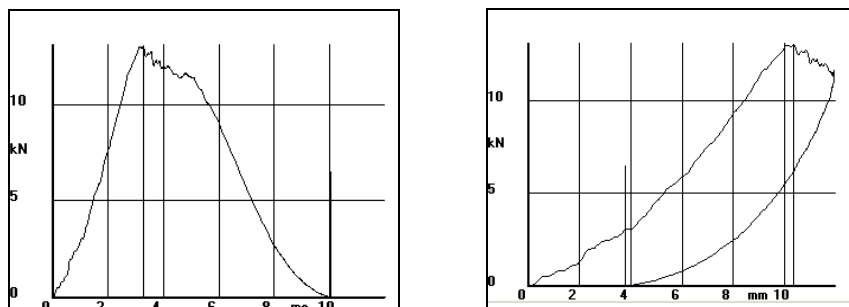


Figura 8 – Gráficos Força x Tempo e Força x Deflexão para o provete C2

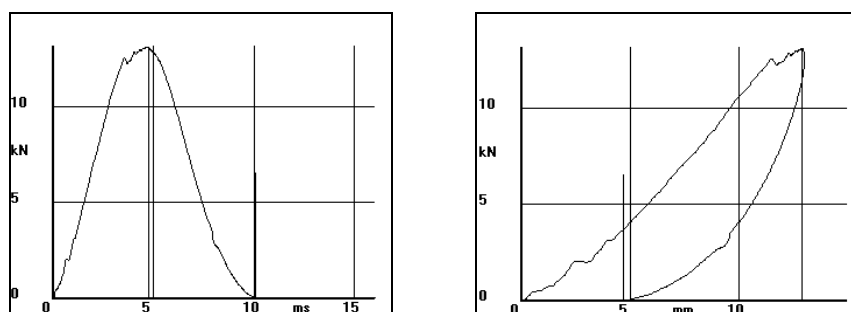


Figura 9 – Gráficos Força x Tempo e Força x Deflexão para o provete CH4

É evidente a fractura do provete C2 com uma energia aplicada de 80J. No gráfico de Força x Tempo (“Figura 8”), a força atinge um valor máximo e depois é notável uma quebra irregular, o que significa que o provete partiu, também demonstrado no gráfico de Força x Deflexão. Em relação aos provetes do tipo CH verifica-se que, na energia máxima aplicada (80J), o provete CH4 apresenta menor fractura que o provete C2, como se verifica pela “Figura 9”. Aliás, para qualquer energia aplicada, os provetes fabricados por Infusão de Resina apresentam sempre maiores danos. Isto acontece também para os outros provetes testados. Os laminados fabricados por “Hand Lay-up” são mais resistentes ao impacto. Isto pode ser devido ao acréscimo de espessura e ao superior conteúdo de resina.

4.3 Verificação dos conteúdos de fibra dos laminados

Uma maneira prática de verificar o FVF de um laminado consiste em fazer uma queima de uma porção desse laminado, ou seja, levar esse material a temperaturas elevadas de modo que a resina se extinga e se fique apenas com as fibras presentes nessa porção. Foi isso que se fez, utilizando uma norma conhecida por “Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins – D2584-68” (ASTM, 1985).

Foram cortadas 3 amostras de cada tipo de laminado com as dimensões de 2.5cmx2.5cm, com as respectivas denominações: unidireccional com 5 camadas (A

e *AH*), +/-45 com 5 camadas (*B* e *BH*), 0°/90° com 5 camadas (*C* e *CH*), fabricados por Infusão de Resina e “Hand Lay-up”, respectivamente.

Obtendo os diversos valores das pesagens depois do teste de queima, é possível calcular os conteúdos de resina perdidos pelas amostras (“Ignition Loss”), representando esses valores os conteúdos de resina presentes nas amostras, o resto da percentagem será sensivelmente correspondente ao conteúdo de fibra presente nessas mesmas amostras, pelo que os conteúdos de fibra serão os presentes na “Tabela 4”.

Amostras	Conteúdo de fibra (FVF) [%]	Amostras	Conteúdo de fibra (FVF) [%]
A1	68.33	AH1	55.25
A2	68.97	AH2	56.93
A3	68.47	AH3	58.18
Média	68.59	Média	56.79
B1	60.69	BH1	55.27
B2	61.92	BH2	52.63
B3	63.01	BH3	54.03
Média	61.87	Média	53.98
C1	66.81	CH1	61.28
C2	67.16	CH2	61.88
C3	66.02	CH3	60.07
Média	66.66	Média	61.08

Tabela 4 – Conteúdos de fibra das amostras queimadas

Como se verifica os conteúdos de fibra nas amostras fabricadas por Infusão de Resina são elevados e superiores aos das fabricadas manualmente. Isto indica que os laminados fabricados por “Hand Lay-up” têm uma maior quantidade de resina e consequentemente, menor conteúdo de fibra em percentagem. Assim, no que diz respeito ao conteúdo de fibra de um laminado, o processo de Infusão de Resina apresenta vantagens em relação aos processos tradicionais.

5 Conclusões

O processo de Infusão de Resina foi investigado e descrito.

A aprendizagem da técnica de Infusão de Resina foi conseguida através da prática experimental.

A Infusão de Resina requer uma montagem dos componentes bastante cuidada, e é benéfica para grandes componentes ou produção em série.

Foram conseguidas observações importantes ao longo do fabrico dos painéis teste:

- A rede de distribuição é indispensável para a infusão de componentes em “single-skin”;
- Obstáculos nos fabricados, que não sejam colocados de forma correcta, podem impedir o escoamento da resina;
- As tiras de travamento da resina podem ser colocadas por forma a melhorar o escoamento da resina;

- A colocação de uma 2ª linha de alimentação de resina pode funcionar, isto se efectuada correctamente;

Os testes de Flexão mostraram que os provetes fabricados por Infusão de Resina têm melhor qualidade que os provetes fabricados pelo processo manual.

No entanto, os testes de impacto indicam que os laminados infundidos são mais frágeis que os fabricado manualmente.

Também foi verificado que os laminados fabricados por Infusão de Resina apresentam um superior conteúdo de fibra.

Realizados os dois processos, é notável a diferença do ambiente da sala de trabalhos.

Pode-se assim concluir que o processo de Infusão de Resina, além de ser um processo 'amigo' do ambiente, é um processo bastante atractivo no que diz respeito à maioria das propriedades dos laminados, obtidos por esse processo.

O processo de Infusão de Resina poderá ser melhorado para a obtenção de peças com maiores espessuras e até melhor qualidade. Nesse desenvolvimento da técnica poderão ser realizadas novas experiências, tais como: inclusão de perfis, fabrico em sanduiche ("sandwich"), fabrico de componentes com formas mais complexas, etc.

Pode também, no futuro, ser feito um aprofundamento no estudo das respostas ao Impacto dos provetes fabricados por Infusão de Resina.

6 Referências

Registro Italiano Navale (RINA), 2006, 'Infusion as a Composite Construction Technique for Pleasure Vessels: Guidelines', RINA S.p.A, Genova.

ASTM, 1986, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials [Metric]", D790M.

ASTM, 1985a, "Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins", D2584.

Sutherland L. S., Guedes Soares C., 2005, "Impact on low fibre-volume, glass /polyester rectangular plates", Composite Structures, 68, pp 13-22.