



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Covilhã | Portugal

Fabricação - Madeira

Fabricação e Manutenção de Aeronaves (10384)

2013

Pedro V. Gamboa

Departamento de Ciências Aeroespaciais

Objetivos

- Ter noções básicas sobre construção aeronáutica em madeira:
 - Propriedades da madeira;
 - Colagem;
 - Fabrico de partes e componentes;
 - Montagem.

A madeira na construção aeronáutica

- A madeira é constituída por fibras de celulose e por uma matriz de celulose e lignina (ou lenhina).
- Desta forma, ela é considerada um material **compósito natural** onde as fibras são essencialmente unidireccionais.



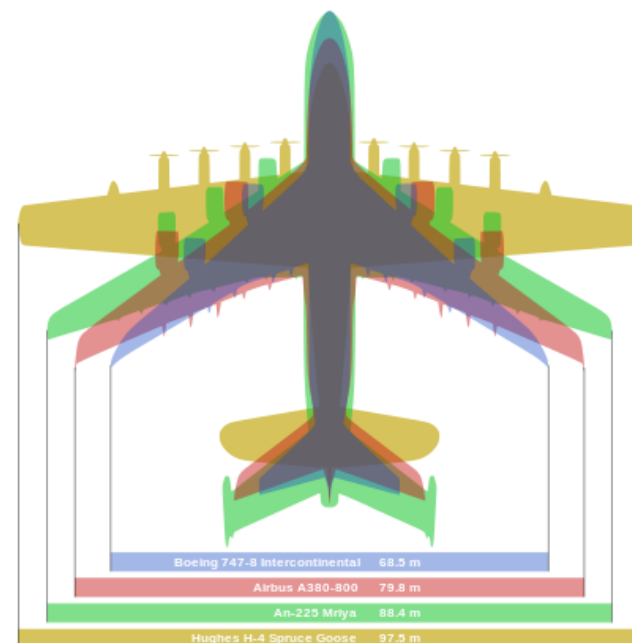
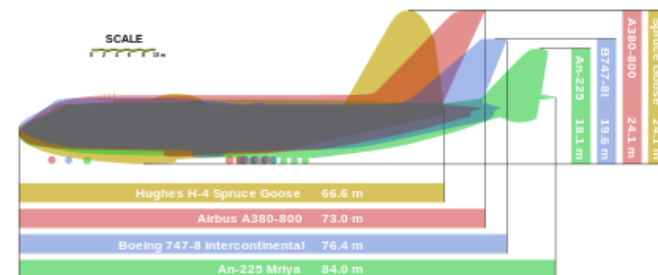
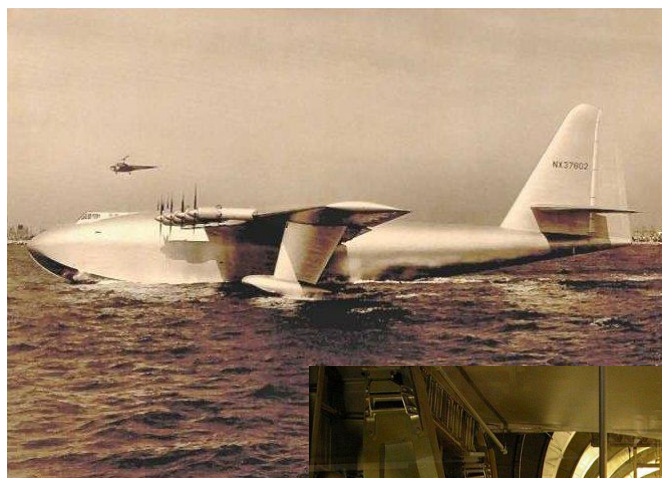
A madeira na construção aeronáutica

- Sequoia Falco.
- Usa madeira de Spruce laminada nas cavernas, nervuras e longarinas e contraplacado de Bétula no revestimento.



A madeira na construção aeronáutica

- Hughes H4 Hercules “Spruce Goose”.



Tipos de madeira (1)

- Algumas madeiras usadas na construção aeronáutica e as suas aplicações mais comuns estão indicadas na tabela

	Freijó	Spruce	Pinho	Pau Marfim	Balsa
Longarinas	+	+	+		
Nervuras	+	+	+		
Estruturas	+		+		
Contraplacado			+		
Hélices				+	
Enchimentos					+

- A seleção da madeira e o processo de fabrico têm uma influência grande nas propriedades finais nas peças.
- A madeira é um recurso natural abundante, com baixa densidade, com boas características mecânicas e térmicas, e requer meios simples de produção, logo é um material nobre para a aviação ligeira, amadora ou de séries pequenas.

Tipos de madeira (2)

- As madeiras retiram-se de árvores com boas características mecânicas, com as fibras alinhadas e sem nós.



Tipos de madeira (3)

- Madeiras resinosas (mastros, lâminas de longarina ou de caixas, varetas de nervuras):
 - Spruce (spruce, spruce)
 - Abeto branco (sapin blanc, white fir)
 - Pinheiro silvestre (pin sylvestre, scots pine)
- Madeiras médias (abas de nervuras, cunhas, suportes):
 - Álamo (peuplier, poplar)
 - Amieiro (aulne, alder)

Tipos de madeira (4)

- Madeiras duras (quilhas, hélices, placas de suporte, lâminas comprimidas):
 - Bétula (bouleau, birch)
 - Nogueira (noyer, walnut)
 - Freixo (frêne, ash tree)
 - Faia (hêtre, beech)
- Madeiras muito duras (placas de apoio, patins):
 - Nogueira amarga (hickory, hickory)

Propriedades da madeira (1)

- Características mecânicas das madeiras mais comuns na construção aeronáutica (Paul Vallat, 1950)

Désignation			Densité kg / m ³ (1)	% rétraction transversale (2)	Contraintes admissibles à rupture - kg/mm ²				Module d'élasticité E kg/mm ² (6)	Indications d'emploi	
					Compression		Traction				Cisaillement (5)
Catégorie	Appellation	Origine			(3)	⊥ (4)	(3)	⊥ (4)			
Résineux	spruce	Amérique	0,46	7,4	3,5	0,65	8	0,13	0,33	1000	Mâts, semelles de longerons ou de caissons, baguettes de nervures
	sapin	Suisse	0,45	6,0	3,5	0,65	8	0,13	0,35	1000	
	blanc	France	0,43	7,4	4,2	0,80	9	0,14	0,40	1000	
	pin sylvestre										
Feuillus tendres	peuplier	France	0,44	7,1	3,1	0,40	7	0,15	0,34	800	Chapeaux de nervures, cales, tasseaux, lisses
	aulne	France	0,45	7,0	3,4	0,45	?		0,35	900	
Feuillus durs	bouleau	Norvège	0,70	8,5	4,1	1,10	?	0,25	0,50	1100	Cales, quilles d'angle, hélices, plaques d'appuis, semelles comprimées
	noyer	France	0,65	7,1	3,9	1,20	?	0,27	0,50	1000	
	frêne	France	0,72	6,8	4,4	1,40	10	0,30	0,65	1200	
	hêtre	France	0,70	10,6	4,2	1,30	11	0,35	0,70	1100	
Feuillus très durs	hickory	Norvège	0,81	?	6,1	2,20	?	?	1,02	1300	Plaques d'appuis, patins

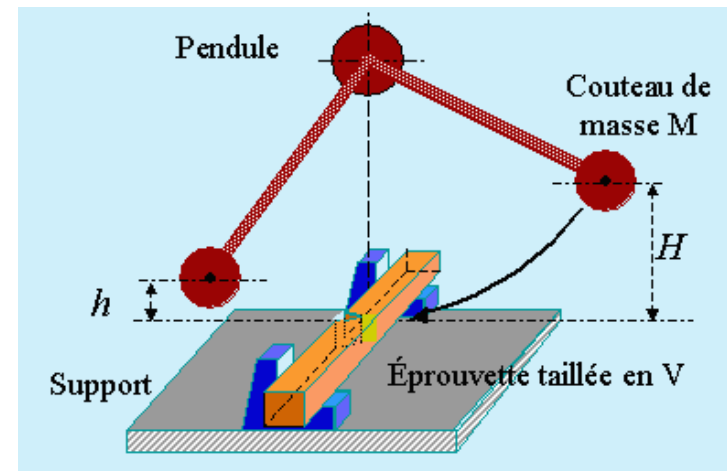
Propriedades da madeira (2)

- Notas:

- (1) As densidades e as características mecânicas correspondem a uma humidade de 15%. A resistência diminui 4% por cada 1% de humidade superior a 17% até 25%.
- (2) Contração (no sentido tangencial às camadas de crescimento anual) entre a madeira verde e madeira cozida em vapor.
- (3) Solicitações no sentido da fibra.
- (4) Solicitações perpendiculares à fibra (valores mínimos radiais e tangenciais).
- (5) Corte tangencial (valores mínimos) a considerar em flexão excessiva.
- (6) Módulos elásticos longitudinais medidos em flexão estática.

Ensaaios da madeira (1)

- Determinação da humidade por cozimento em vapor.
- Determinação da massa volumétrica (densidade).
- Determinação das propriedades mecânicas:
 - Compressão axial
 - Flexão dinâmica (através da absorção de energia de impacto à flexão)



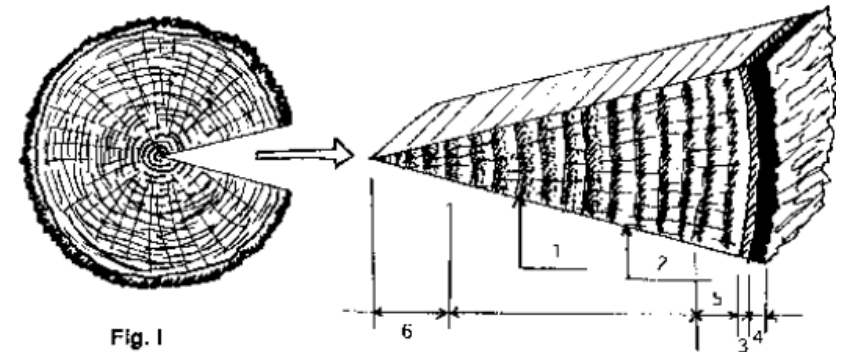
Ensaaios da madeira (2)

- Referências:

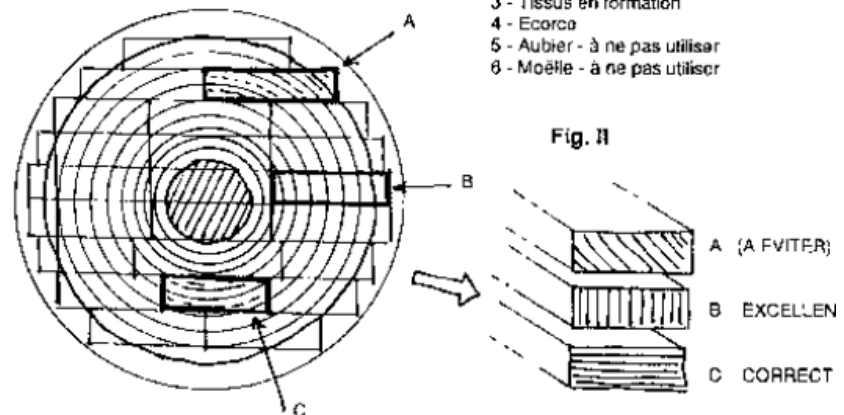
- Chapter 1 de l' AC 43.13-1B : Acceptable Methods, Techniques, and Practices - Aircraft Inspection and Repair de FAA
(http://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentid/99861)

Obtenção da madeira (1)

- O crescimento anual deve ocorrer paralelamente às faces.
- Salvo exceções (árvores de grande diâmetro), o crescimento anual apresenta uma curvatura, mas os anéis na diagonal devem ser evitados.



- 1 - Bois d'été (foncé)
2 - Bois d'hiver et de printemps (clair)
3 - Tissus en formation
4 - Ecorce
5 - Aubier - à ne pas utiliser
6 - Moëlle - à ne pas utiliser



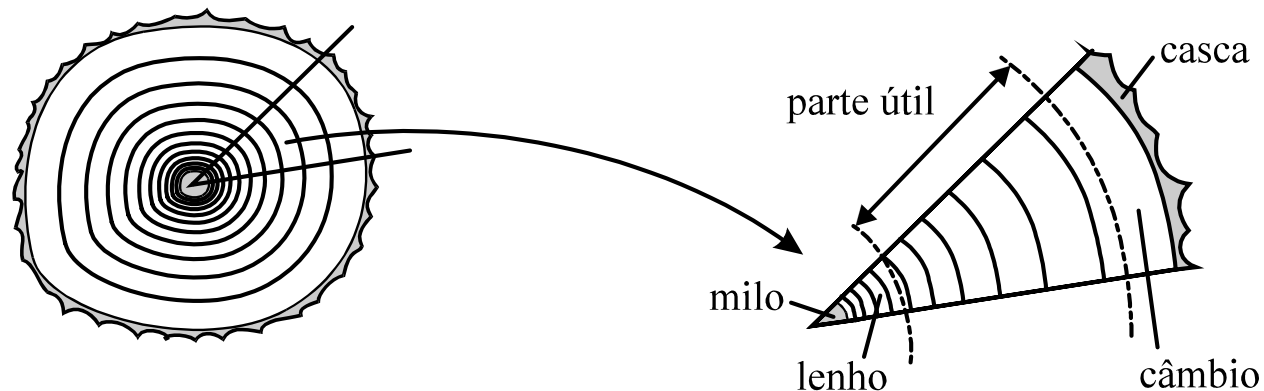
LE DÉBIT "SUR PLOT" (LE PLUS COURANT) FAIT APPARAÎTRE DES SENS DE FILS TRÈS DIFFÉRENTS SELON L'EMPLACEMENT DU MADRIER. CHOISIR DE PRÉFÉRENCE LES FILS "B" ou "C" - ÉVITER LE FIL "A".

Obtenção da madeira (2)

- Para ser utilizada na construção aeronáutica, a madeira tem que:
- Ter um **crescimento lento**:
 - Madeiras resinosas - 3 mm por ano
 - Madeiras duras - 2 mm pr ano
- Ter um **crescimento regular**:
 - Madeiras resinosas - inferior a 33%
 - Madeiras duras - inferior a 50%
- Ter as **fibras o mais próximas possíveis**.

Obtenção da madeira (3)

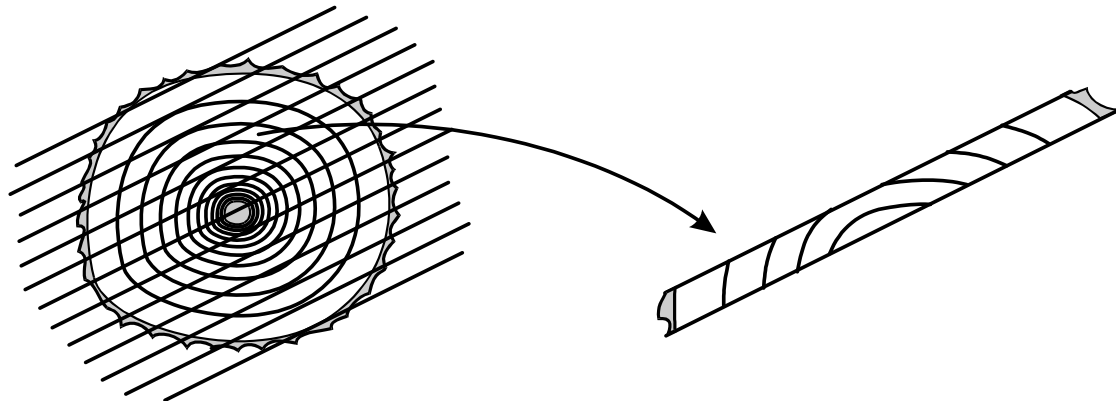
- O câmbio é a parte do tronco que se transforma em lenho à medida que o tronco cresce.
- Neste processo o amido transforma-se em tanino.



Corte da madeira (1)

- **Corte usual**

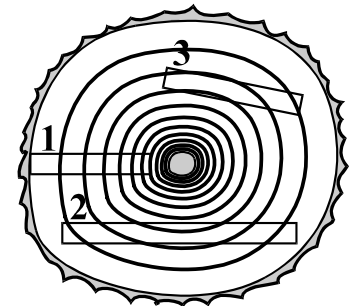
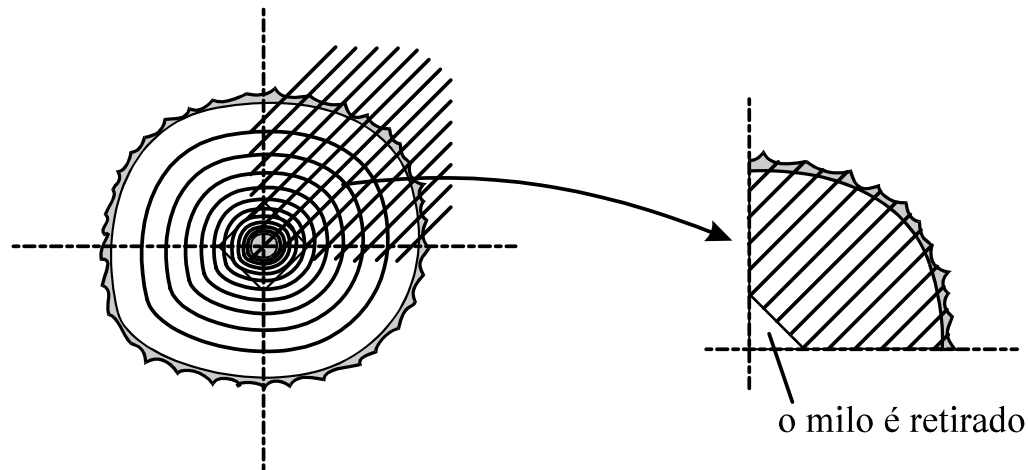
- As tábuas obtidas desta forma usual não são próprias para uso aeronáutico, uma vez que o corte das fibras não proporciona boas características mecânicas.



Corte da madeira (2)

- Corte para fins estruturais

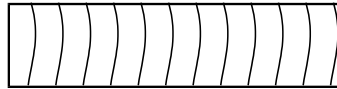
- Existem três tipos de corte principais que se usam de acordo com a aplicação pretendida:



Corte da madeira (3)

- Corte para fins estruturais

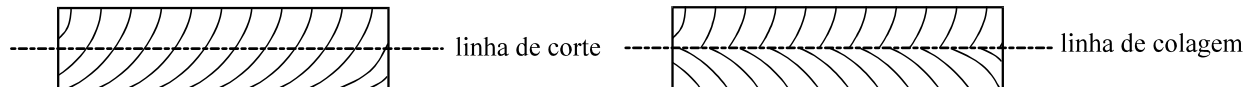
- 1. Usado para varetas



- 2. Usado para longarinas (empena com facilidade)



- 3. Usado para longarinas



- Quando se quer obter uma longarina mais resistente estruturalmente e com menos tendência a empenar pode cortar-se uma tábua a meio, rodá-la segundo o comprimento e depois colá-la novamente, como mostra a figura acima.

Corte da madeira (4)

- As peças de madeira devem ser obtidas de partes com as fibras alinhadas e **paralelas às fibras**.
- Pode admitir-se para as árvores resinosas um **desalinhamento das fibras de 7,5%** (7,5 cm por cada 1 m de comprimento).

Armazenagem

- A madeira cortada ou não, deve ser guardada plana, em local seco e não aquecido.
- Para assegurar uma boa circulação de ar em torno da madeira, é conveniente colocar as peças sobre estantes.
- Se as pranchas estão já cortadas, evita-se a sua deformação permanente juntando várias pranchas firmemente com a ajuda de adesivo, por exemplo.



Defeitos (1)

- As peças usadas não devem, na medida do possível, apresentar:
 - Nós
 - Poças de resina
 - Fibras anormalmente alinhadas (não torcidas, 4 faces paralelas e fibras alinhadas)
 - Entalhes
 - Lesões
 - Vermes ou insetos
 - Cogumelos
 - Coloração anormal (manchas)

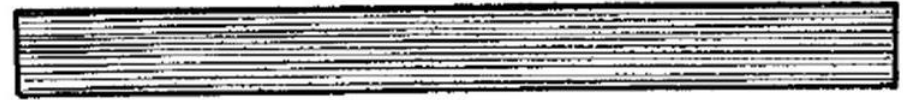


Fig. III : Fil rectiligne - Parfait



Fig. IV :

Angle maximum du fil 7 %



Noeud : Ø maxi 4 m/m



Fig. V : Dessous : poche de résine

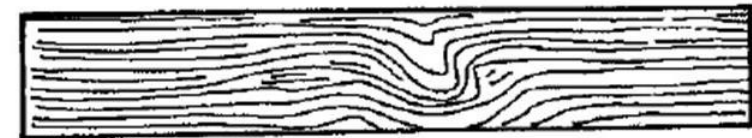


Fig. VI : Fil torse



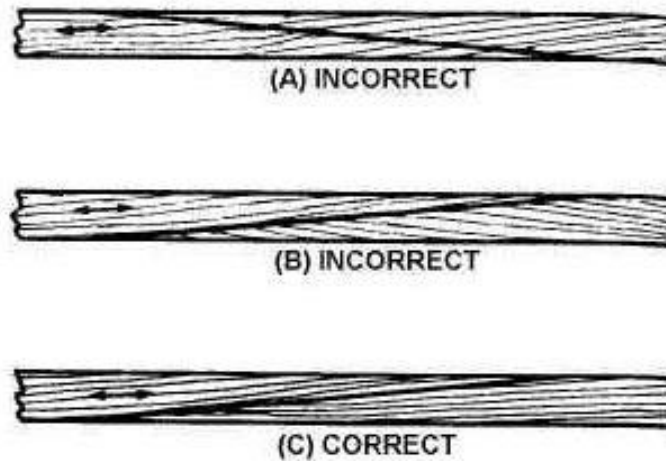
Teinte différente (à éliminer)

Defeitos (2)

- Para os nós e para as poças de resina, para simplificar, considera-se em geral que **nenhum nó deve ser maior do que 1/16 da largura da longarina, do tensor ou do componente.** O melhor é não haver nós.
- Nas árvores resinosas, as poças de resina são por vezes indetetáveis da superfície. **É por isso, prudente não usar peças com mais de 7 mm a 10 mm nas estruturas primárias.** Por exemplo, numa lâmina da longarina, é melhor sobrepor com colagem 3 pranchas de 7 mm do que usar apenas uma de 21 mm. Além disso, **o componente laminado tem uma resistência mecânica superior ao componente monobloco.**

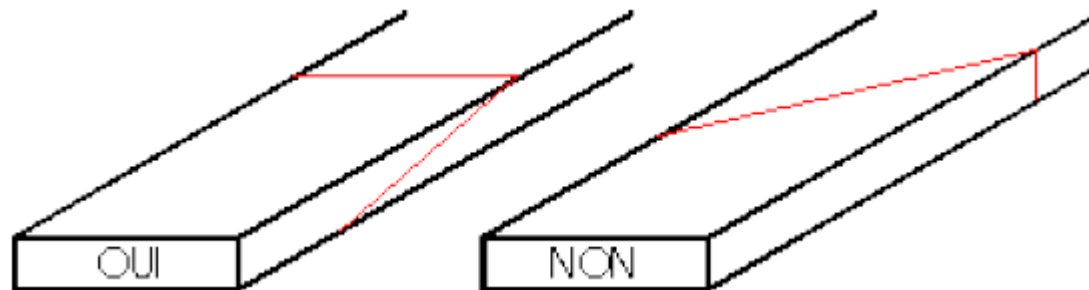
Emendas (1)

- Numa mesma estrutura é possível misturar vários tipos de madeira. No entanto, **não é permitido fazer emendas de madeiras diferentes.**
- A emenda deve preservar a orientação das fibras.



Emendas (2)

- Em peças sujeitas à **tração**, o comprimento da emenda deve ter pelo menos **20 vezes a espessura da peça**.
- Em peças sujeitas à **compressão**, o comprimento da emenda deve ter pelo menos **15 vezes a espessura da peça**, mas não é prejudicial usar a relação de 20 para 1.
- A emenda deve ser feita de modo a oferecer a maior área de colagem possível.



Contraplacado

- O contraplacado é constituído por muitas camadas finas coladas de madeira maciça orientadas alternadamente de 0° e 90° formando um compósito bidirecional de baixa espessura.
- É ideal para fazer painéis da fuselagem ou revestimento das asas e empenagens, pois tem boas relações de densidade/instabilidade e densidade/corte
- Em função de defeitos potenciais (nós, qualidade de alinhamento das fibras, etc.) e o tipo de colagem dos painéis, a qualidade do contraplacado é certificada em classes diferentes pelo Bureau Veritas.



Contraplacado de Bétula (1)

- Este contraplacado é feito de bétula originária da Finlândia. Tem cor clara e massa volúmica de 750 kg/m^3 .
- O contraplacado é utilizado em reforços locais, reforço de nervuras, zonas da alma da longarina fortemente solicitadas, bordo de ataque das empenagens por colagem de várias camadas de 0,4 mm.

Contraplacado de Bétula (2)

- Qualidade GLI com certificação Veritas:

Caractéristiques générales

Epaisseurs en mm	0,4	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0
Nombre de plis	3	3	3	3	3	4	5	6	8	10	12
Poids théoriques au M2 en Kg	0,300	0,600	0,750	0,900	1,125	1,500	1,875	2,250	3,000	3,750	4,500

Caractéristiques mécaniques

	RESISTANCE A LA TRACTION		
	Sens Longitudinal Kg./cm ²	Sens transversal Kg./cm ²	Sens Longit. + trans. Kg./cm ²
Valeurs minimales requises par la Germanischer Lloyd	700	450	1400
Exemples d'essais de contrôle réalisés par le bureau Veritas			
Epaisseur 1 mm*	1552	804	2356
Epaisseur 1,5 mm*	1303	812	2115
Epaisseur 2 mm*	1180	1248	2428
Epaisseur 3 mm**	1426	732	2158
Epaisseur 4 mm**	935	883	1818

Les caractéristiques réelles contrôlées sont nettement supérieures aux valeurs minimales exigées.

* Test N° HSK 400054

** Test N° HSK 499002

Contraplacado de Okumé

- O Okumé é uma madeira tropical, originária do Gabão, Guiné e Congo, de cor castanha alaranjada, bastante homogénea e de fibra regular.
- A massa volúmica é de 450 kg/m^3 .
- Contraplacado usado em grandes painéis de fuselagem e revestimentos de asa, com excelente razão massa/instabilidade.



Montagem de painéis de contraplacado

- Colagem de emenda de 10% (10 vezes a espessura).
- Pode usar-se agramos para manter os painéis sob pressão na posição durante a colagem.



Proteção sistemática de partes em madeira

- Pode proteger-se a madeira cobrindo-a com:
 - Tecido de poliéster e dope
 - Fibra de vidro ou de carbono e resina epóxi
 - Verniz de poliuretano colorido
- Atenção que não se pode usar proteção nas superfícies que serão coladas, pois podem degradar-se as propriedades.



Durabilidade (1)

- A durabilidade de partes em madeira depende da:
 - Qualidade da colagem
 - Manutenção
- A reparação de uma célula em madeira, se for executada corretamente, não prejudica a massa da estrutura.
- Com efeito, uma zona defeituosa pode ser facilmente retirada e substituída por um bocado da mesma qualidade, desde que sejam respeitadas as regras de emenda.

Durabilidade (2)

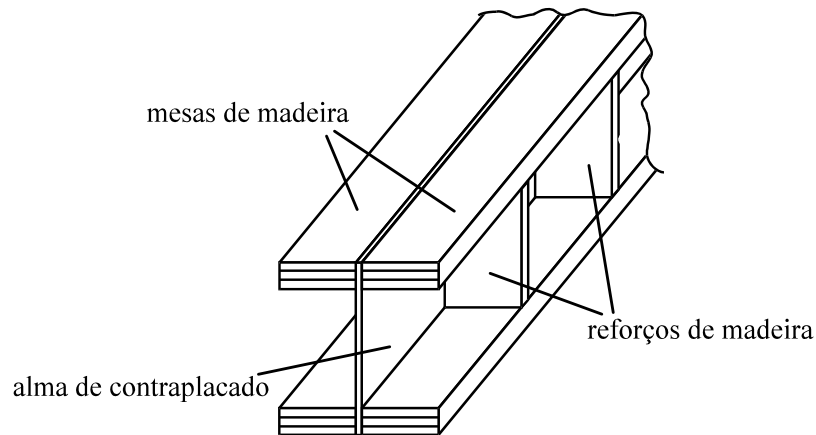


Método de colagem

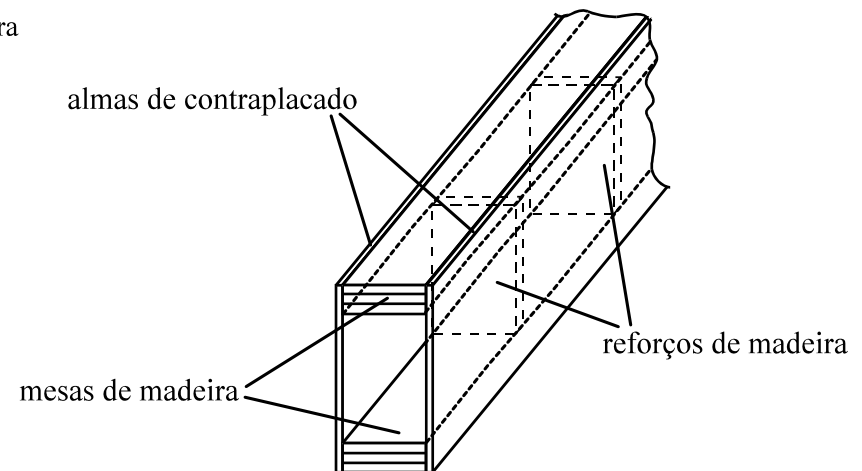
- A cola mais empregada atualmente é cola de epoxy que é uma cola forte e resistente à humidade.
- Quando se unem duas superfícies deve ter-se em conta o seguinte:
 - não lixar demasiado as superfícies;
 - usar um raspador para tornar as superfícies ásperas;
 - soprar o pó para evitar que este obstrua os poros;
 - passar cola nas duas superfícies de contacto para evitar a formação de bolhas, o que enfraqueceria a colagem;
 - comprimir com grampos com uma pressão de cerca de 10 N/cm^2 ;
 - se a pressão for muito grande a película de cola fica muito fina
 - pelo contrário, se a pressão for muito pequena a cola não penetra na madeira.

Técnicas construtivas Longarinas (1)

- **Viga com secção em I**



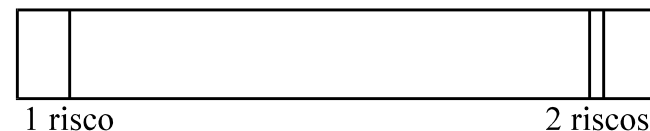
- **Viga em caixão**



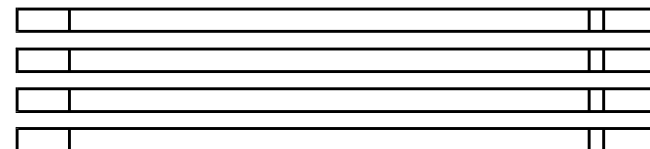
Técnicas construtivas Longarinas (2)

- Numa longarina de madeira as mesas das longarinas não podem ser construídas de uma tábuas só para que não haja tendência para o empeno.
- Os barrotes de madeira são cortados em tábuas de 7 a 15 mm eliminando-se as zonas fracas.
- Cola-se o conjunto das tábuas, alternando a sua direcção em relação à posição original e passando cola nas duas superfícies.

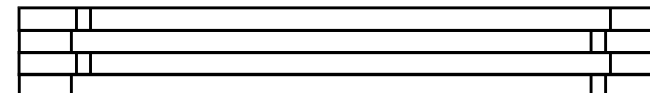
1. barrote original



2. abre-se o barrote em tábuas



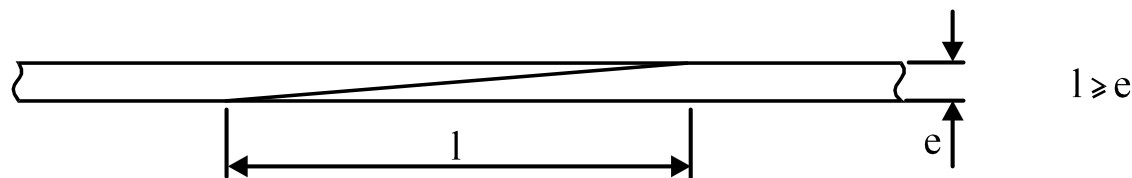
3. cola-se, invertendo a direcção das tábuas



Técnicas construtivas

Longarinas (3)

- Quando as tábuas não tiverem comprimento suficiente podem ser emendadas previamente.
- O chanfro na zona da colagem, para que esta fique resistente, deve ter uma inclinação à volta de:
 - 20 para 1 nas partes sujeitas à tração.
 - 15 para 1 nas partes sujeitas à compressão.



Técnicas construtivas Longarinas (4)

- Quando se faz o chanfro é necessário ter em atenção a orientação das fibras da madeira aquando da colagem.



incorrecto

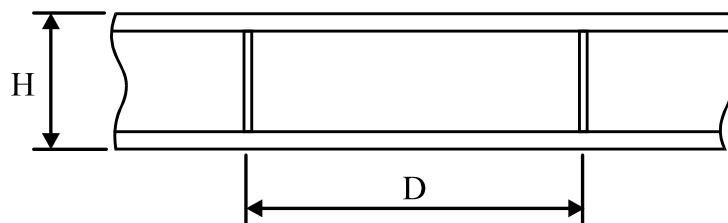


incorrecto



correcto

- Entre as mesas superior e inferior da longarina colocam-se reforços verticais de madeira para manter as mesas rígidas entre si e evitar a sua instabilidade.

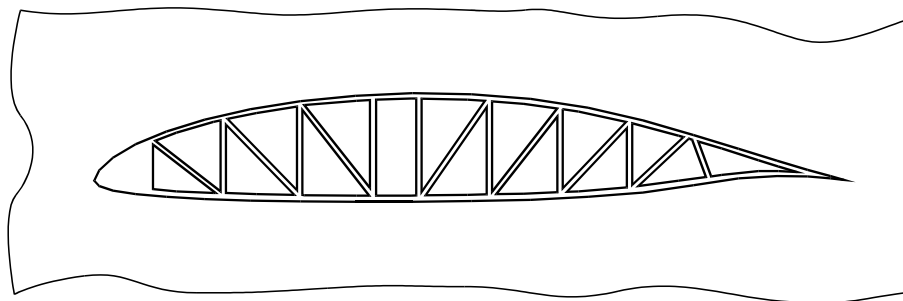


$$2H \leq D \leq 3H$$

Técnicas construtivas

Nervuras (1)

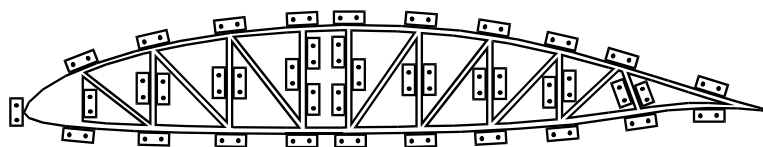
- Nervuras em treliça
- O método de construção das nervuras treliçadas em madeira é descrito abaixo.
- 1. Traçam-se os contornos da nervura numa placa de contraplacado.



Técnicas construtivas

Nervuras (2)

- 2. Colocam-se tacos de madeira em torno dos contornos do perfil, sendo a sua espessura ligeiramente inferior à espessura da nervura.

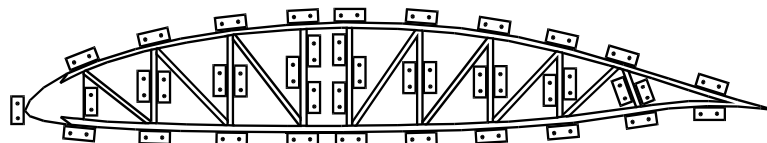


- 3. Passa-se cera sobre o painel ou cola-se fita adesiva (fita de embrulho) para funcionar como desmoldante.
- 4. Cortam-se as ripas que vão formar a nervura e monta-se a mesma sem a colar para verificar se estão correctas. Nesta fase ajustam-se as ripas.

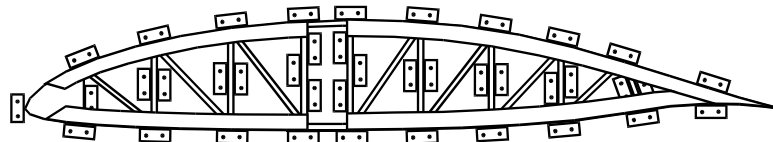
Técnicas construtivas

Nervuras (3)

- 5. Colocam-se as varetas na sua posição, colando-as. Espera-se que seque.



- 6. Colocam-se chapas de contraplacado de reforço e deixa-se secar.

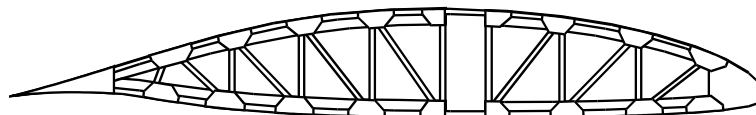


- 7. Retira-se a nervura do molde e corta-se o excesso do bordo de ataque. Também se lixa o excesso lateral das faixas de contraplacado.

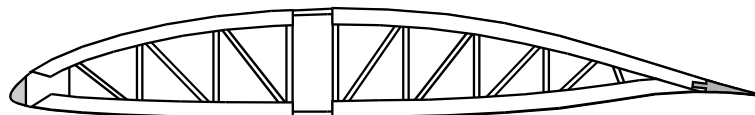
Técnicas construtivas

Nervuras (4)

- 8. Vira-se a nervura e colocam-se os reforços de contraplacado no outro lado da nervura.



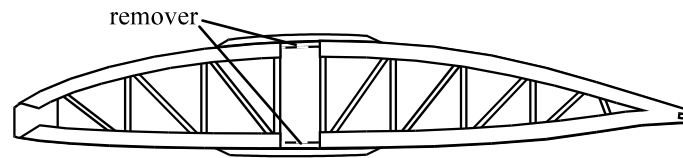
- 9. Remove-se o excesso na lixadeira ou com um formão e abrem-se os rasgos nos bordos de ataque e de fuga.



Técnicas construtivas

Nervuras (5)

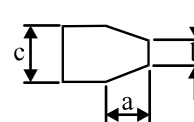
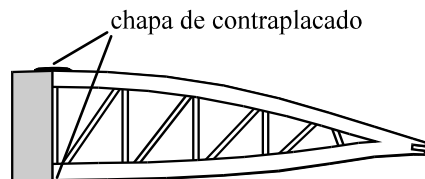
- 10. Colocam-se duas ripas na região da longarina e removem-se as partes internas para dar passagem à longarina. Depois de colada a nervura na longarina removem-se as ripas.



Técnicas construtivas

Nervuras (6)

- Colagem da nervura na longarina
- Sabe-se que a colagem de topo não funciona. A cola não suporta grandes esforços de tração (ou compressão) mas sim esforços de corte.
- 1. Cola-se a nervura à longarina. São necessárias chapas de reforço ligando a nervura à longarina, para que a cola trabalhe ao corte.

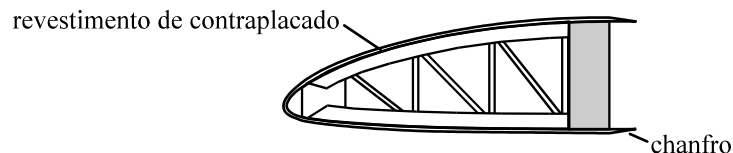


$$a \approx 10b$$
$$c \approx 5b$$

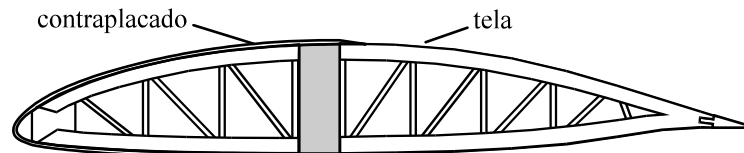
Técnicas construtivas

Nervuras (7)

- 2. Aplica-se o revestimento de contraplacado. Deixa-se um excesso de contraplacado para a parte traseira da nervura para evitar que a junção entre o contraplacado e a tela se descole.



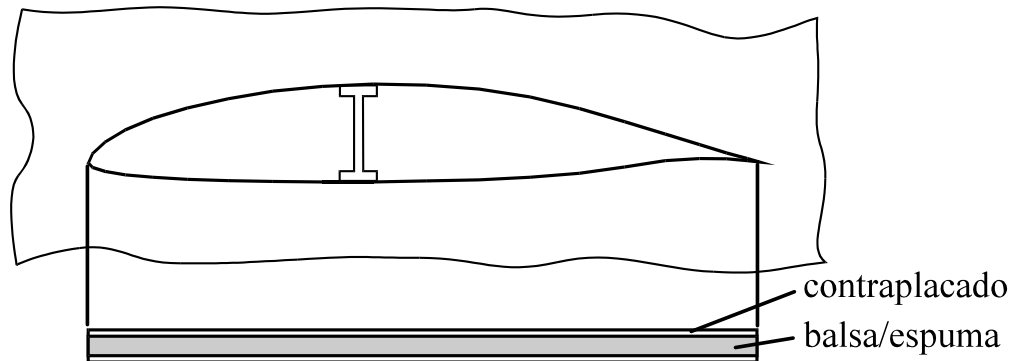
- 3. Aplica-se o revestimento de tela na parte traseira da asa.



Técnicas construtivas

Nervuras (8)

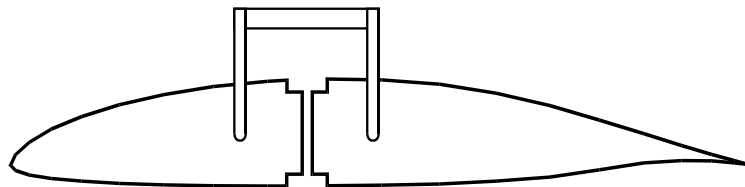
- Nervuras maciças
- As nervuras pequenas podem fazer-se maciças porque, apesar de mais pesadas, são mais simples e rápidas de construir.
- 1. Desenha-se o perfil no material a cortar (sanduiche de contraplacado e balsa ou contraplacado e espuma). Corta-se numa serra tico-tico ou de fita e retira-se o excesso.



Técnicas construtivas

Nervuras (9)

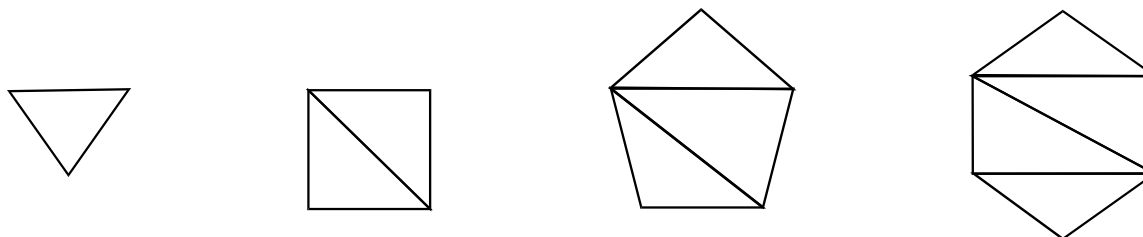
- 2. Antes de fazer o corte para a longarina monta-se um estaleiro em cada nervura para garantir precisão na geometria.



Técnicas construtivas

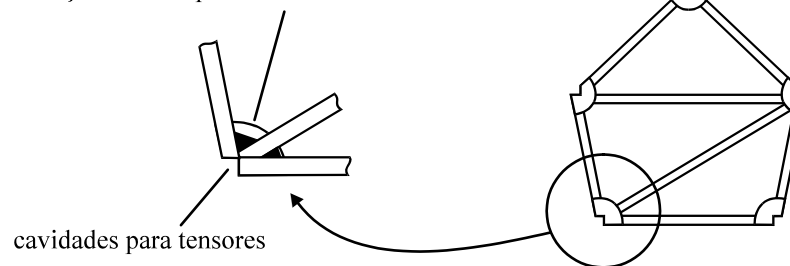
Cavernas (1)

- Cavernas poligonais
- Estas cavernas são compostas por triângulos.



- 1. Cavernas do cone de cauda

reforço de contraplacado em ambos os lados



Técnicas construtivas

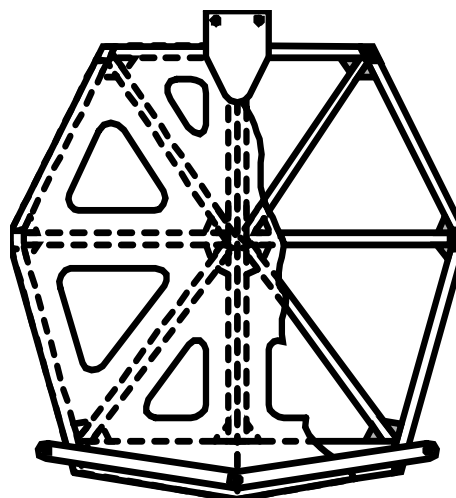
Cavernas (2)

- 2. Caverna de fixação asa/fuselagem
- A caverna à qual a asa é fixada tem que ser reforçada para suportar os esforços provenientes das cargas aplicadas nas asas.
- Para isso usa-se uma estrutura treliçada mais complexa e toda a caverna é coberta com chapa de contraplacado.
- Podem fazer-se furos nas zonas do contraplacado onde as tensões são mínimas para permitir que os controlos e outro equipamento possam passar e para tornar mais leve o conjunto.

Técnicas construtivas

Cavernas (3)

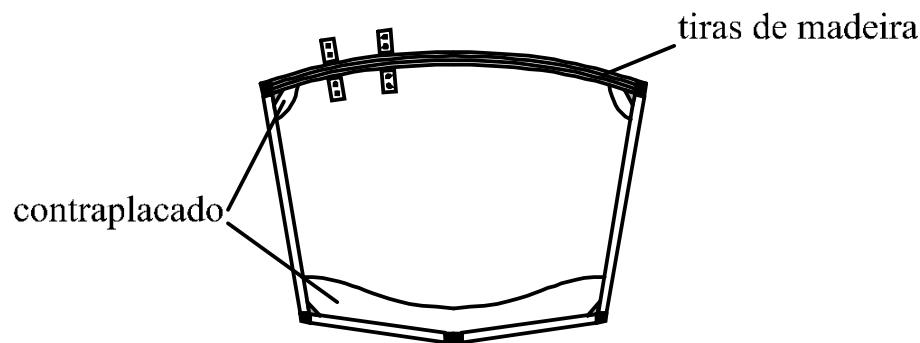
- Na figura está representada uma caverna deste tipo com as fixações para as asas.



Técnicas construtivas

Cavernas (4)

- 3. Caverna da parte dianteira da fuselagem

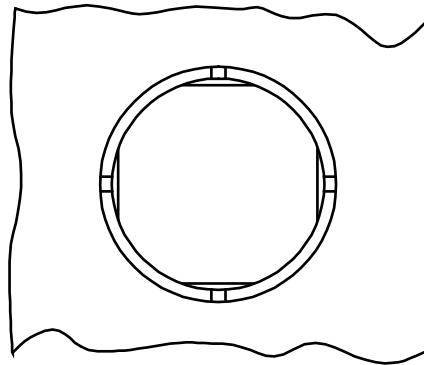


- Os furos para a passagem dos tensores são feitos após o término da caverna inteira, inclusivé com a montagem dos reforços de contraplacado.

Técnicas construtivas

Cavernas (5)

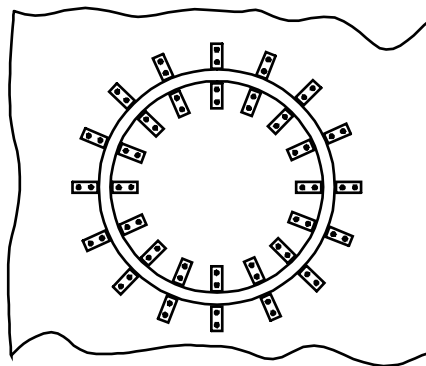
- Cavernas curvilíneas
- Estas cavernas podem ser circulares, elipsóides e combinações destas.
- 1. Traça-se o contorno da caverna sobre uma chapa grossa de contraplacado (aproximadamente 15 mm de espessura).



Técnicas construtivas

Cavernas (6)

- 2. Delimitam-se os contornos externos e internos da caverna com pequenos tacos de madeira que são colocados tangentes ao contorno.

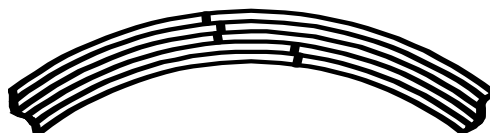


- 3. Preparam-se tiras de madeira. Passa-se cera ou fita desmoldante sobre o molde para impedir que as tiras que formam a caverna adiram ao contraplacado.

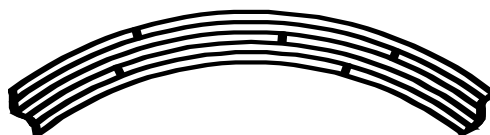
Técnicas construtivas

Cavernas (7)

- 4. Passa-se cola sobre ambos os lados das tiras e faz-se a montagem tendo atenção para que as emendas não coincidam. A construção em tiras permite que a madeira adquira a forma final mais facilmente e que se veja algum defeito que exista no interior da madeira.



errado

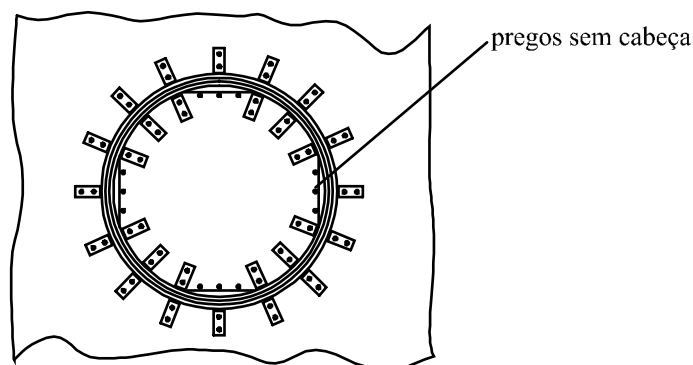


correcto

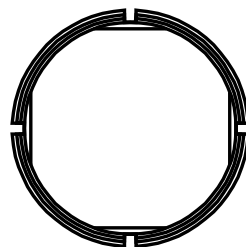
Técnicas construtivas

Cavernas (8)

- 5. Espera-se que seque. Retiram-se os tacos exteriores e interiores e aplicam-se os reforços executados em tiras de madeira.



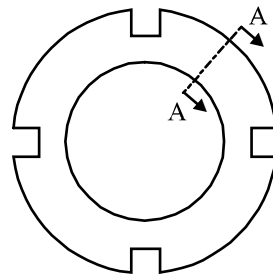
- 6. Retira-se a caverna do molde e fazem-se as passagens para os tensores.



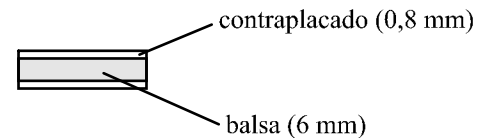
Técnicas construtivas

Cavernas (9)

- Cavernas maciças
- Estas cavernas são usadas em secções de pequenas dimensões.



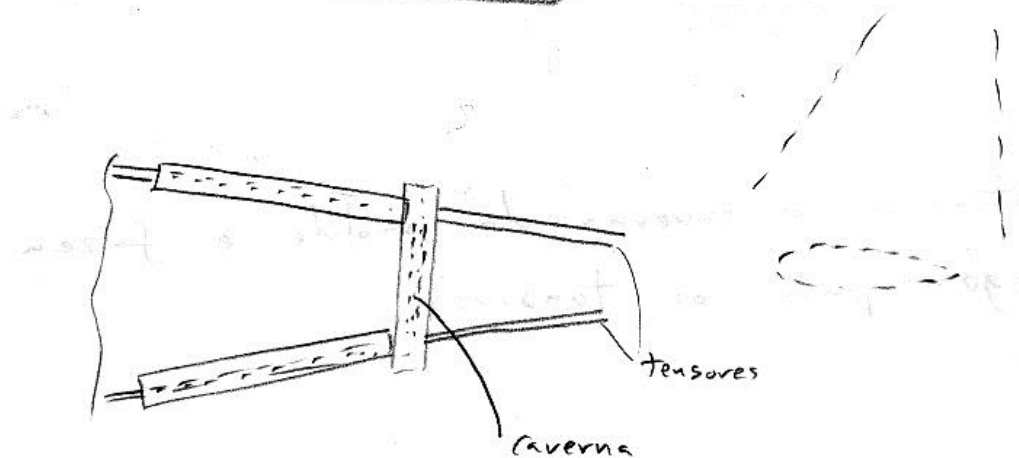
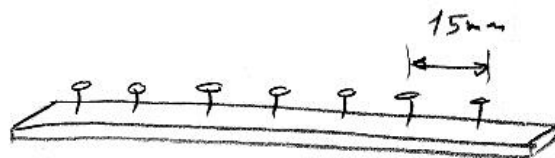
SECÇÃO A-A



Técnicas construtivas

Réguas (1)

- As réguas são tiras de contraplacado com cerca de 1 mm de espessura, 15 mm de largura e comprimento adequado para ajudar na aplicação das cavernas na fuselagem.



Técnicas construtivas

Réguas (2)

- 1. Marcam-se os limites que não vão ser colados nos tensores ou cavernas.
- 2. Enverniza-se com epóxi diluída em álcool as partes que ficam para dentro da aeronave.
- 3. Passa-se adesivo de epóxi em ambas as superfícies.
- 4. Fixa-se a caverna na sua posição definitiva e deixa-se secar.
- 5. Retiram-se as réguas com um alicate. Cobrem-se os furos deixados pelos pregos com uma pasta de epoxy e serradura.

Técnicas construtivas Montantes

- Os montantes feitos em madeira são construídos a partir de tábuas coladas umas às outras.
- Quando estes são ocos é necessário retirar o interior antes de proceder à colagem das tábuas.
- A forma exterior é dada posteriormente.

