

Utilização de materiais poliméricos e compósitos na produção de caiaques

U.C. de Materiais de Construção Mecânica II



Supervisor:

Eng. António Torres Marques

Elementos do G11, Turma 3M12:

André Duarte Ferreira

Carlos Xavier Gonçalves

Vasco Daniel Branco

Índice

1. Sumário.....	6
1.1. Abstract	6
2. Introdução.....	7
3.1. Evolução dos caiaques e materiais usados na sua construção	8
3.2. Requisitos para as diferentes modalidades e componentes do caiaque	9
3.3. Identificação de materiais passíveis de serem usados como solução construtiva.....	12
3.4. Características dos materiais poliméricos e compósitos de matriz polimérica.	14
3.4.1. Polietileno	16
3.4.1.1. O Polietileno de Baixa Densidade (LDPE).....	16
3.4.1.2. O Polietileno de Alta Densidade (HDPE).....	16
3.4.2. Compósito laminar com resina de epóxico	17
3.4.2.1. Resina de Epóxico.....	18
3.4.2.2. Gelcoat	19
3.4.2.3. Espuma de PVC	20
3.4.2.4. Fibra de carbono.....	21
3.4.2.5. Fibra de vidro	21
3.4.2.6. Kevlar®.....	22
3.4.2.7. Cortiça.....	22
3.5. Processos de fabrico.....	23
3.5.1. Rotomoldação	23
3.5.2. Processamento de laminados compósitos	24
3.5.2.1. Processo desenvolvido pela Nelo Mar Kayaks	25
3.6. Influência dos materiais no rendimento dos atletas	32
7. Conclusões.....	34
8. Bibliografia.....	35
10. Anexos.....	36

Lista de Figuras

Fig. 1 - Produção artesanal de caiaques pelos esquimós há mais de 3000 anos. (National Maritime Museum, Greenwich, London).....	8
Fig. 2 - Embarcação K1 – compósito (Nelo Mar Kayaks).....	10
Fig. 3 - Embarcação K4 – compósito (Nelo Mar Kayaks).....	10
Fig. 4 - Slalom em águas bravas – compósito (Nelo Mar Kayaks).....	11
Fig. 5 - Caiaque de mar – compósito (Nelo Mar Kayaks).....	11
Fig. 6 - Caiaque de madeira (Fyneboatkits).	13
Fig. 7 - Caiaque insuflável em PVC (Decathlon).....	13
Fig. 8 - Kayak de turismo em Polietileno (Elie Kayaks).....	13
Fig. 9 - Cadeias abertas no polietileno (esq.) e ligações cruzadas aumentam rigidez (dta.) (Wikipédia).	15
Fig. 10 - Elastómero no estado natural (A) e o mesmo elastómero sob tensão (B) (Wikipédia).....	15
Fig. 11 - Camadas sobrepostas do casco em corte de um caiaque Nelo (Dias, Pedro Ferreira. Dissertação, Análise Estrutural de um caiaque de Competição, 2011).	18
Fig. 12- Estrutura química da resina de epóxico (Wikipédia).....	19
Fig. 13 - Gelcoat à base de poliéster (Produtos-Mercado-livre).	20
Fig. 14 - Espuma de PVC (Easycomposites).....	20
Fig. 15 - Fibras de carbono dispostas perpendicularmente umas às outras(Produtos Alibaba).	21
Fig. 16 - Fibra de vidro (Dremel).	22
Fig. 17 - Kevlar® (Wisegeek).	22
Fig. 18 - Cortiça (Grupo Amorim).	23
Fig. 19 - Representação dos diferentes passos no processo de rotomoldação (Basita).	24
Fig. 20 – Exterior (esq.) e interior (dta.) da fábrica Nelo Mar Kayaks.	26
Fig. 21 - Modelo 3D criado com software apropriado (Nelo Mar Kayaks).	26
Fig. 22 - Maquinagem de um prototipo (esq.) e verificação dimensional (dta.).	27
Fig. 23 - Molde fechado (esq.) e aberto (dta.) em fibra de vidro.	27
Fig. 24 - Pintura em estufa apropriada.	28
Fig. 25 - Bobines de fibra (esq.) e impregnação manual (dta.).	28
Fig. 26 - Tiras de carbono unidirecional (esq.) e espuma de PVC (dta.).	29

Fig. 27 - Aplicação de vacuo em estufa para cura da resina.	29
Fig. 28 - Representação de todos os passos de laminagem descritos até agora (RAMPF).....	30
Fig. 29 - Corte de rebarbas no plano de apartação (esq.) e polimento final (dta.). .	30
Fig. 30 - Colagem de perfis metálicos (esq.) e colocação do banco (dta.).....	30
Fig. 31 - Casco danificado (esq.) e reparação na proa (dta.).....	31
Fig. 32 - Desempenho dos atletas olímpicos de K1 1000m (1948-2008) e de K1 500m (1976-2008) (Michael, Smith & Rooney, 2009).	32

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Especificações para embarcações de velocidades (Canoe Sprint Competition Rules. ICF, 2009).....	9
Tabela 2 - Caraterísticas gerais do polietileno (CES – Edupack).	17
Tabela 3 - Caraterísticas gerais da resina de epóxido (CES – Edupack).....	19
Tabela 4 – Propriedades da resina de epóxido não reforçada e quando reforçada com fibra de vidro (Calister, William. Ciência e Engenharia dos Materiais).	21
Tabela 5 – Valores típicos de propriedades das fibras quando associadas a uma matriz de resina de epóxido (Calister, William. Ciência e Engenharia dos Materiais)..	23
Tabela 6 – Vantagens e desvantagens do processo (RAMPF).	25

1. Sumário

Neste trabalho são apresentados os diferentes materiais poliméricos e de matriz polimérica utilizados na construção de caiaques tendo em conta as solicitações a que estas embarcações estão sujeitas. O principal objetivo da realização do mesmo foi o aprofundamento do conhecimento dos membros do grupo sobre polímeros. O trabalho inclui também uma visita à empresa Nelo Mar Kayaks que detém o título de produtora dos melhores caiaques do mundo utilizados por atletas olímpicos.

1.1. Abstract

This work presents different polymeric and composite materials used for kayaks manufacturing regarding their working conditions. The primary objective for this study was to improve the student's knowledge about the subject in analysis. It is also included information about a studying visit to Nelo Mar Kayaks which produces most of the kayaks used during the Olympics.

2. Introdução

Se para uns os caiaques são instrumento de lazer, turismo e aventura, para os atletas de alta competição funcionam como equipamento fundamental na obtenção dos melhores resultados.

A correta escolha dos materiais e processos de fabrico destas embarcações auxiliam os desportistas a alcançar resultados que se impõem cada vez mais exigentes.

Os caiaques podem ter superfície rígida ou mole sendo que cada um requer um tipo de remada diferente. Cada *design* tem as suas vantagens e desvantagens no que consta à mobilidade e estabilidade. Os caiaques podem ser feitos em fibra de vidro ou carbono, madeira, polietileno ou insufláveis em PVC ou borracha. Cada material tem as suas vantagens como resistência, durabilidade, flexibilidade e portabilidade. A título de exemplo, um caiaque de madeira construído à mão é muito pesado e difícil de transportar, em contra partida, um insuflável é facilmente montado e transportado.

A introdução do polietileno permitiu a obtenção de caiaques a preço reduzido através de um processo simples intitulado de rotomoldação, ideais para entusiastas da modalidade que pretendem fazer turismo e atividades de lazer.

Os compósitos de matriz polimérica revolucionaram os caiaques usados para competição ao conseguirem um ótimo compromisso resistência peso.

3. Os caiaques e os materiais usados na sua construção.

3.1. Evolução dos caiaques, materiais e produção.

Os caiaques, “bote de caçador”, surgiram na Gronelândia há 3000 anos, quando os Inuits (esquimós) sentiram necessidade de procurar no mar alimentos para sustentar as suas famílias.

Munidos de instrumentos e materiais rudimentares, desenvolveram simples embarcações de pequenas dimensões que, pela sua agilidade, lhes facilitavam a caça e pesca. As embarcações tinham uma estrutura em osso flexível de baleia revestida com peles de animais costuradas com tendões. Com tratamentos incluindo a submersão das peles durante longos períodos de tempo, conseguiam torná-las impermeáveis. Usavam gordura de baleia como calafeto para vedar as uniões das peles. Para assegurar e aumentar a flutuabilidade, enchiam bexigas de foca e introduziam-nas junto à proa e popa.



Fig. 1 - Produção artesanal de caiaques pelos esquimós há mais de 3000 anos. (National Maritime Museum, Greenwich, London).

As embarcações mais pequenas atuavam como elemento exclusivamente furtivo, mas o povo esquimó apercebeu-se que elas poderiam percorrer grandes distâncias; surgiram assim os caiaques maiores, designados *uniaques*, nos quais eram transportadas as famílias e todos os seus bens e mantimentos. Algumas destas barquetas tinham mais de 18 metros.

Só em meados do século XIX chegaram à Europa os primeiros caiaques com laterais insufláveis que serviam de embarcações de apoio aos grandes navios. Os caiaques deixaram de ser usados como instrumento de caça e passaram a fazer parte de expedições, actividades turísticas, de lazer e desportivas.

Depois passaram a ser semi-rígidos, com uma base de madeira e laterais insufláveis de borracha. Mais tarde, nos anos 50 do século XX, surgiram os rígidos de fibra de vidro. Porém, em cerca de 1980, o polietileno de média densidade surgiu como alternativa porque, apesar de tornar as embarcações 20% mais pesadas, o preço revelava-se bastante mais convidativo.

Mais tarde, materiais compósitos laminares de resinas epóxico com fibras de vidro, carbono e *kevlar*, tornaram possíveis novos formatos de caiaques e pagaias, bem como novas técnicas de remo e controle do equipamento.

3.2. Requisitos para as diferentes modalidades e componentes do caiaque

Perceber quais as solicitações a que estes barcos estão sujeitos é fundamental para a identificação dos materiais mais adequados ao fabrico dos mesmos.

A primeira e mais óbvia é a condição de flutuabilidade que pode ser conseguida com um *design* hidrodinâmico mas que só é garantido se for garantida a impermeabilidade dos materiais que constituem o barco.

O peso e o comprimento das embarcações são definidos pela Federação Internacional.

Tabela 1 – Especificações para embarcações de velocidades (Canoe Sprint Competition Rules. ICF, 2009).

Categoria	Comprimento (m)	Peso (Kg)
K1	5,2	12
K2	6,5	18
K4	11	30

Note-se que na categoria k1, Tabela 1, o peso mínimo é de 12 kg o que pode parecer muito pouco. Porém é do interesse dos atletas que os fabricantes construam as embarcações com menos peso para que possam adicionar a diferença de pesos

colocando massas em locais específicos do barco de forma a deslocarem o centro de massa para a posição que mais os favorece.



Fig. 2 - Embarcação K1 – compósito (Nelo Mar Kayaks).

A questão do peso também é importante nas provas de maratona com distâncias de 15 a 20 km onde os atletas têm que fazer percursos a pé carregando o barco.

Para reduzir o atrito no escoamento da água pelo convés as embarcações devem ser o mais estreitas possível. Para garantir a impulsão necessária à fluuabilidade é então necessário alongar o barco até comprimentos que na categoria K4 podem chegar aos 11m.



Fig. 3 - Embarcação K4 – compósito (Nelo Mar Kayaks).

Torna-se assim fundamental que as embarcações sejam capazes de assumir um comportamento semelhante a uma viga resistindo aos momentos fletores impostos pelos pesos dos quatro atletas ao longo de todo o comprimento. Também é importante o

estudo da sua resistência à fadiga porque é de esperar que uma embarcação seja sujeita a inúmeras utilizações, com variados espectros de carga consoante a utilização que lhe é dada.

A utilização mais crítica será em águas mais agitadas e com fortes embates em rochas e na água devidos a desníveis, onde as amplitudes de tensões a que a embarcação está sujeita são maiores, e onde, eventualmente, já se estará no domínio da fadiga oligocíclica. Tendo em conta tais efeitos, será necessário aquando do projeto do caiaque, saber prever uma vida útil para o mesmo para uma utilização padrão.



Fig. 4 - Slalom em águas bravas – compósito (Nelo Mar Kayaks).

Sendo as modalidades praticadas ao ar livre é necessário também que as embarcações não se deteriorem quer pelos diversos fatores ambientais, nomeadamente exposição a radiação solar, variações bruscas de temperatura, poluição, etc.



Fig. 5 - Caiaque de mar – compósito (Nelo Mar Kayaks).

Existem ainda regras relativas às embarcações, como a necessidade do *deck* não ficar acima do ponto mais alto do bordo frontal do *cockpit*, a impossibilidade do casco apresentar linhas côncavas e o impedimento de adição de quaisquer partes móveis ou outro dispositivo que conceda uma vantagem desleal na competição.

Toda a superfície do barco deve ser o mais lisa possível já que ao estudar os fatores que influenciam a velocidade, Jackson (1994), concluiu que um aumento de 1% de atrito na superfície do casco se traduz numa redução de 0,27% na velocidade.

Existem vários tipos de caiaques: de velocidade, *rafting*, *slalom*, pólo, maratona e de mar. A selecção dos materiais utilizados na construção destes aparelhos é feita em função da modalidade.

3.3. Identificação de materiais passíveis de serem usados como solução construtiva

Uma vez conhecidos os requisitos, foi possível seleccionar os materiais que melhor respondem às solicitações enunciadas.

Os materiais de fabrico destas embarcações são variáveis consoante a sua aplicação. Os caiaques de *surf* são, por norma, integralmente feitos de fibra de vidro. As resinas de epóxido com *kevlar* representam dos mais avançados materiais usados no fabrico de caiaques por serem super-resistente e leves. No que diz respeito aos barcos insufláveis e aos de polietileno fabricados por rotomoldação, realça-se a sua surpreendente capacidade para suportarem os impactos sem sofrerem danos significativos.

A concepção de caiaques em **madeira**, frequentemente utilizados como embarcações de turismo, primam pela durabilidade. Estas embarcações não têm boa hidrodinâmica, dado que é bastante trabalhoso esculpir neste material.



Fig. 6 - Caiaque de madeira (Fyneboatkits).

Os caiaques de **borracha**, insufláveis, destinam-se à canoagem de recreação, em águas calmas, para passeio e lazer, visto que são demasiado lentos; embora tendo peso reduzido, não cumprem a forma hidrodinâmica, pelo que a sua condução é difícil.



Fig. 7 - Caiaque insuflável em PVC (Decathlon).

Os polímeros surgem então como material de excelência para estas embarcações.

Em **polietileno**, tornam-se muito versáteis, graças à sua elevada resistência ao impacto e a uma durabilidade notável; são apenas inadequados para competições em águas lisas, devido ao seu reduzido nível de deslizamento e ao seu maior peso, facto que constitui uma desvantagem desportiva.



Fig. 8 - Kayak de turismo em Polietileno (Elie Kayaks).

As **resinas de epóxico** permitiram a utilização de tecidos como as fibras de vidro, carbono e kevlar e, conseqüentemente, a criação de caiaques com *design* de casco mais hidrodinâmico, preparados para competir em águas lisas e de fácil reparação em caso de embate.

A construção de embarcações em **compósitos laminares** destes tecidos revela-se decisiva nas competições devido às suas características muito particulares; na verdade, o carbono possui uma elevada rigidez específica, o que torna o barco muito eficaz em competições de velocidade; e o *kevlar*, portador de notável flexibilidade, torna o casco mais resistente aos impactos, o que se pode tornar crucial em provas de *rafting*.

Note-se que estas conclusões só foram possíveis graças a uma seleção de algumas opiniões de praticantes destas modalidades, presentes em *blogs* desportivos que podem ser visualizadas em anexo.

3.4. Características dos materiais poliméricos e compósitos de matriz polimérica.

Os polímeros dividem-se em 3 grandes grupos: Termoplásticos (sem ligações cruzadas; recicláveis); Elastómeros (algumas ligações cruzadas; podem ser recicláveis ou não) e Termoendurecíveis (muitas ligações cruzadas; não recicláveis).

Nos termoplásticos, as forças de ligação entre as macromoléculas são fracas, pelo que estas deslizam facilmente umas sobre as outras, fazendo deste tipo de polímeros recicláveis.

Se houverem ligações cruzadas entre as moléculas, o polímero torna-se termoendurecível, não é reciclável e aumenta a sua densidade. Este tipo de polímeros tem boa resistência e rigidez, alta densidade e temperatura de transição vítrea. A boa resistência e rigidez destes polímeros deve-se ao fato de, por acção das ligações cruzadas, as cadeias não poderem deslizar umas sobre as outras.



Fig. 9 - Cadeias abertas no polietileno (esq.) e ligações cruzadas aumentam rigidez (dta.) (Wikipédia).

Os elastómeros ou borrachas, são polímeros tipicamente amorfos e possuem uma estrutura intermédia entre a dos termoplásticos e a dos termoendurecíveis, na qual se permite algum cruzamento nas cadeias de moléculas. São estas ligações cruzadas que vão permitir a grande deformação sem plasticidade.

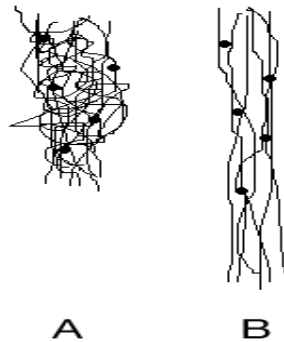


Fig. 10 - Elastómero no estado natural (A) e o mesmo elastómero sob tensão (B) (Wikipédia).

As suas características particulares são a enorme elasticidade e resiliência, o facto de a resistência aumentar com a deformação e de não obedecerem à lei de Hooke.

Os elastómeros são geralmente obtidos por vulcanização e o teor de enxofre adicionado aumenta a rigidez.

De entre os materiais seleccionados verificou-se que os mais usados na actualidade são o polietileno e os compósitos laminados por serem os melhores materiais para caiaques de turismo e competição respetivamente.

3.4.1. Polietileno

Nos caiaques de turismo, o material mais adequado é o polietileno. Este polímero é um termoplástico representado pela cadeia $[\text{CH}_2\text{-CH}_2]_n$, linear não ramificada, ainda que muitas vezes nos produtos comerciais isto não se verifique. É largamente produzido e por isso, barato. É quimicamente inerte e obtém-se por reações de polimerização do monómero etileno ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$). Existem duas variações consoante a densidade, são elas o polietileno de alta e de baixa densidade. As características de cada um são diferentes e que de seguida são sumariamente descritas.

3.4.1.1. O Polietileno de Baixa Densidade (LDPE)

O LDPE é leve e impermeável o que é essencial para a fabricação das embarcações. É inerte e não é tóxico pelo que não se corre o risco de contaminar a água com a qual as embarcações contactam. Tem boa flexibilidade porque a densidade é menor do que a da água e é translúcido pelo que se pode adicionar um pigmento com a cor que se desejar.

Regra geral é usado amarelo porque quando ocorre foto degradação os polímeros tendem a amarelar e assim este efeito é menos visível. A estabilidade dimensional deste polímero é baixa se bem que não é um fator muito importante na produção.

3.4.1.2. O Polietileno de Alta Densidade (HDPE)

O HDPE também é impermeável mas é um pouco mais pesado que o LDPE ainda que relativamente a outros polímeros a sua densidade seja baixa. Tem boa resistência mecânica e relativamente ao LDPE tem maior resistência à fluência. É inerte, não tóxico e tem pouca estabilidade dimensional.

As principais aplicações destes materiais são em frascos e embalagens para produtos alimentares e cosméticos, em tubagens, mangueiras e em lonas de impermeabilização de solo.

Tabela 2 - Características gerais do polietileno (CES – Edupack).

Características	LDPE	HDPE
Grau de cristalinidade [%]	40 a 50	60 a 80
Densidade [g/cm ³]	0,915 a 0,935	0,94 a 0,97
Temperatura de Fusão [°C]	105 a 110	130 a 135
Estabilidade química	boa	excelente
Tensão de rotura [N/mm ²]	8,0-10	20,0-30,0
Deformação após rotura [%]	20	12
Módulo de elasticidade [N/mm ²]	200	1000
Coefficiente de expansão linear [K ⁻¹]	$1,7 * 10^{-4}$	$2 * 10^{-4}$
Preço [€/kg]	1,2	1,4
Resistência à fadiga (10 ⁷ ciclos) (MPa)	21	23

3.4.2. Compósito laminar com resina de epóxido

Um compósito é constituído por uma fase matriz e por uma fase dispersa. A fase matriz é responsável por unir as fibras e por distribuir um esforço aplicado externamente por todas as camadas de fibra, sendo a porção absorvida pela matriz muito pequena. Deve ser dúctil e proteger as fibras de abrasão e contra danos superficiais inibindo a propagação de trincas. Normalmente é esta fase que determina a temperatura máxima de serviço já que funde a uma temperatura muito mais baixa do que as fibras de reforço. As resinas de poliamida conseguem operar a 230°C. Neste caso a fase matriz é a resina de epóxido e a fase dispersa são as diversas fibras aplicadas.

A fase fibra é um aglomerado de filamentos de diâmetro reduzido fazendo com que a probabilidade de falha por defeito superficial ou iniciação seja baixa. A propagação de um defeito é difícil.

Nos caiaques de competição são usados compósitos estruturais reforçado com fibras laminadas de diferentes materiais umas alinhadas, outras orientadas aleatoriamente. A existência de diferentes materiais na estrutura traduz-se numa sobreposição de propriedades fazendo com que o comportamento global seja resultado da influência de todos os materiais. A principal vantagem deste tipo de materiais é o

excelente compromisso entre peso e resistência mecânica que é expresso pelo parâmetro resistência específica (razão entre tensão limite de elasticidade e densidade).

A orientação e concentração das fibras é crucial e distinguem-se dois tipos de orientação, alinhamento numa direção ou alinhamento aleatório.

Regra geral, é possível identificar as camadas de *gelcoat*, pintura, fibra de vidro e de carbono, kevlar®, espuma de PVC e até mesmo cortiça, todas numa matriz de resina de epóxico. As camadas de fibra de carbono tem cerca de 0,2mm, o aglomerado de cortiça tem 0,85mm, o kevlar® tem 0,45mm e a camada de espuma de PVC tem 5,0mm.

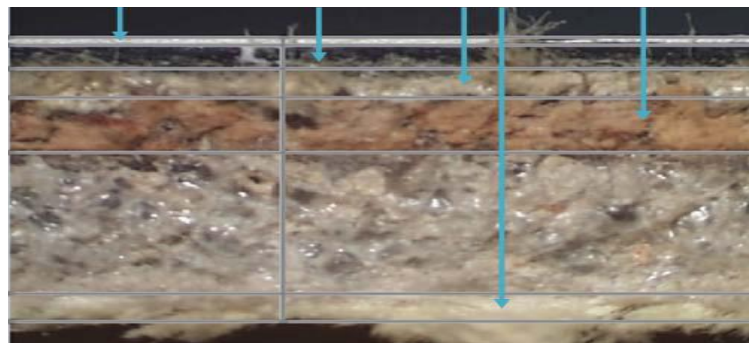


Fig. 11 - Camadas sobrepostas do casco em corte de um caiaque Nelo (Dias, Pedro Ferreira. Dissertação, Análise Estrutural de um caiaque de Competição, 2011).

3.4.2.1. Resina de Epóxico

As resinas de epóxico são um material adesivo que pertencem ao grupo dos polímeros termoendurecíveis. Têm boas propriedades mecânicas nomeadamente resistência a esforços cortantes, escamação e fratura. A resina é aplicada no estado líquido e, após um processo de cura endurece em contacto com um agente catalisador que desencadeia uma reação de adição com emparelhamento (AB-AB) a uma temperatura de cura situada entre os 70 e os 120°C. Normalmente a resina é produto da reação entre epícloridrina e bisfenol-a. A grande desvantagem do uso de resinas é o fato de não poderem operar a altas temperaturas se bem que este facto não constitui um problema na aplicação em questão.

É usada no revestimento interno de embalagens de bebidas, em placas de circuitos impressos, no encapsulamento de componentes electrónicos, em pisos industriais e para laminagem de compósitos estruturais.

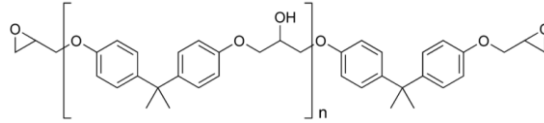


Fig. 12- Estrutura química da resina de epóxico (Wikipédia).

Tabela 3 - Características gerais da resina de epóxico (CES – Edupack)

Propriedade	Valor
E	2,4 – 3 GPa
σ_e	36 - 71MPa
σ_r	45 - 90 MPa
ϵ_r	2 - 10%
Resistência à fadiga (10^7 ciclos)	22 - 35 MPa
Preço	5,8 - 7,3 €/kg
Densidade	1100-1400 kg/m ³

3.4.2.2. Gelcoat

O gelcoat é a camada superficial aplicada antes da primeira laminação e tem como finalidade proteger o laminado dos raios UV e dar um aspeto e acabamento superficial agradável. Este material à base de resina de poliéster é mais sensível à quantidade de catalisador do que a resina de epóxico. A grande vantagem do uso deste material é a possibilidade de aplicação da pintura numa fase inicial pois este proporciona compatibilidade química necessária para receber as camadas de laminados.



Fig. 13 – Embalagem de gelcoat à base de poliéster (Produtos-Mercado-livre).

3.4.2.3. Espuma de PVC

As espumas são geralmente usadas em embalagens ou como isolamento térmico. Contêm uma elevada percentagem volumétrica de poros formados por um gás que ficou aprisionado durante o processo de fabrico. O processo pode ser conduzido de duas formas. Uma consiste em adicionar um agente espumante ao material que a elevada temperatura se decompõem libertando um gás que forçando o material a adquirir uma estrutura tipo esponja. Depois, com um arrefecimento rápido, o material memoriza essa forma. O outro consiste em insuflar um gás a alta temperatura e pressão no material e de seguida fazer uma diminuição repentina de pressão com arrefecimento. Isto aprisiona o gás no material que, num esforço para sair, cria porosidades.



Fig. 14 - Espuma de PVC (Easycomposites).

Sendo este trabalho sobre materiais poliméricos a abordagem aos restantes materiais constituintes do compósito, à exceção do Kevlar® por se tratar de uma fibra aramida, não é essencial. Contudo, fez-se uma pequena análise em termos de propriedades por forma a compreender melhor o papel que desempenham.

3.4.2.4. Fibra de carbono

De entre as propriedades mecânicas resultantes da conjugação da matriz de epóxico com a fibra de carbono salientam-se a sua densidade, que varia entre 1550 e 1600 kg/m³, o módulo de elasticidade, que se situa entre 50 e 60 GPa e a tensão de rotura que assume valores entre 500 e 1050 MPa.



Fig. 15 - Fibras de carbono dispostas perpendicularmente umas às outras (Produtos Alibaba).

3.4.2.5. Fibra de vidro

A fibra de vidro é talvez a mais amplamente utilizada como reforço. A propriedades do composto variam consoante a percentagem volumétrica aplicada.

Tabela 4 – Propriedades da resina de epóxico não reforçada e quando reforçada com fibra de vidro (Calister, William. Ciência e Engenharia dos Materiais).

	Não reforçada	20% (vol.)	30% (vol.)	40% (vol.)
Densidade	1,2	1,35	1,43	1,52
Tensão de limite elástico (MPa)	60	110	131	159
Módulo de elasticidade (GPa)	2,25	5,93	8,62	11,6
Deformação após rotura (%)	100	5	4	4



Fig. 16 - Fibra de vidro (Dremel).

3.4.2.6. Kevlar®

O Kevlar®, marca registrada da empresa *DuPont*, é uma fibra sintética de aramida, que apresenta, tal como a fibra de carbono, excelentes propriedades mecânicas e por isso, é usado quando se pretende uma elevada resistência e boa capacidade de absorção de impactos.

Para um compósito de resina de epóxico reforçado com Kevlar®, a densidade de 1400 kg/m^3 o que, aliado a um módulo de elasticidade de 124 GPa e uma resistência à tracção de 3,6 GPa, o torna um material com uma resistência específica superior à fibra de carbono.



Fig. 17 - Kevlar® (Wisegeek).

3.4.2.7. Cortiça

A existência de um aglomerado de cortiça é essencialmente para aumentar a espessura sem alterar demasiado a densidade final do *caiaque*. A densidade da cortiça assume valores entre os 120 e 240 kg/m^3 e o módulo de elasticidade é de 38 MPa.

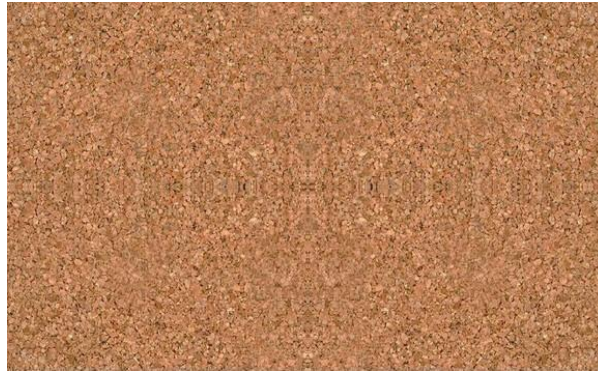


Fig. 18 - Cortiça (Grupo Amorim).

Dos materiais supracitados a fibra de carbono e o Kevlar®, são aqueles que mais contribuem para a estabilidade estrutural do caiaque.

Tabela 5 – Valores típicos de propriedades das fibras quando associadas a uma matriz de resina de epóxico (Calister, William. Ciência e Engenharia dos Materiais).

	Fibra de Vidro	Fibra de Carbono	Kevlar®
Densidade (g/cm³)	2,1	1,6	1,4
Tensão de limite elástico (MPa)			
Longitudinal	1020	1240	1380
Transversal	40	41	30
Deformação à tensão de cedência			
Longitudinal	2,3	0,9	1,8
Transversal	0,4	0,4	0,5

3.5. Processos de fabrico

Os dois principais materiais de origem polimérica para produção de caiaques são, como vimos, o polietileno e a resina de epóxico quando combinada com laminados de fibras altamente resistentes. Acontece que, enquanto que o polietileno pertence aos termoplásticos, a resina epóxico pertence aos termoendurecíveis e por isso os processos envolvendo cada um destes materiais são completamente distintos.

3.5.1. Rotomoldação

Os caiaques de polietileno são conseguidos por rotomoldação que é um processo industrial de transformação de termoplásticos.

Este processo é relativamente barato e simples. Consiste na introdução da matéria prima, um termoplástico, num molde que é fechado e aquecido. Quando o polímero assume viscosidade suficiente para se moldar, é iniciada a rotação biaxial do molde. Com a força centrífuga gerada, o material é forçado contra as paredes do molde tomando a sua forma. Uma vez arrefecido, o caiaque é retirado e são feitos cortes e operações de acabamento.

O maior inconveniente deste processo é que nem sempre é possível distribuir de forma homogénea o material ficando a peça com espessura variável.

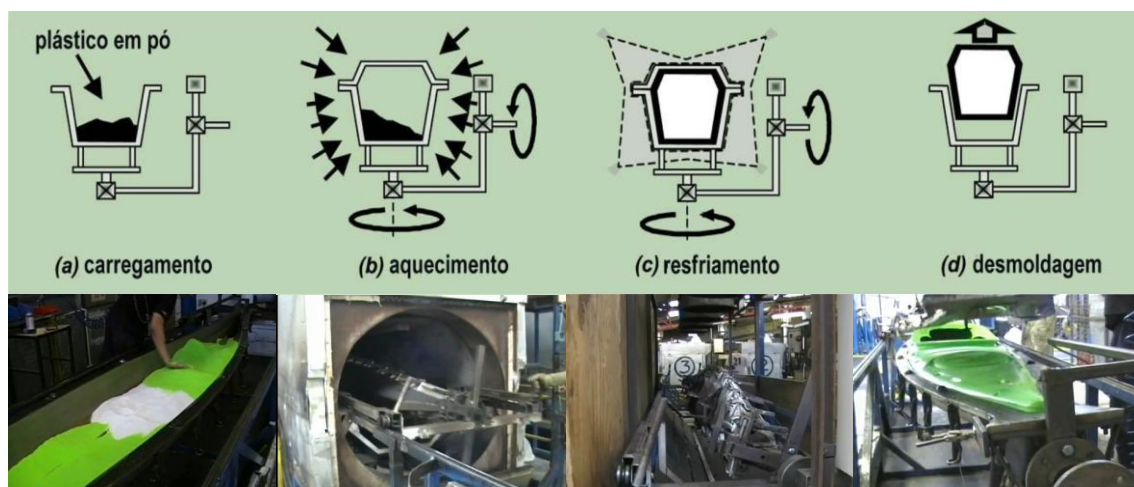


Fig. 19 - Representação dos diferentes passos no processo de rotomoldagem (Basita).

3.5.2. *Processamento de laminados compósitos*

O processo que a seguir se descreve foi desenvolvido pela Nelo Mar Kayaks e as etapas de fabrico foram registadas numa visita de estudo à unidade fabril.

Tabela 6 – Vantagens e desvantagens do processo (RAMPF).

Geometrias possíveis	Complexas
Acabamento superficial	Bom
Design	Num dos lados
Qualidade da peça	Boa
Variação da espessura	Alguma
Quantidade de fibra aplicável	40 a 50% (vol.)
Propriedades mecânicas	Razoáveis
Implementação do processo	Razoável
Volume de séries	Baixo
Tempo de fabrico	Razoável
Custo dos equipamentos	Baixo
Custos do molde	Baixo
Custo mão de obra	Elevado
Custo dos materiais	Moderado
Higiene no trabalho	Problemática
Impacto ambiental	Elevado

3.5.2.1. Processo desenvolvido pela Nelo Mar Kayaks

A Nelo Mar Kayaks é uma empresa nacional que detém o título de produtora dos melhores caiaques do mundo, sendo da predilecção de atletas olímpicos pela altíssima performance manifestada pelos seus equipamentos.



Fig. 20 – Exterior (esq.) e interior (dta.) da fábrica Nelo Mar Kayaks.

Antes de se fazer um novo modelo, a empresa analisa o desempenho de um atleta num modelo anterior. Os perfis de aceleração e inclinação por exemplo, podem proporcionar muita informação quando juntos com o vídeo da remada do atleta e processados com o software Dartfish, que ajuda na sincronização dos perfis de aceleração e inclinação com o vídeo, tornando fácil a comparação entre os diferentes testes. Com a informação decorrente dos testes, é possível criar um novo modelo mais eficiente.

Sempre que se entende fazer um novo modelo, a empresa usa moldação manual fazendo modificações ou ajustes em barro sobre um modelo mais antigo. Uma vez conseguido o melhor design, é feita uma digitalização 3D com um scanner 3D a forma é exportada para um programa de CAD onde são adicionadas as dimensões exatas.

Alguns componentes e pequenas peças são directamente desenhados em CAD para uma rápida prototipagem ou maquinagem.

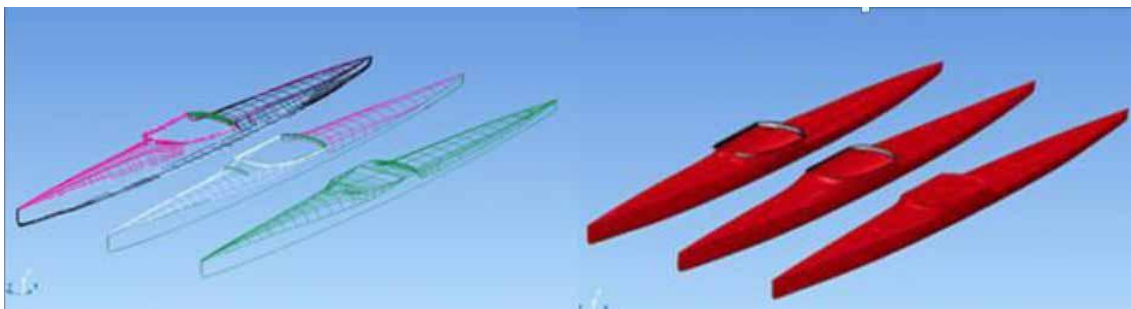


Fig. 21 - Modelo 3D criado com software apropriado (Nelo Mar Kayaks).

Uma vez satisfeitos com o desenho, é maquinado um protótipo em aglomerado de madeira (MDF) usando uma máquina de CNC. As dimensões do mesmo são depois confirmadas com recurso a uma forma metálica com a exata dimensão da secção do barco.

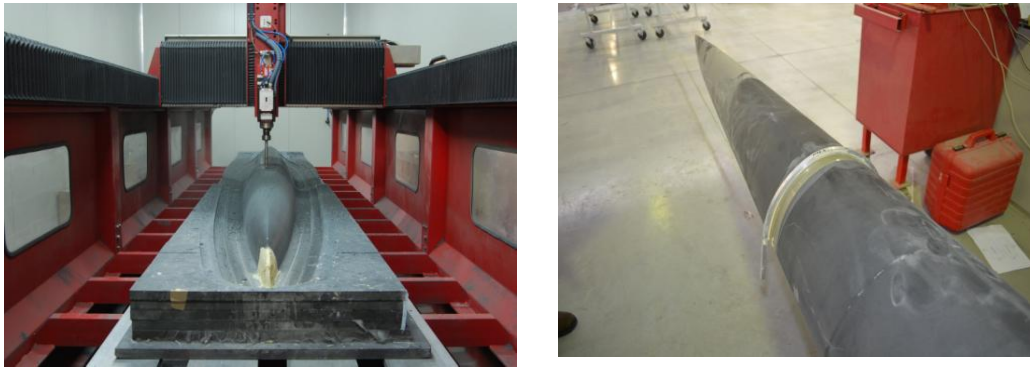


Fig. 22 - Maquinagem de um protótipo (esq.) e verificação dimensional (dta.).

Com este protótipo em MDF são feitos os moldes monocoque em resina “gelcoat” e fibra de vidro do casco e do deque, que são sujeitos a uma cura intensiva antes da primeira utilização o que permite que os moldes tenham um longo tempo de utilização mantendo a sua forma e qualidade.



Fig. 23 - Molde fechado (esq.) e aberto (dta.) em fibra de vidro.

Os caiaques são construídos de fora para dentro. Assim, o primeiro passo consiste na aplicação de um desmoldante no interior do molde que pode ser cera em pasta, filme ou álcool polivinílico. Logo de seguida segue para a estufa de pintura.



Fig. 24 - Pintura em estufa apropriada.

Após a pintura inicia-se a laminagem das fibras que podem ser fibra de vidro, carbono ou kevlar. A empresa não usa fibras pré impregnadas, por isso sobre diferentes tipos de fibra são depositadas no molde diferentes camadas de resina epóxido até que estas fiquem bem impregnadas. As fibras são colocadas transversalmente e não longitudinalmente para diminuir os desperdícios aquando do corte do excesso de tecido. A sobreposição das fibras é feita com cuidado para garantir uma superfície homogênea.



Fig. 25 - Bobines de fibra (esq.) e impregnamento manual (dta.).

Na parte central do caiaque são colocadas camadas adicionais de resina de epóxido reforçada com fibra de carbono unidirecional, aumentando a rigidez neste local, o que é fundamental para descontinuidade geométrica (cavidade para o canoísta) existente nesta zona que é um fator de concentração de tensões.

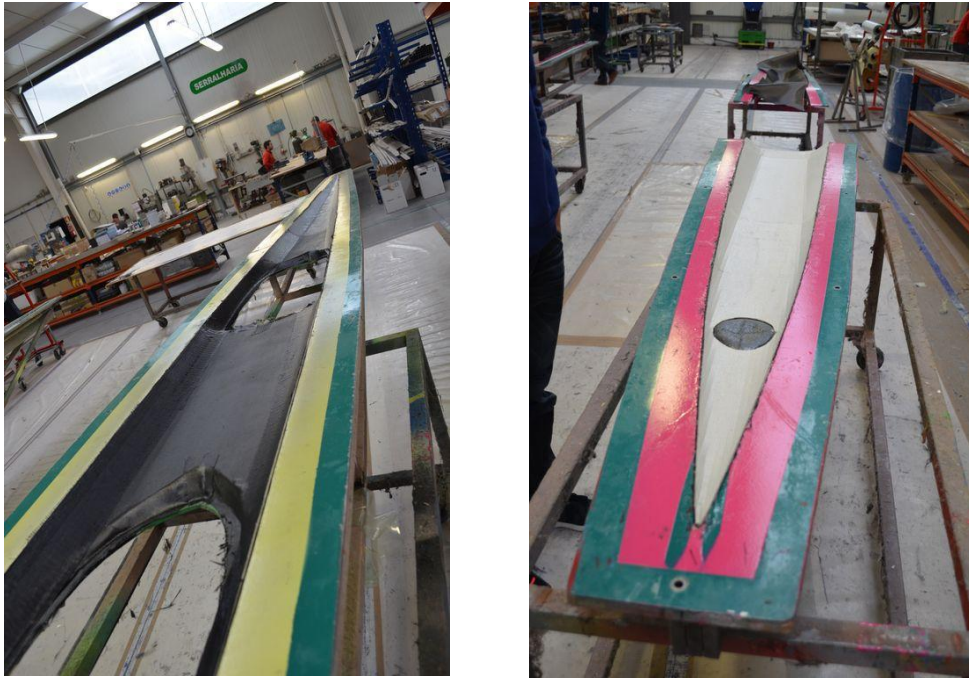


Fig. 26 - Tiras de carbono unidirecional (esq.) e espuma de PVC (dta.).

Uma das camadas aplicadas é de espuma de PVC.

Finalmente é aplicada um tecido geotêxtil que absorve o excesso de resina quando aplicado vácuo “wet lay up”.



Fig. 27 - Aplicação de vacuo em estufa para cura da resina.

Depois as embarcações seguem para a cura que dura 12 horas numa estufa a 70°C. Após o primeiro ciclo de cura, ambas as partes do barco, casco e deck, são coladas e reforçadas com um novo ciclo de cura.

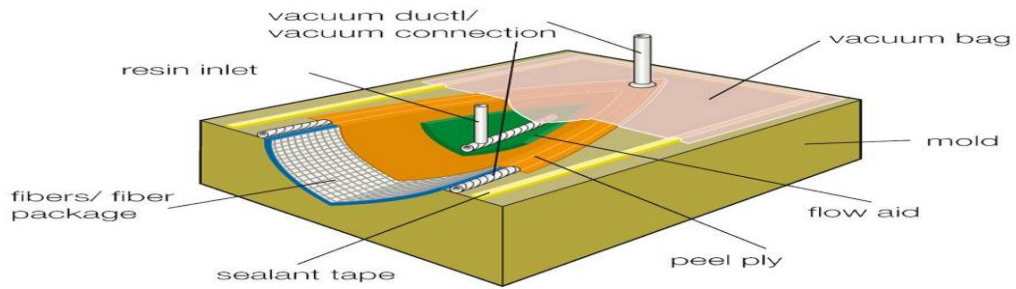


Fig. 28 - Representação de todos os passos de laminagem descritos até agora (RAMPF).

Após o ciclo de cura o barco é retirado do molde e é enviado para acabamento.



Fig. 29 - Corte de rebarbas no plano de separação (esq.) e polimento final (dta.).

Finalmente são colados com Sicaflex os componentes em alumínio que permitem a alocação do banco.



Fig. 30 - Colagem de perfis metálicos (esq.) e colocação do banco (dta.).

O controle de qualidade é feito a cada fase do processo.

As embarcações podem custar de 1400 a 2500 euros.

Reparação de danos

Os principais danos são na proa porque é onde mais frequentemente há choques e de lado porque durante a remada as pagaias raspam no deque. Além disso, muitas vezes ocorrem roturas estruturais quando se tenta retirar o barco da água estando este cheio de água, e ocorrem ainda danos provocados pelo sol devido à foto-polimerização.



Fig. 31 - Casco danificado (esq.) e reparação na proa (dta.).

Construções disponíveis (Nelo Mar Kayaks):

Competição – Carbon Foam Epoxy Vacuum Heat Cured – Esta construção já provou o seu potencial anteriormente e tornou-se uma das mais populares. É extremamente resistente e dura, logo é excelente para treino e competição em pista.

Competição – G-Extra Carbon Foam Epoxy Vacuum Heat Cured – Construção de gama alta, preparada para alta performance.

Competição – SCS-Solid Composite System – Este sistema foi concebido pela M.A.R. Kayaks para produzir barcos tão sólidos como os compósitos podem ser. A excelente performance deve-se à sua extremamente alta rigidez.

Lazer – E-Carbon/Kevlar Honeycomb Vacuum Heat Cured – Esta construção é específica para a competição em provas de maratona e caiaque de mar, sendo as suas principais características as elevadas leveza e a dureza.

Lazer – WWR-Carbon/Kevlar Epoxy Vacuum – Esta construção, concebida para a descida de rios, treinos de maratona e caiaque de mar, tem como especificidades principais a alta dureza e resistência ao impacto.

Lazer – Al-Fiberglass Polyester – Esta é a construção básica, criada como opção económica para barcos de turismo e aprendizagem.

3.6. Influência dos materiais no rendimento dos atletas

Na ausência de um estudo científico que comparasse o comportamento de caiaques de proveniências distintas, pretendeu provar-se a eficiência dos materiais, recorrendo aos tempos dos atletas campeões do mundo, na expectativa de verificar que estes diminuem ao longo das competições desportivas.

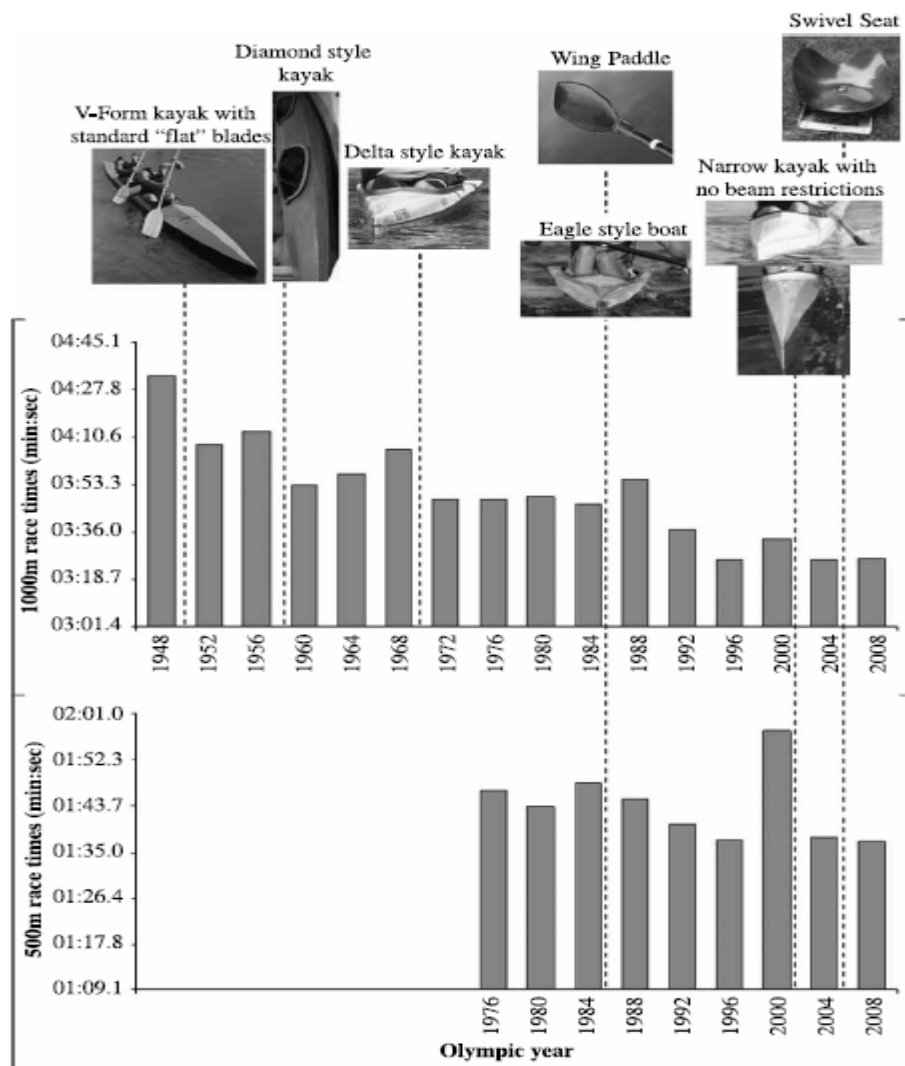


Fig. 32 - Desempenho dos atletas olímpicos de K1 1000m (1948-2008) e de K1 500m (1976-2008) (Michael, Smith & Rooney, 2009).

Comparando os tempos da prova dos 1000m na categoria K1 é evidente a tendência de tempos decrescentes desde 1948 a 2008. Conclui-se assim que apesar de a exigência sobre os atletas, o melhoramento dos métodos de práticas de desporto, recuperação e nutrição serem cada vez maiores e por isso o seu desempenho físico tenha vindo a melhorar, é de crer que os decréscimos tão acentuados de tempos sejam também resultantes dos avanços tecnológicos dos equipamentos usados.

4. Conclusões

Os caiaques começaram por ser usados como embarcações furtivas mas hoje são usados como embarcações de lazer e em várias modalidades de desporto de alta competição. As exigências das aplicações quer de turismo quer de competição impulsionaram a procura de novos materiais para o fabrico dos barcos.

A utilização de polímeros especialmente de PVC e polietileno tornou possível uma rápida produção a baixo custo através de processos como a rotomoldação de embarcações de lazer de baixo peso e boa resistência. Porém estes não satisfizeram as necessidades do desporto de alta competição sobretudo para as competições de águas lisas. Então, surgiram os compósitos laminares de fibras em matriz polimérica. Ao aliar a capacidade adesiva das resinas de epóxido com as propriedades de diferentes fibras foi possível desenvolver uma performance e características nunca antes atingidas. A Nelo Mar Kayaks, empresa portuguesa, é líder mundial no fabrico deste tipo de caiaques.

O efeito da evolução dos materiais e processos de fabrico foi verificado numa diminuição progressiva dos tempos dos atletas olímpicos nas provas da categoria de K1. Através de comentários em *blogs* de entusiastas da modalidade foi também possível entender melhor a influência dos diferentes materiais.

Futuramente, seria interessante levantar um estudo sobre a evolução da hidrodinâmica das embarcações, fator igualmente decisivo na obtenção dos melhores resultados em competições.

5. Bibliografia

Calister, William (2010) Ciência e Engenharia dos Materiais, LTC.

Granta CES Edupack 2012, versão 11.9.9.

Dias, Pedro Ferreira (2011). “Análise Estrutural de um Kayak de Competição” [Dissertação] Disponível online em:
<http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/61521/1/000148887.pdf>

Experience Frontenac Outfitters, Kayak Materials. Disponível online em:
www.frontenac-outfitters.com/onlinetutorials.cfm?id=4. Acedido em [26-12-2012].

Ford, David N. “How products are made”, Kayak. Disponível online em:
www.madehow.com/Volume-2/Kayak.html. Acedido a [26-11-2012].

Heitlinger, Paulo (2007). Design Étnico; Kayaks. Disponível online em:
www.tipografos.net/design/kayak.html. Acedido a [30-11-2012].

Nasseh, Jorge. (2008) “Técnica e prática de laminação de compósitos”. Rio de Janeiro. Cap. 1. Disponível online em: <http://manualdeconstrucaodebarcos.com.br/Site/wp-content/uploads/2011/12/tplc.pdf>

Mirabel, C. Rezende (2000). “Processamento de Laminados de Compósitos. Poliméricos Avançados com Bordas Moldadas.” Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Materiais. vol. 10, nº 1, p. 31-41.

Nelo Mar Kayaks, Produção. Disponível online em: www.mar-kayaks.pt/pt/. Acedido a [30-11-2012].

RAMPF, Production Processes. Disponível online em: www.rampf-tooling.de/en/products-solutions/composites-a-fiber-composite-material-with-a-promising-future/raku-tool-composites-production-processes/. Acedido a [4-12-2012].

Smith, W. F. (1996) “Princípios de ciência e engenharia dos materiais”. Lisboa:McGraw-Hill, Inc.

Subic, Aleksander (2007). “Materials in Sports equipment”. Cambridge:Woodhead Publishing. ISBN 978-1-84569-366-4

10. Anexos

Opiniões de praticantes de canoagem retiradas de blogs:

Kenmack, Perth Australia. I've had several plastic kayaks. I'm very happy with it but had viewed the fibreglass and Kevlar built version as probably superior to mine. However, my plastic kayak has been through the normal scrapes, gouges, crashes, crunches, drops, etc you expect to come across on reef, rocks, beaches, boat ramps, loading, etc. The outer hull reflects these knocks and bumps without any need for repair.

If I upgrade to a fibreglass or Kevlar kayak will it survive the same conditions? I get the impression the fibreglass gel coat, for example, does not cope well with abrasion and I'm not sure about Kevlar.

Timax, Surry Hills Sydney I chose Carbon Kevlar as I wanted a kayak that would be easy to get on and off the car and easy to move around in general while still being strong. Weight off the water was important for me.

Otis Inflatable kayaks are great. Just don't buy a cheap one like a sea eagle - they puncture real easily. Walmart has some more expensive ones like the Coleman which might be a good choice if you only use it once in a while. But, for more serious paddling, a well-constructed inflatable will give you years of use. Many of the whitewater raft companies manufacture high quality inflatables that come with extended warranties.

sunbum1944 I believe I have read that the inflatables don't track as well as the hardshell - although I am not 100% sure of that.

Tim Think of inflatable kayak construction as just another way of making a boat. There are good designs and poor ones, just like there are with rigid kayaks. The better inflatable boats use rubber coatings over low-stretch fabrics. You will see this construction in whitewater rafts and commercial Zodiac-type inflatables. It's actually tougher than rigid construction for demanding applications and banging off of rocks. The cheapest inflatable boats, on the other hand, use essentially shower curtain material without fabric reinforcement and don't hold up. You get what you pay for. Rubber coated fabrics are more abrasion-resistant than PVC (vinyl) coated fabrics. Rubber

coated fabrics are also environmentally friendlier than the ubiquitous PVC boat fabrics, which off-gases dioxins, but are cheap to make in Asia. Like rigid kayaks, inflatable kayaks have a wide range of designs for the kind of paddling you want to do. A good touring design will have a narrower hull for less drag and with lower side tubes to not catch the wind. Many whitewater inflatables are quite wide with high side tubes for buoyancy, and while these can handle rapids, they are dogs to paddle in flatwater lakes. Nowadays you can buy a quality inflatable double kayak for less money than a rotomolded rigid recreational kayak, but the inflatable will weigh half as much and can be carried in your car trunk. But don't expect that you can lowball an inflatable boat purchase and get a good boat, any more than you can buy a cheap plastic rigid kayak and get safe performance.

California Kayak Dealers: You're right, an inflatable will likely be a little slower. The rigidity of the material; hard plastic, will glide more than fabric, fiberglass or kevlar will glide better than plastic. However, modern inflatables are much more resistant to popping than in the past. If you have room to store a hard shell boat, get a sea kayak not inflatable.

E-mails enviados à Nelo Mar Kayaks para agendamento de uma visita de estudo:

Boa tarde,

Somos Alunos do 3ºano do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e, no âmbito da Unidade Curricular de Materiais de Construção Mecânica II foi-nos proposta a realização de um trabalho sobre "Polímeros - Processos de fabrico e aplicações".

Numa visita ao vosso Web-site verificamos que materiais como Polietileno Tereftalato ou Poliéster, Epoxy, entre outros polímeros e compósitos de matriz polimérica são usados na produção dos vossos tão prestigiados Kayaks pelo que seria interessante desenvolver o nosso trabalho em torno dos vossos produtos.

Assim, ter o privilégio de assistir à aplicação destes materiais na construção das vossas embarcações seria óptimo para uma boa compreensão das propriedades dos mesmos no contexto das solicitações a que estão sujeitos nas mãos dos atletas de alta competição.

Posto isto, gostaríamos então de solicitar uma visita às vossas instalações, se tal for possível, em data a marcar de acordo com a vossa disponibilidade.

Aguardamos ansiosamente a vossa resposta.

Boa tarde Sr. Nuno Ramos.

Foi com satisfação que recebemos a vossa resposta. Porém, o trabalho ainda está muito pouco desenvolvido e, no nosso entender, para que a visita se torne mais proveitosa, deveremos deter um conhecimento detalhado sobre os materiais e processos em questão para que possamos colocar dúvidas.

Gostaríamos então de adiar a visita para o mês de Novembro e se possível para uma terça ou quarta de tarde, ou sexta de manhã. Pedimos desculpa pelo inconveniente de marcar a visita com tanta antecedência pois não esperávamos uma resposta vossa com tal prontidão.

Mais uma vez, os melhores cumprimentos.

Boa noite senhor Nuno Ramos.

No passado mês de Outubro entramos em contacto consigo para agendar uma visita às instalações da Nelo Kayaks. A visita ficou adiada para Novembro, mas com data por determinar. Tínhamos estabelecido que o dia mais conveniente seria sexta-feira de manhã. Na próxima sexta feira dia 23, o grupo tem disponibilidade total. Se for possível fazer a visita nesta data ótimo, caso contrário agradecia-mos que sugerisse uma outra.

Os melhores cumprimentos.