

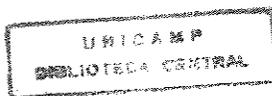
Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Química
Área de Concentração: Ciência e Tecnologia de
Materiais

Influência do Ciclo de Cura da Resina Fenólica nos
Testes de Inflamabilidade, Densidade e Emissão de
Calor

Dissertação submetida à Comissão de Pós-Graduação
da Faculdade de Engenharia Química - UNICAMP,
como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Química.

Autora: Cristiane Cossermelli Haik

Orientadora: Lúcia Helena Innocentinni Mei



98 047 66

| | |
|----------------------------|---------------------------------------|
| UNIDADE | BC |
| N.º CHAMADA: | T/UNICAMP |
| | #125i |
| V. | E. |
| T. | 6 / 30019 |
| PRG. | 284/97 |
| C <input type="checkbox"/> | D <input checked="" type="checkbox"/> |
| PREÇO | R\$ 11,00 |
| DATA | 08/05/97 |
| N.º CPD | |

CM-00098037-2

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

H125i Haik, Cristiane Cossermelli
Influência do ciclo de cura da resina fenólica nos testes de inflamabilidade, densidade e emissão de calor / Cristiane Cossermelli Haik.--Campinas, SP: [s.n.], 1995.

Orientadora: Lúcia Helena Innocentini Mei
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Resinas Fenólicas. 2. Compósitos poliméricos. 3. Resinas. 4. Fibras. I. Mei, Lúcia Helena Innocentini. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Esta versão corresponde à redação final da Tese de Mestrado defendida pela Cristiane Cossermelli Haik, e aprovada pela Comissão Julgadora em 02/03/95.



Orientadora Prof. Dra. Lúcia Helena Innocentini Mei

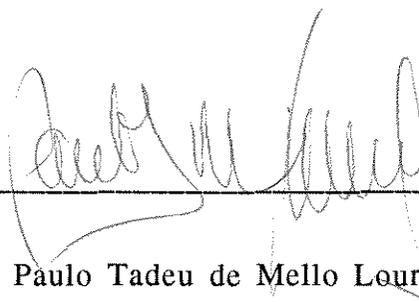
Tese defendida e aprovada em 02 de março de 1995, pela banca examinadora
constituída pelos professores:



Prof.ª. Dr.ª. Lúcia Helena Innocentini Mei



Prof. Dr. Elias Basile Tanbourgi



Prof. Dr. Paulo Tadeu de Mello Lourenção

Dedico a minha tese aos meus pais,
que sempre me apoiaram e incentivaram
durante a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar a minha gratidão

- À Prof. Dra. Lúcia Helena Innocentini Mei, pela compreensão, orientação e dedicação prestada.
- À Empresa Brasileira de Aeronáutica - EMBRAER, pelo fornecimento dos materiais e equipamentos utilizados.
- À todos os engenheiros e técnicos do Departamento de Projetos e em especial a Marcos Maciel, Carlos Eurico Collares, Sergio Mayer, Francisco de Assis Resende, Fernanda De Carla M. Kalvala.
- Ao técnico do Laboratório de Flamabilidade, Euler José Sampaio, pela colaboração nos testes realizados.
- Às colegas Inês Lopes Garcia e Marisa Batiston, pela amizade durante todo o curso de Mestrado.
- Ao Humberto Puccinelli, pelo incentivo durante toda a elaboração deste trabalho e também por ter cedido o microcomputador e impressora para o mesmo.
- À CAPES pela bolsa concedida.

ÍNDICE GERAL

| | |
|--|-----------|
| Resumo | 06 |
| Abstract | 07 |
| Proposta da Tese | 08 |
| Introdução | 09 |
| I - COMPÓSITOS | 10 |
| I.1 - Introdução..... | 11 |
| I.2 - Resina Fenólica | 13 |
| I.3 - Reforços | 17 |
| I.3.1 - Fibra de Vidro | 21 |
| I.3.2 - Fibra de Carbono | 24 |
| I.3.3 - Fibra de Aramida | 27 |
| I.4 - Materiais Pré-Impregnados | 28 |
| II - MATERIAIS E MÉTODOS | 30 |
| II.1 - Requisitos da F.A.A. | 31 |
| II.2 - Descrição dos equipamentos utilizados | 33 |
| II.2.1 - Inflamabilidade | 34 |
| II.2.2 - Densidade de Fumaça | 39 |
| II.2.3 - Emissão de Calor | 42 |

| | |
|--|----|
| III - PROCESSAMENTO DO MATERIAL | 44 |
| III.1 - Fabricação dos corpos de prova | 45 |
| III.2 - Ciclo de cura | 47 |
| IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES | 49 |
| IV.1 - Variação de temperatura | 51 |
| IV.2 - Variação de tempo | 70 |
| V - CONCLUSÕES | 82 |
| V.1 - Relação custo/benefício | 84 |
| V.2 - Sugestões para trabalhos futuros | 85 |
| VI - BIBLIOGRAFIA | 86 |
| VII - ANEXO I- TABELAS COM DADOS EXPERIMENTAIS DOS GRÁFICOS.... | 90 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| 1 - Material Composto | 12 |
| 2 - Obtenção dos tecidos | 19 |
| 3 - Principais tipos de reforços | 20 |
| 4 - Fabricação da fibra de vidro | 23 |
| 5 - Fabricação da fibra de carbono | 25 |
| 6 - Impregnação da resina na fibra pelo processo de solvente | 28 |
| 7 - Campana do teste de Inflamabilidade | 35 |
| 8 - Suporte para prender a amostra do teste de Inflamabilidade | 36 |
| 9 - Bico de Bunsen com marcação para o teste de Inflamabilidade | 37 |
| 10 - Campana do teste de Densidade de Fumaça | 40 |
| 11 - Orientação dos tecidos na fabricação dos laminados | 45 |
| 12 - Moldagem de um laminado | 46 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| 01 - Medida de emissão de calor | 42 |
| 02 - Ciclo de cura realizado na EMBRAER | 47 |
| 03 - Inflamabilidade da amostra de fibra de vidro | 52 |
| 04 - Densidade de Fumaça da amostra de fibra de vidro | 53 |
| 05 - Emissão de Calor da amostra de fibra de vidro | 54 |
| 06 - Inflamabilidade da amostra de fibra de aramida | 56 |
| 07 - Densidade de Fumaça da amostra de fibra de aramida | 57 |
| 08 - Emissão de Calor da amostra de fibra de aramida | 58 |
| 09 - Inflamabilidade da amostra de fibra de carbono | 60 |
| 10 - Densidade de Fumaça da amostra de fibra de carbono | 61 |
| 11 - Emissão de Calor da amostra de fibra de carbono | 62 |
| 12 - Comparação entre os valores de Inflamabilidade das três amostras | 63 |
| 13 - Comparação entre os valores de Densidade de Fumaça das três amostras | 64 |
| 14 - Comparação entre os valores de Emissão de calor das três amostras | 65 |
| 15 - Inflamabilidade de amostras de fibra de vidro com resinas de diferentes fabricantes | 67 |
| 16 - Densidade de Fumaça de amostras de fibra de vidro com resinas de diferentes fabricantes | 68 |
| 17 - Emissão de Calor de amostras de fibra de vidro com resinas de diferentes fabricantes | 69 |
| 18 - Inflamabilidade de amostras de fibra de vidro curadas em tempos diferentes | 71 |

| | |
|---|----|
| 19 - Densidade de Fumaça de amostras de fibra de vidro curadas em tempos diferentes | 72 |
| 20 - Emissão de Calor de amostras de fibra de vidro curadas em tempos diferentes | 73 |
| 21 - Inflamabilidade de amostras de fibra de aramida curadas em tempos diferentes | 75 |
| 22 - Densidade de Fumaça de amostras de fibra de aramida curadas em tempos diferentes | 76 |
| 23 - Emissão de Calor de amostras de fibra de aramida curadas em tempos diferentes | 77 |
| 24 - Inflamabilidade de amostras de fibra de carbono curadas em tempos diferentes | 79 |
| 25 - Densidade de Fumaça de amostras de fibra de carbono curadas em tempos diferentes | 80 |
| 26 - Emissão de Calor de amostras de fibra de carbono curadas em tempos diferentes | 81 |

RESUMO

Com o intuito de se estudar os materiais compostos utilizados em interiores de aeronaves, a EMBRAER (Empresa Brasileira de Aeronáutica S/A), juntamente com o Departamento de Tecnologia de Polímeros da Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), resolveu se dedicar a um estudo mais detalhado sobre o efeito do processo de cura de compósitos com resina fenólica e das variáveis principais do processo, que influencia nas propriedades de flamabilidade (Inflamabilidade, Densidade de Fumaça e Emissão de Calor).

A cura do compósito é feita em autoclave, com pressão e vácuo, num tempo e temperatura definidos.

Independente da fibra utilizada, o processo de cura na temperatura de 150 °C se mostrou com resultados mais coerentes para os testes de flamabilidade.

A fibra de vidro não interfere nos testes de flamabilidade, o que não ocorre com a fibra de aramida, provavelmente devido à sua natureza orgânica.

O tempo de cura do compósito com resina fenólica é por volta de três horas, com base nos melhores resultados obtidos para os testes de flamabilidade.

ABSTRACT

With the intention of studying the composite materials used inside the airplane, the EMBRAER (Empresa Brasileira de Aeronáutica S/A), and the Department of Polymer Technology of the Campinas State University (UNICAMP), we decided to study in detail the effect of the cure process of the composites with phenolic resins and the main variables of the process that can influence the flammability, smoke density and heat release properties.

The cure process of the composites is done in one autoclave, with vacuum and pressure, time and temperature controlled.

Independently of the fiber utilized specified, the cure process at 150°C showed the best results for the flammability tests.

The fiberglass doesn't interfere in the flammability tests but the kevlar fiber does, probably due to its organic nature.

The cure time of the phenolic resin is about 3 hours, based on the best results obtained for the flammability.

PROPOSTA DA TESE

Este trabalho foi sugerido pelos engenheiros da Empresa Brasileira de Aeronáutica S/A (EMBRAER), Marcos Maciel e Carlos Eurico Colares, devido à necessidade de um estudo mais detalhado e minucioso sobre o ciclo de cura da resina fenólica, para conhecer a sua influência sobre as propriedades de inflamabilidade, liberação de fumaça e emissão de calor. Deste modo, resolveram desenvolver um trabalho em conjunto com o Departamento de Tecnologia de Polímeros da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP, envolvendo uma dissertação de Mestrado, onde os objetivos principais eram:

- 1 - Estudar o ciclo de cura de pre-pregs de fibras de vidro, aramida e carbono impregnados com resina fenólica.
- 2 - Encontrar o ciclo de cura adequado para obter as melhores propriedades de flamabilidade e com obtenção de peças que atendam aos requisitos estéticos e estruturais. Estudando o ciclo de cura, poderíamos saber se ele interferiria ou não nas propriedades de flamabilidade.
- 3 - Fazer uma análise sobre o custo de se curar peças no tempo e temperatura ideais e verificar se poderemos aplicar o que estudamos na linha de produção das aeronaves (benefício).

INTRODUÇÃO

Com a evolução dos materiais poliméricos, os quais vem sendo cada vez mais empregados na indústria aeronáutica, houve a necessidade de um estudo mais aprofundado dos materiais utilizados no interior das aeronaves.

Em meados de 1985, na Inglaterra, um pequeno incêndio dentro de uma aeronave provocou a morte de todos os passageiros, mesmo após seu total controle, pois os vários tipos de materiais que compunham seu interior, eliminaram gases tóxicos com o fogo, impedindo a sobrevivência dos mesmos.

Desde então, a F.A.A. (Federal Aviation Administration) criou o requisito nº 25.853, que regulamenta a quantidade máxima de gases tóxicos emitidos, a auto extinção na queima e o calor emitido pelos materiais para revestimento de interiores.

No sentido de se adequar ainda mais a estes requisitos, a EMBRAER (Empresa Brasileira de Aeronáutica S/A), juntamente com o Departamento de Tecnologia de Polímeros da Faculdade de Engenharia Química da Universidade de Campinas (UNICAMP), resolveu se dedicar a um estudo mais detalhado sobre o efeito do processo de cura e das variáveis principais do processo que influenciam nas propriedades de inflamabilidade, densidade de fumaça e emissão de calor dos compósitos atualmente utilizados pela Embraer.

Tais compósitos tem em sua formulação básica, resinas fenólicas, as quais possuem a propriedade de auto-extinção sem eliminação de gases tóxicos. Assim, materiais autoextinguíveis e com alto desempenho mecânico são obtidos quando se utilizam fibras textéis, de vidro, de carbono ou de aramida, impregnados com esta resina.

A definição, a importância e as aplicações dos compósitos serão detalhadas no próximo item.

COMPÓSITOS

1.1 - INTRODUÇÃO

O termo compósito, em materiais compostos, significa uma ou mais fases descontínuas embebidas numa fase contínua, combinadas numa escala macroscópica para produzir um material com as propriedades desejadas. Geralmente a fase descontínua é mais dura e resistente que a fase contínua e é conhecida como reforço ou filamento e a fase contínua é chamada de matriz ou resina.[2]

É importante lembrar que as propriedades dos compósitos são principalmente controladas pelas propriedades de seus materiais constituintes, pela distribuição, tamanho e geometria do reforço os quais governam a homogeneidade do produto.

A fração em peso ou volume dos materiais constituintes influenciam nas novas propriedades do composto e é considerado um fator importante e decisivo. Assim, torna-se necessário conhecer os materiais constituintes e o processo de fabricação empregado para que se possa prever o comportamento final do compósito obtido.

O uso de materiais poliméricos em compósitos está ligado à sua baixa densidade, ao processamento a temperaturas mais baixas que os materiais convencionais e à sua fácil conformação.

A maior parte dos compósitos apresenta uma matriz contínua que aglomera o reforço fibroso, como representado na figura 1.

Os materiais compostos usados neste trabalho são: fibras de vidro, aramida e carbono como reforço, e resina fenólica como matriz.

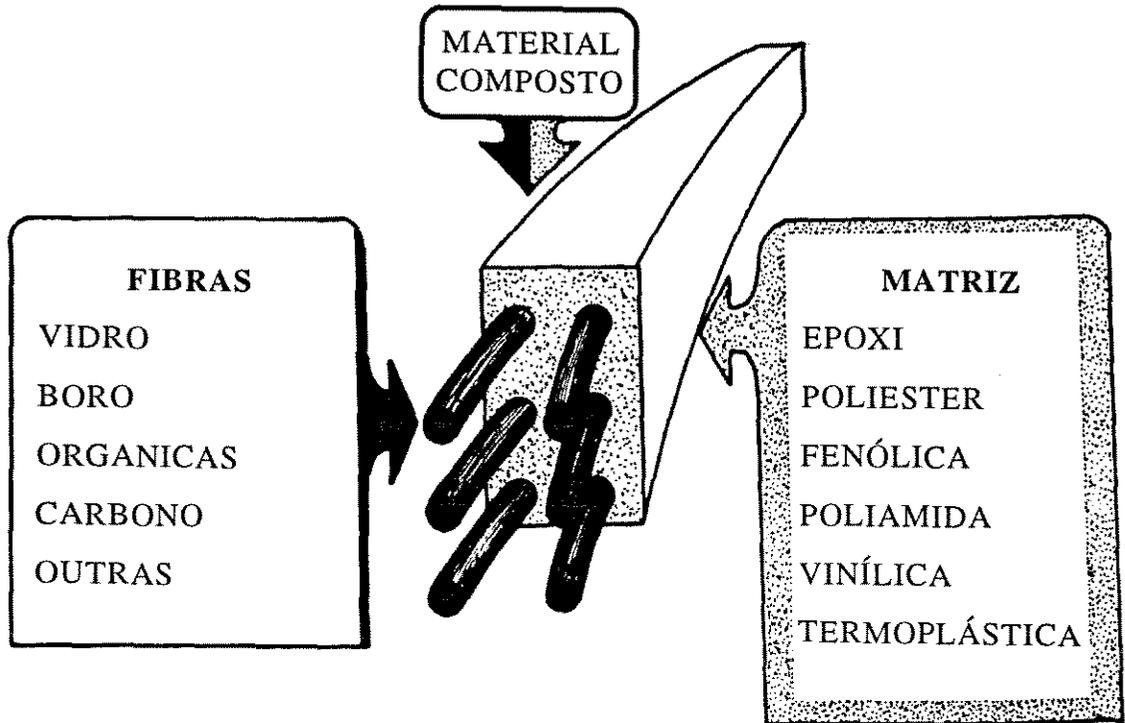
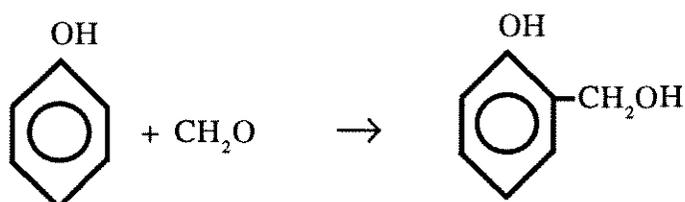


FIGURA 1: Material composto

1.2 - RESINA FENÓLICA

A matriz dos materiais compostos tem por finalidade básica formar uma liga com o reforço.

Resinas fenólicas são obtidas pela condensação de fenóis (C_6H_5OH) e aldeídos do tipo formaldeído (HCHO). O processo de polimerização é feito por etapas no qual as duas espécies misturadas na reação podem reagir com cada outra. Seja a reação do fenol com o formaldeído, fase esta chamada de meticol fenóis:[30]



Acredita-se que as cargas metálicas do tipo antimônio e bromo já estejam incorporadas ao formaldeído quando iniciam a mistura.

Polímeros termofixos são classificados em estágios A, B e C, de acordo com sua comparação ao ponto de gel. Um polímero no estágio A é solúvel e fundível. Um polímero no estágio B é bem fundível mas pouco solúvel e um polímero no estágio C é altamente reticulado e não é fundível ou solúvel. O pré polímero fornecido pelos fabricantes se encontra no estágio B. A subsequente polimerização do pré polímero acontece através do estágio C, usualmente por aquecimento. [30]

O período após o ponto de gel é chamado de período de cura (estágio C). Se este período é atingido lentamente ou rapidamente, irá influenciar diretamente nas propriedades dos produtos desejados.

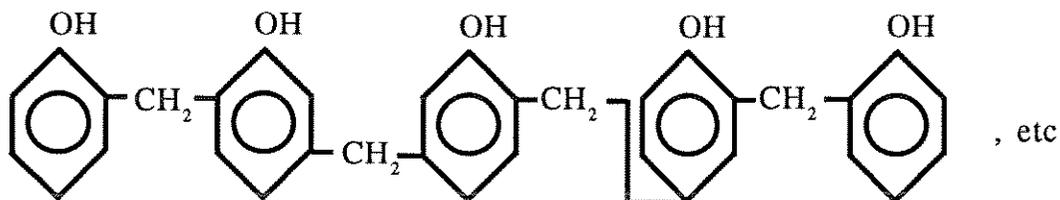
Um termofixo completamente polimerizado não mais está sujeito ao escoamento

e não pode ser processado dentro de um objeto. Como alternativa, o fabricante recebe uma resina polimerizada incompleta - chamada prepolímero - e a polimerização (reticulação) é completada durante a etapa de fabricação. Como exemplo, um prepolímero pode fluir dentro de um molde apropriado e se solidificar na forma de um objeto desejado, completando a polimerização. [30]

A teoria do processo de reticulação e os parâmetros que a controlam tem sido largamente discutidos. O controle deste processo é extremamente importante no comércio de plásticos termofixos [30], devido as quantidades de produtos existentes.

A natureza química do fenol e do aldeído, o tipo e a quantidade do catalizador utilizado na mistura e o tempo e temperatura de reação influenciam diretamente nas características da resina obtida.[1]

A reação do fenol com o formaldeído e a adição de cargas metálicas do tipo antimônio e bromo, resultam num pré-polímero o qual é utilizado para impregnar os reforços, podendo apresentar estruturas da forma abaixo:

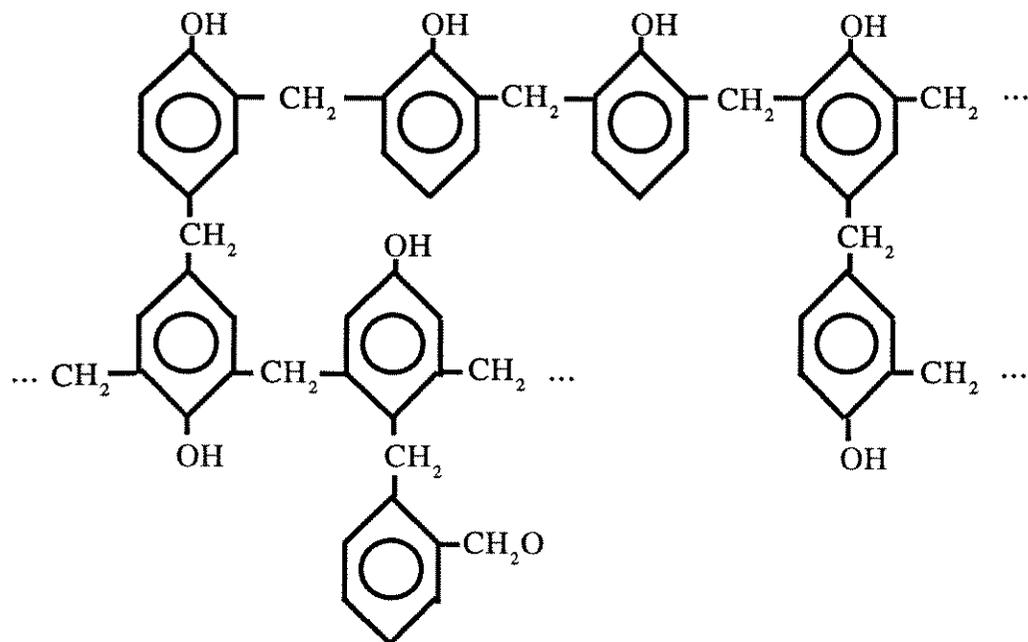


onde as posições orto e para ocorrem de maneira aleatória. [9] . Neste estágio, temos a polimerização da resina fenólica, com todos os aditivos antichama já incorporados à cadeia.

Assim, tecidos de fibras impregnados com o polímero acima podem ser adquiridos no mercado.

Após esta polimerização, ocorre um segundo estágio de reação, onde haverá a formação de ligações cruzadas entre as cadeias. Isto se dá através do uso de agentes

específicos que agem em função da temperatura. Uma estrutura típica da resina fenólica curada se apresenta a seguir: [30]



O processo de formação de ligações cruzadas entre as cadeias é denominado como cura da resina (estágio C), que é necessariamente em função da temperatura, obtendo como produto desta reação a água, na maioria dos casos.

Geralmente as resinas fenólicas puras (sem aditivos) possuem uma boa resistência química e propriedades elétricas e mecânicas satisfatórias. Além disso, possuem uma alta resistência a temperatura em relação a outras resinas e são aplicadas em lugares onde a temperatura alta é uma constante. Resistem um longo período sem se decompor, a uma temperatura de até 260 °C. Por essa razão, elas são aplicadas em peças que necessitam uma proteção térmica.[1]

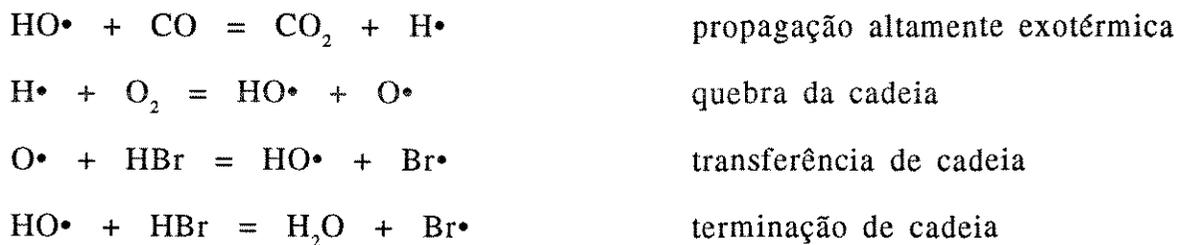
Sua aplicação em aeronaves está ligada a características importantes, que são: resistência a temperatura, autoextinguibilidade em relação ao fogo e baixa emissão de calor e fumaça, atendendo aos requisitos exigidos pela F.A.A. para homologação de

interiores de aeronaves. Deste modo, a resina fenólica se tornou uma matriz ideal para se usar em interiores de aeronaves, principalmente quando há a necessidade de se controlar o fogo durante o voo[4]. Assim, todo o interior de uma aeronave está revestido pela resina fenólica (teto, painéis laterais, poltronas, divisórias, etc.).

Fazendo-se um raio X da amostra de resina fenólica, obtida pela diluição de um pedaço de tecido impregnado do fabricante B, verificamos a presença de metais como o silício, antimônio, zinco e bromo, o que já era previsto, visto que tais metais, principalmente o antimônio e o bromo, são considerados retardantes de fogo e quando incorporados a determinados compósitos, contribuem para um melhor desempenho antichama.[3]

Durante a combustão de termoplásticos, radicais livres são formados pela pirólise. Os radicais combinam com o oxigênio, numa reação em cadeia, causando a emissão de calor e a decomposição de materiais plásticos. A combustão será retardada ou interrompida se os radicais livres, produzidos pela pirólise, forem bloqueados.[31]

Termoplásticos contendo componentes do tipo halogênio, em geral HBr, atuam como retardantes de chama, agindo com os radicais livres, da seguinte forma:



O trióxido de antimônio é um importante componente usado como retardante de chama também. Este age como sinérgico, fortalecendo os efeitos dos componentes orgânicos halogenicos, e não diretamente na cadeia polimérica, acentuando sua ação.[31]

Quanto à cura da resina pura, sem aditivos, há uma grande liberação de componentes voláteis e de água durante o processo, levando à cura completa.

I.3 - REFORÇOS

A principal função da fibra num material composto é suportar e distribuir a carga ao longo da direção de esforço, que coincide com a solicitação do material empregado. Desde modo, os reforços são indispensáveis num material composto, sendo utilizados para se conferir certas propriedades desejadas ao componente. Podemos considerar como reforço desde simples composições minerais que são incorporadas aos polímeros até as fibras de alta resistência.[2]

A razão para se usar fibras em compósitos é porque estas são inerentemente mais rígidas e resistentes do que qualquer outro material em suas diversas formas geométricas. Como exemplo, podemos citar o vidro, onde a diferença de resistência (fragilidade) é visível, entre uma placa de vidro e uma fibra de vidro. Portanto, a geometria da fibra confere à estrutura do material composto uma grande resistência, que é devido ao fato de que defeitos internos, que existem em vidros comuns e que comprometem seu uso, são eliminados nas fibras.[1]

Os reforços podem ser classificados de acordo com sua natureza e suas características geométricas. Os reforços podem ser: duros, para aumentar a dureza e a resistência à abrasão; resistente à ruptura, para elevar a resistência à tração, flexão e cisalhamento; rígidos, para incrementar o módulo de elasticidade; extremamente tenazes, para aumentar a resistência ao impacto; e termicamente resistentes, para aumentar a estabilidade térmica. Todo reforço é envolvido por uma matriz polimérica contínua.[1]

Os reforços utilizados na indústria aeronáutica são geralmente em forma de fibras, podendo ser orgânicas, inorgânicas ou metálicas.

Um material composto é anisotrópico, ou seja, as suas propriedades variam de acordo com a direção, sendo fundamental a orientação das fibras, pois elas são

responsáveis pela garantia de resistência aos esforços aplicados, já que a resina atua apenas como um aglutinante com pouca resistência mecânica.

As fibras podem ser classificadas quanto a sua natureza em: naturais, artificiais e sintéticas. Dentre as naturais, destacam-se as fibras de juta, fibras de madeira, etc. As fibras artificiais são aquelas obtidas a partir de modificações das naturais. As fibras sintéticas, por sua vez, são as mais utilizadas para reforços de matrizes poliméricas, onde destacam-se: as fibras de vidro, as fibras de carbono e grafita, que apresentam ótimas propriedades mecânicas aliadas ao baixo peso, e as poliméricas, obtidas a partir de poliamida aromática.[2]

As fibras são muito utilizadas na indústria aeronáutica e aeroespacial, pois seu peso torna-se um fator muito importante e decisivo. A maneira como são obtidas e as formas dos reforços são mostrados na figura 2 e figura 3, respectivamente.

Geralmente as fibras não são diretamente usadas, em aeronaves, mas sim, embebidas por uma matriz para formar camadas simples ou materiais fibrosos. O objetivo da resina é ligar as fibras sem interrupção, transferindo resistência às mesmas e protegendo-as de ataques químicos e prejuízos devido a manipulação.[1]

Os reforços fibrosos mais utilizados na indústria aeronáutica são: as fibras de vidro, as fibras de carbono e as fibras de aramida, que a seguir serão descritas detalhadamente.

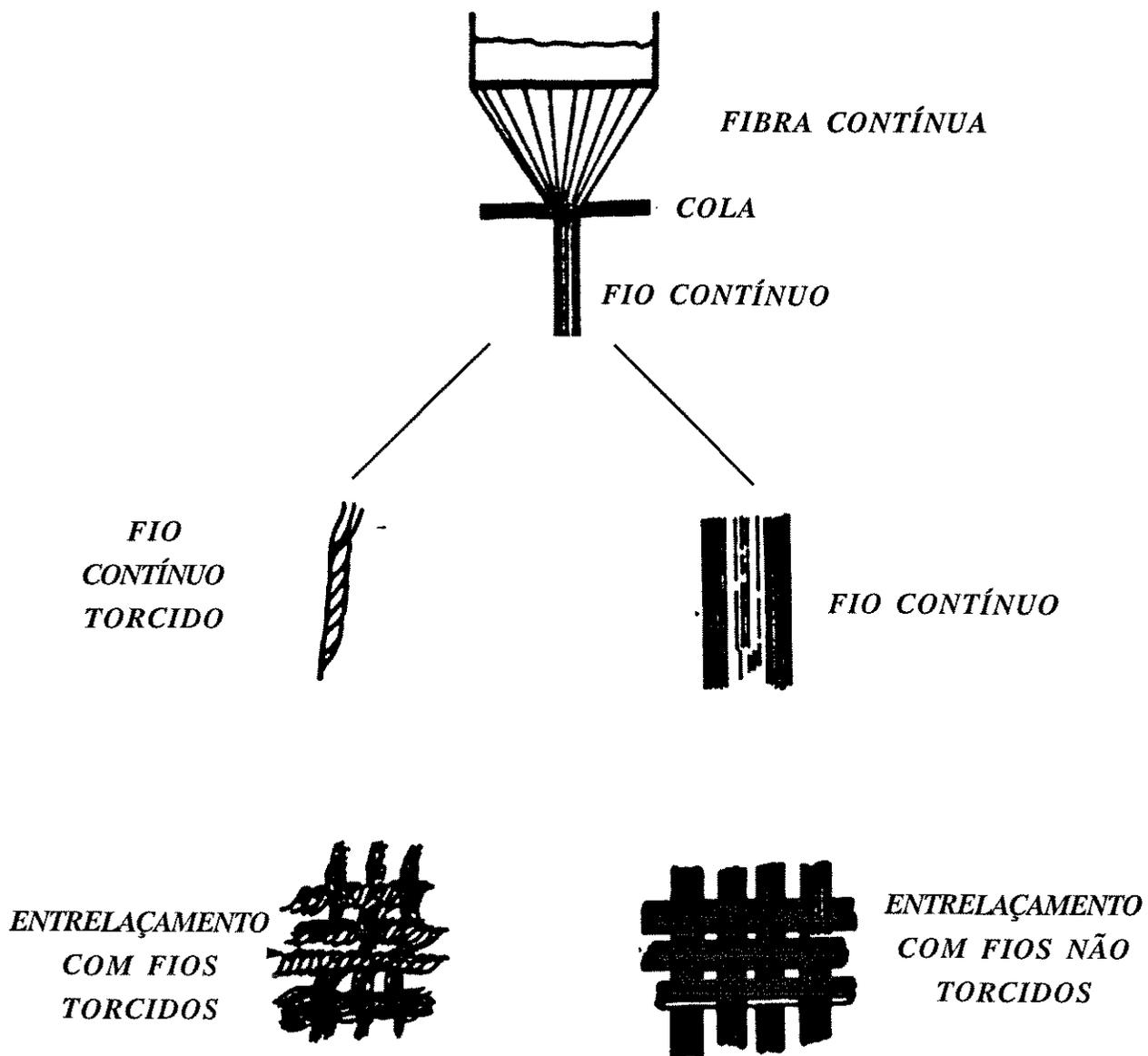
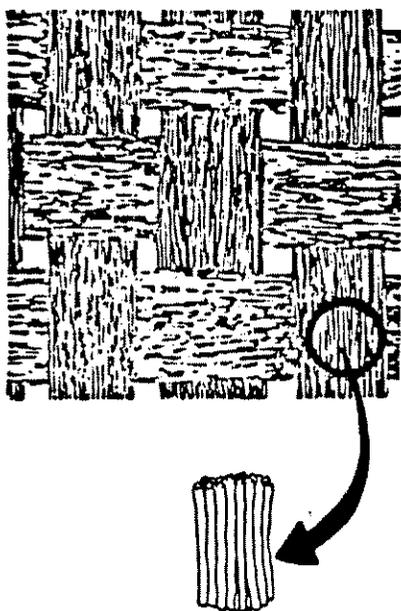
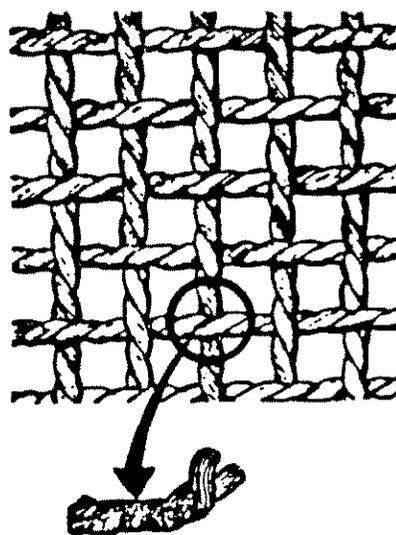


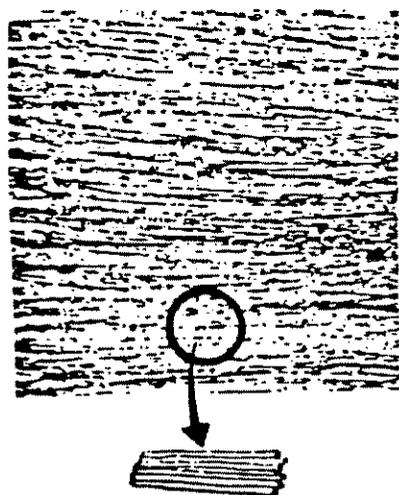
FIGURA 2: Obtenção dos tecidos



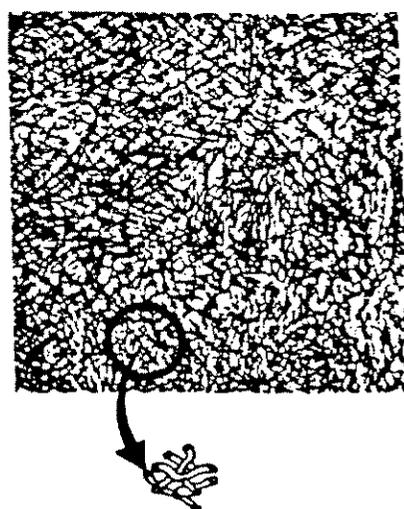
TECIDO DE FIO NÃO TORCIDO



TECIDO DE FIO TORCIDO



TAPE



FIBRA PICADA ("CHOPPED")

FIGURA 3: Principais tipos de reforços

1.3.1 - FIBRA DE VIDRO

Geralmente o termo vidro inclui uma grande quantidade de materiais, contendo mais de 50% de sílica (SiO_2) com estruturas aleatórias. A fibra vem normalmente de vidros usados para janelas e garrafas, que não possuem boas propriedades e são comparativamente fracos.

As fibras de vidro são fabricadas a partir da fusão de determinados óxidos à aproximadamente 1.316°C . Os principais constituintes do vidro são: sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), óxido de boro (B_2O_3), óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O) e outros componentes em menor quantidade. A resistência das fibras depende da presença e da concentração dos componentes citados.[1]

O vidro desenvolvido para a produção de fibra contínua foi o tipo E, o qual passou a ser padrão para vários tipos de aplicações. A tabela 1 abaixo mostra a composição típica do vidro E, que pode ter composições variadas dependendo da concentração dos seus constituintes.

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO DO VIDRO TIPO E

| COMPOSTOS | % EM PESO |
|-------------------------|------------------|
| SiO_2 | 52 a 56 |
| CaO | 16 a 25 |
| Al_2O_3 | 12 a 16 |
| B_2O_3 | 8 a 13 |
| MgO | 0 a 6 |
| K_2O | 0,5 |
| Fe_2O_3 | 0,05 a 0,40 |
| F_2 | 0 a 0,3 |

Obtenção das fibras de vidro

A figura 4 mostra um esquema simplificado de obtenção de fibras de vidro. Os pedaços de vidro são fundidos a uma temperatura acima de 1300°C, atingindo o estado líquido. A partir disso são produzidos filamentos com um diâmetro aproximado de 10 microns, através de uma placa de platina contendo milhares de furos. Estas fibras, após receberem um revestimento protetor, são recolhidas na forma de fardos. [1]

As fibras de vidro são encontradas sob várias formas para a aplicação. Uma das formas mais convencionais é a fibra constituída de filamentos contínuos que são aglomerados paralelamente uns aos outros formando mechas. Os aglomerados de filamentos podem ser torcidos formando cabos. Tanto as mechas como os fios podem ser utilizados para a fabricação de tecidos (figuras 2 e 3 respectivamente).

Com a evolução das pesquisas, outras fórmulas para obtenção de fibras de vidro foram desenvolvidas, visando aumentar algumas propriedades mecânicas. Assim, o vidro S foi desenvolvido para suportar uma maior resistência à tração, sendo 33% superior ao vidro E. Sua composição típica é: 65% de SiO_2 , 25% de Al_2O_3 , e 10% de MgO . Sua aplicação é voltada para o setor aeroespacial e utilizada em peças que necessitam uma resistência maior à tração e um elevado desempenho, como no caso de compósitos avançados.[2]

A fibra de vidro é largamente utilizada na confecção de peças onde não há grande responsabilidade estrutural, como por exemplo, na fabricação de dutos e canaletas, e em peças sujeitas a um alto esforço e compressão.[2]

As principais vantagens da fibra de vidro são: baixo custo, alta densidade (uniformidade), alta resistência ao impacto, excelente estabilidade química e térmica e

alta durabilidade.

Podemos citar, também, algumas desvantagens da fibra de vidro como baixo módulo de elasticidade e baixa resistência específica[1] em relação à outras fibras.

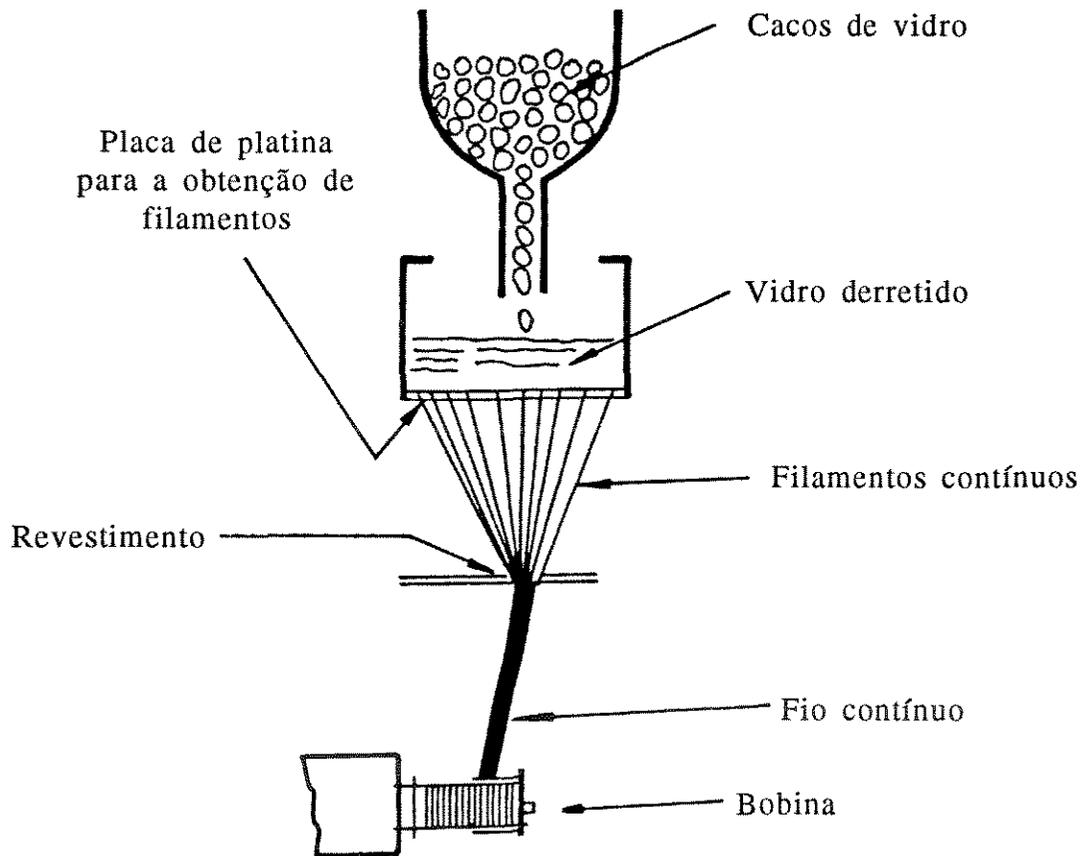


FIGURA 4: Fabricação da fibra de vidro

1.3.2 - FIBRA DE CARBONO

As fibras de carbono foram inicialmente usadas em 1880 como filamentos de lâmpada elétrica. Entretanto, durante a década de 60, sua utilização passou a ser muito importante como reforço em compósitos estruturais. O interesse pelas fibras de carbono como reforço se deu pelo fato de possuírem uma elevada resistência mecânica.

Fibras de carbono podem ser manufaturadas de diversas maneiras dependendo do material utilizado ou precursor, e a característica da fibra produzida é fortemente influenciada pela técnica de manufatura empregada.

Os materiais utilizados para a fabricação da fibra de carbono são: fibras de celulose (RAYON), fibras de poliacrilonitrila (PAN) e piches de asfalto, que são resíduos do refino de petróleo.[1]

Basicamente o processo envolve a orientação de cristais de grafite na fibra de carbono, o qual constitui um fator importante para a performance da fibra. Nomes como carbono e grafita são usados sem distinção, mas existem diferenças entre fibras de carbono e fibras de grafita. Como exemplo, as fibras de carbono, produzidas pela PAN, possuem de 93 a 95% de carbono em sua constituição, e fibras de grafita possuem acima de 99% de carbono. A diferença básica é a temperatura na qual as fibras são fabricadas ou tratadas termicamente.[2]

A transformação da cadeia puramente carbônica ocorre através da pirólise com um aquecimento de um filamento entre 250°C e 400°C na presença de oxigênio (estágio da oxidação). Numa atmosfera não oxigenada à temperatura de 1000°C ou acima, se dá o estágio da carbonização. Este estágio é necessário para produção de uma alta resistência a tensão da fibra. Aumentando-se a energia térmica para se atingir temperaturas na faixa de 2500°C a 3000°C, a grafitação acontece, elevando ainda mais a resistência da fibra.[1]

A figura 5 mostra um esquema de obtenção da fibra de carbono.

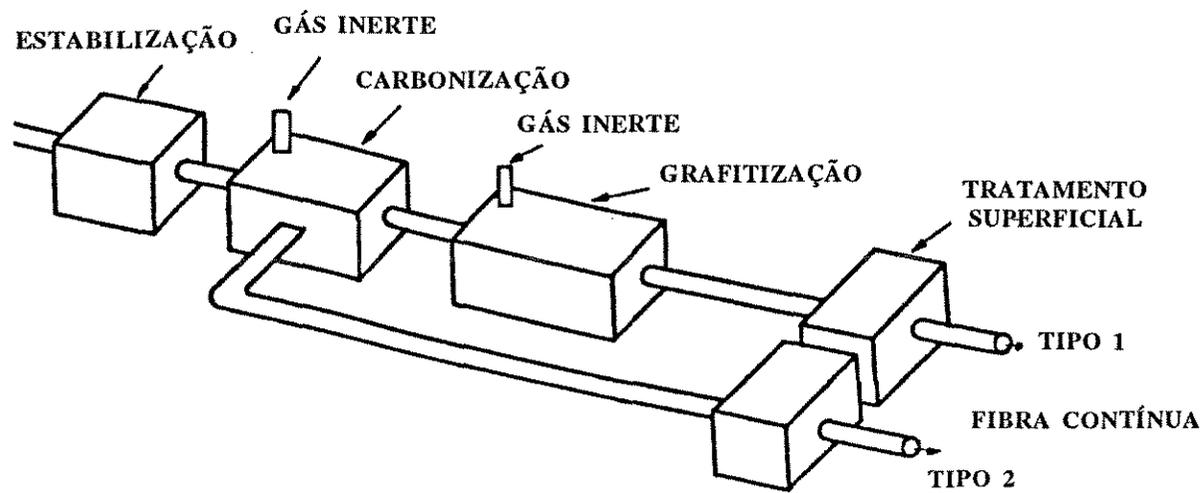


FIGURA 5 : Fabricação da fibra de carbono

As fibras de carbono baseadas em PAN são produzidas à cerca de 1315°C, enquanto que as fibras de grafita de elevado módulo de elasticidade são obtidas entre 1900°C e 3000°C.[1]

As fibras de carbono são caracterizadas por uma combinação de baixo peso, alta resistência ao impacto e alta rigidez.

Enquanto que o primeiro precursor da fibra de carbono foi o RAYON, a segunda geração de fibras foi baseada em PAN. Sua aplicação comercial cresceu em função da combinação de custos relativamente baixos e boas propriedades físicas. São encontradas comercialmente na forma de fios e mechas contendo milhares de filamentos.[2]

A terceira e mais recente geração de fibras de carbono é baseada em piche como precursor. As fibras fiadas a partir do piche tem pouca ou nenhuma orientação preferencial

e portanto possuem baixa resistência e módulo de elasticidade. Por outro lado, é um precursor de menor custo, comparado com os outros dois.[1]

Na sua forma mais contínua, as fibras de carbono são utilizadas em processos de moldagem como: impregnação manual, bobinamento de fibras, processo a vácuo, processo em autoclave (vácuo + pressão).

Podem ser encontradas também na forma picada "Chopped", ilustrada na figura 3, para moldagem por compressão e injeção. Na forma de tecidos, as fibras de carbono são encontradas puras e pré-impregnadas com resinas.

As fibras de carbono foram desenvolvidas principalmente para satisfazer as necessidades na construção de aeronaves substituindo os materiais metálicos tradicionais, com o objetivo de obter peças de alta performance estrutural.

1.3.3 - FIBRA DE ARAMIDA

Recentemente, por volta de 1980, a Du Pont desenvolveu uma fibra sintética orgânica de elevada resistência específica sob tração. Esta fibra, conhecida com o nome comercial de Kevlar, é baseada em poliamidas aromáticas, altamente orientadas, extrudadas e fiadas sob condições especiais. Não há muito conhecimento sobre seu processo de fabricação e composição química, mas as propriedades e potencialidades da fibra de aramida tem sido amplamente analisadas. Comercialmente existem 2 tipos:

a) Kevlar 29: Possui alta capacidade de absorção de energia. Foi desenvolvida para aplicações balísticas, tais como coletes a prova de bala e blindagens em geral, quando misturada a polímeros termoplásticos.

b) Kevlar 49: É mais utilizada em compósitos na forma pura ou pré-impregnada.

As principais características do kevlar 49 são: baixa densidade, cerca de 1,45 g/cm³, (menor que qualquer outra fibra); possui uma alta resistência ao impacto (maior que as outras fibras); alta resistência a tração; possui baixas propriedades térmicas de expansão.[1]

As fibras de kevlar podem ser processadas pelos mesmos métodos que as fibras de vidro e carbono. Na indústria de aeronaves são processadas à vácuo ou autoclave (pressão + vácuo).

1.4 - MATERIAIS PRÉ-IMPREGNADOS

Na indústria aeroespacial, para obtenção de peças laminadas de alta performance, são utilizados os materiais pré-impregnados. Estes materiais são fornecidos através de especificações as quais determinam o tipo de fibra e a quantidade de resina de acordo com a sua aplicação.

A aplicação de resina ao reforço pode ser otimizada através de um processo de pré-impregnação, que se resume em aplicar resina com a devida proporção de catalizador, homogeneamente, em toda a extensão do mesmo. Esta impregnação pode ser feita através de dois processos básicos: por solvente e por prensagem a quente.

Este reforço pré-impregnado com resina é conhecido como pré-preg e se apresenta pronto para ser moldado. Os pre-pregs podem ser encontrados na forma de rolos, fitas, laminados, etc.

A impregnação da resina no reforço é feita pelo processo de solvente, conforme mostra a figura 6:

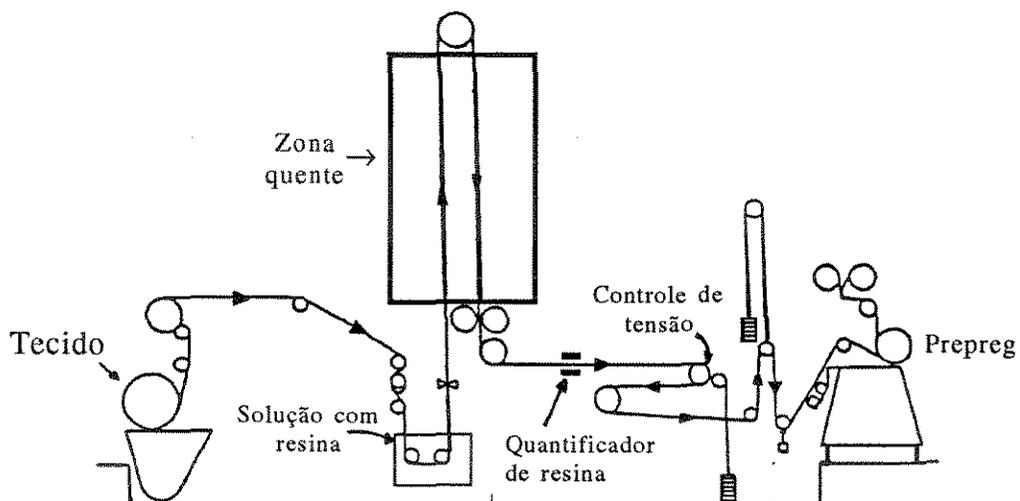


FIGURA 6: Impregnação do tecido com resina

O tecido é desenrolado e mergulhado numa solução de resina com catalizador, e vai para uma zona de calor para atingir um estágio de pré cura denominado estágio B. É tracionado, passando pelo quantificador, que dá ao pre-preg a segurança de que todo o fio possui a mesma quantidade de resina.

Neste trabalho usamos pre-pregs de : fibra de vidro, fibra de carbono e fibra de aramida impregnados com resina fenólica.

Devido ao fato da resina estar pré curada e a cura ser função apenas da exposição a temperatura, o material deve ser armazenado à baixas temperaturas (-18°C) para retardar a reação. Mesmo assim, a reação de cura é contínua, restringindo o tempo de uso deste material entre 6 a 12 meses.

As principais vantagens destes sistemas são:

- os pre-pregs são pré-formulados e não exigem a incorporação de qualquer outro aditivo durante a moldagem;
- a qualidade do produto é reprodutível, pois a quantidade de resina pré-impregnada é previamente controlada;
- A relação resina/reforço também é controlada, que permite uma variação na quantidade de resina de 20% a 80%;
- a produção de moldados é simplificada, pois os pre-pregs estão prontos para serem moldados;
- não há perda de material durante a moldagem;
- técnicas automatizadas de produção podem ser utilizadas;
- É possível a obtenção de componentes de alta performance estrutural.

Os tecidos para confecção dos corpos de prova deste trabalho foram pré-impregnados, sendo de dois fabricantes distintos.

MATERIAIS E MÉTODOS

II.1 - REQUISITOS DA F.A.A.

A norma nº 25.853 [14] da F.A.A. (Federal Aviation Administration) relaciona para interiores de aeronaves, os requisitos necessários para compartimento ocupado pela tripulação ou passageiros, que são:

- 1 - Materiais, inclusive terminações ou superfícies decorativas aplicados em cima de outros materiais, devem ser submetidos aos testes criteriosos prescritos na parte I (página 435), descrito a seguir.
- 2 - Adicionando o que foi dito no ítem 1, as poltronas devem passar pelo teste descrito na parte II (página 437). Não foi discutido sobre as poltronas pois seu tecido é impregnado com resina fenólica, e foge dos parâmetros propostos nesta tese.
- 3 - Para aeronaves com capacidade de 20 ou mais passageiros, os tetos, painéis, partições e outras superfícies de corredores, grande cabine e compartimento para pequenas bagagens devem ser submetidos aos testes descritos na parte IV e V (páginas 450 e 452) .
- 4 - Fumar não é permitido em lavatórios. Caso seja permitido em qualquer compartimento ocupado por tripulação ou passageiros, um número adequado de cinzeiros removíveis deve ser providenciado para todos os ocupantes.
- 5 - Se fumar for permitido em qualquer outra parte da aeronave, os lavatórios deverão ter cinzeiros removíveis localizados visivelmente sobre ou próximo ao lado da porta de entrada, exceto no caso em que um cinzeiro possa servir mais do que uma porta de lavatório e mesmo assim deve estar na frente da cabine de cada lavatório (avião 747).
- 6 - Todo receptáculo usado para resíduo de material inflamável deve ser totalmente fechado, construído com um material resistente ao fogo.

Testes criteriosos e Procedimentos para assegurar a norma nº 25.853

Parte I - Teste vertical - Inflamabilidade

Para compartimentos de interiores ocupados por tripulantes e passageiros:

a) Painéis de interiores, partições, toda a cabine e materiais usados na construção de compartimentos de bagagens devem ser auto-extinguíveis quando testados verticalmente (teste de inflamabilidade). O comprimento médio da queima não pode exceder 6 polegadas e o tempo de queima médio, após removida a chama, não pode exceder 15 segundos. Respingos do material em chamas não podem continuar a queimar por mais de 3 segundos (em média) após atingirem o chão.

A chama deve ser aplicada por 60 segundos e depois removida. Um número de 3 corpos de prova devem ser testados e calculada a média dos resultados [5].

Parte IV - Método de determinação da emissão de calor dos materiais da cabine

A espécie a ser testada é colocada dentro de uma campana a qual possui um fluxo constante de gases. Na espécie exposta é determinado o calor radiante, onde é colocada uma chama e medido o calor irradiado pela mesma. A média do calor total liberado durante os dois primeiros minutos de ensaio não deve exceder $65 \text{ kW}\cdot\text{min}/\text{m}^2$ para materiais presentes na cabine de tripulantes ou passageiros e o calor liberado medido de 2 em 2 segundos durante cinco minutos, não deve exceder a $65 \text{ kW}/\text{m}^2$ [6].

Parte V - Método de determinação da densidade de fumaça dos materiais da cabine

A densidade óptica de fumaça (D_s) é obtida pela média de três amostras que foram expostas ao calor durante quatro minutos. Um feixe de luz que atravessa

verticalmente a campana, onde está a amostra, é bloqueado pela fumaça de sua queima. Esta média não pode exceder 160 [7].

II.2 - DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Como foi descrito anteriormente, a F.A.A. determinou que os vários materiais que compõem a cabine de tripulantes e passageiros, e os compartimentos de cargas das aeronaves deveriam passar pelos testes de inflamabilidade, densidade de fumaça e emissão de calor, com valores máximos a serem respeitados. Valores acima do permitido, comprometem a homologação das aeronaves. A seguir, descreveremos os equipamentos utilizados para testes de verificação e o procedimento de obtenção dos dados.

II.2.1 - INFLAMABILIDADE

Este teste é usado para definir a resistência dos materiais à chama quando testados de acordo com o teste vertical do bico de Bunsen durante 60 segundos.

O início do teste se dá com a escolha do tempo de exposição da chama na amostra, o qual pode ser de 60 ou 12 segundos. Para materiais do interior da cabine de passageiros ou tripulantes, usa-se o tempo de 60 s; para compartimentos de carga, isto é, sem passageiros ou tripulantes, usa-se o tempo de 12 s.

O tempo de chama é o tempo em segundos que a amostra continua a queimar após removido o bico de Bunsen debaixo da mesma. Durante a queima há um certo brilho (queima do material), não incluindo o da chama.

O tempo de queima de cada respingo é o tempo em segundos que pedaços da amostra continuam a queimar após se desprenderem do material inicial. Se não tivermos respingos, anotamos 0 seg ou "No Drip"; mas se há respingos, devemos anotar quanto tempo eles levam para apagar.

O comprimento da queima é a distância do começo da amostra até a maior distância ocasionada pelo estrago da queima na amostra, relativa à área de combustão. Este inclui as áreas de consumação parcial, chamuscadas ou quebradiças, e não inclui áreas descoloridas ou respingadas.

A cabine de testes foi fabricada de acordo com as normas da F.A.A. [14], que consiste numa cabine fechada. É sugerido que a cabine esteja locada dentro de um exaustor que facilita a retirada dos gases após a combustão do material. A cabine é de metal galvanizado de 1 mm de espessura, medida esta para toda a campana. Na frente, onde se coloca a amostra, coloca-se vidro para melhor observar o teste. A campana é mostrada na figura 7.

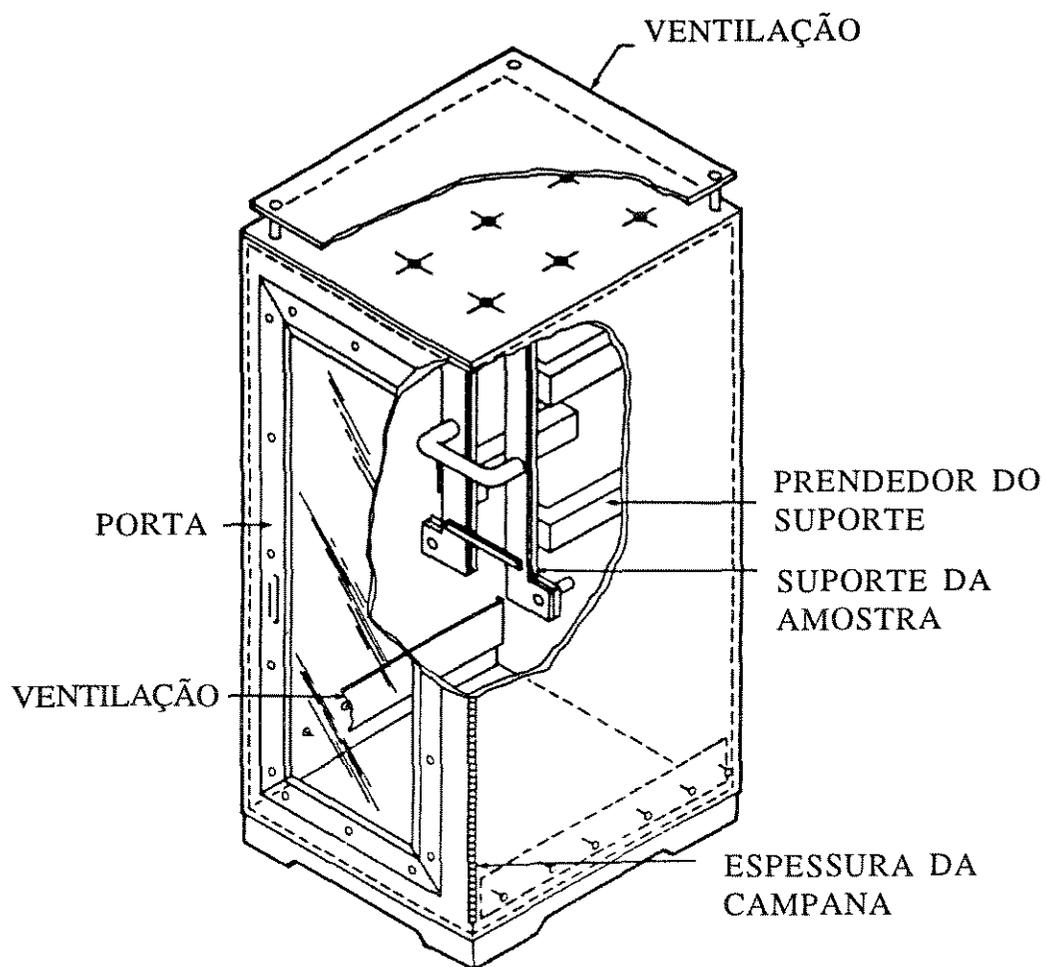


FIGURA 7 : Campana do teste de Inflamabilidade

O suporte para prender a amostra deve ser fabricado de um metal resistente à corrosão, de acordo com a figura 8, para acomodar amostras com 25 mm de espessura.

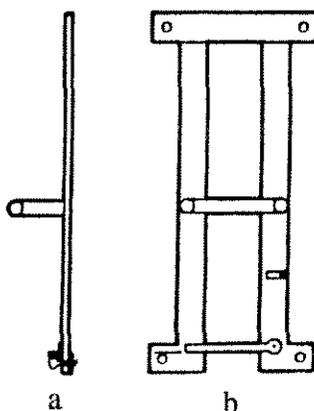


FIGURA 8 : Suporte para prender a amostra: a) Vista de perfil

b) Vista frontal

Muitos combustíveis tem sido aceitos, inclusive gás B (55% de H_2 , 18% de CO, 24% de metano e 3% de etano), metano (com 99% de pureza), gás natural (o qual contém 90% de metano) e propano. Metano tem se mostrado o mais conveniente combustível para a chama, o qual é consistente e pode ser usado sem se adicionar qualquer outro gás na campana. É recomendado que o gás seja encanado e que o bico de Bunsen possua um sistema de controle de válvula de saída do mesmo. A pressão do gás deve ser da ordem de 17 ± 2 kPa e o bico injetor de gás deve estar entre o suporte de gás e o bico.

Quanto à chama, deve-se construir um suporte para auxiliar no tamanho da mesma, como mostra a figura 9. Um indicador apropriado tem um comprimento de 5/12 polegadas e é colocado a 1 polegada (25 mm) distanciado do bico. Se usamos metano como

combustível da chama, é aconselhável o indicador possuir 2 marcações (2 prolongamentos), um prolongamento para indicar a altura do cone interior da chama e o outro para indicar a altura do topo da chama. Para metano, foi determinado que o cone inferior da chama tem 22 mm de comprimento e o topo da mesma, 38 mm de comprimento.

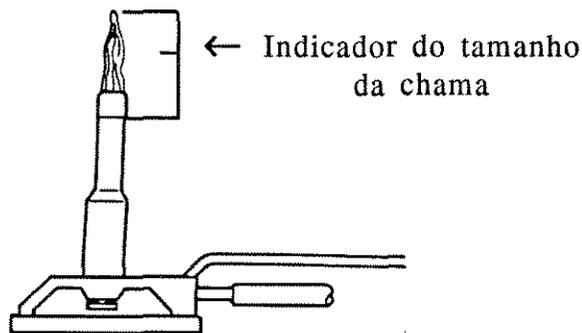


FIGURA 9 : Bico de Bunsen com marcação do teste de Inflamabilidade

Para outros tipos de gases, usa-se um termopar de Cromel-alumel para se saber a temperatura da chama.

Para começar o teste, deve-se ter a mão um cronômetro de escala 0,1 segundo, para se marcar o tempo de exposição da chama na amostra e uma régua graduada em 25 mm para medir o comprimento da queima.

As amostras devem ser fabricadas da mesma maneira e com o mesmo material que será empregado na aeronave.

Deve-se testar três amostras de cada material, as quais serão retangulares com medidas de 7,0 mm por 30,5 mm. A espessura das mesmas não deve exceder 3 mm.

Em nosso trabalho, usamos amostras de pre-pregs com 3 camadas para um tecido grosso e 6 camadas para um tecido fino, com a finalidade de atingirem os 3 mm de

espessura após curados.

As amostras devem estar numa sala de aproximadamente $21^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ e com uma umidade relativa de $50\% \pm 5\%$ por 24 horas. Devem ser removidas desta sala imediatamente antes de serem colocadas na campana.

Quanto ao procedimento, primeiramente ajustamos a chama nos padrões já descritos anteriormente e o combustível usado no bico de Bunsen é o metano.

Depois de aceso, o bico de bunsen é colocado longe do suporte da amostra, uma distância mínima de 76 mm, para podermos colocar a amostra no lugar. Após colocada, fechamos a campana e colocamos o bico de bunsen abaixo da amostra. A distância que os separa é de 19 mm. Imediatamente, acionamos o cronômetro e observamos a amostra pelo vidro. Após 60 segundos, retiramos a chama da amostra e medimos o comprimento de queima. Verificamos se há respingos do material e quanto tempo demorou para se apagar.

II.2.2 - DENSIDADE DE FUMAÇA (D_s)

A densidade óptica específica (D_s) é uma medida da quantidade de fumaça produzida por unidade de área, de um material quando em chamas. Neste teste, o valor máximo de D_s é calculado durante os primeiros quatro minutos.

A câmara de fumaça é mostrada na figura 10. O seu interior (exceto a porta e ventilações) deve ser de porcelana esmaltada de metal e possui um sistema fotométrico capaz de detectar a transmitância de luz de um mínimo de $1\% \pm 0,01\%$. Na porta da câmara há uma janela para se observar o seu interior durante o teste.

O sistema consiste numa fonte de luz e um tubo fotomultiplicador que são orientados verticalmente para reduzir as variações de medidas relativas a estratificação da fumaça. Na câmara, durante o teste, o fotomultiplicador converte a leitura de intensidade relativa de luz em densidade óptica num registrador, desenhando a transmissão de luz versus tempo.

Um mínimo de três amostras devem ser preparadas e testadas para cada configuração. Se a amostra possui faces com materiais diferentes, deve-se colocar em exposição ao calor a face que irá ser exposta no interior da cabine de passageiros. Se ambas as faces devem ser testadas, deve-se preparar três amostras de cada face.

Cada amostra deve ter o tamanho de 73 ± 2 mm por 73 ± 2 mm e uma espessura máxima de aproximadamente 25 mm.

Todas as superfícies da amostra, exceto aquela que será exposta no teste, devem ser recoberta por uma folha de alumínio.

A amostra deve ser condicionada à temperatura de $21^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ e $50\% \pm 5\%$ de humidade relativa por um mínimo de 24 horas. Somente uma amostra de cada vez deve ser retirada deste ambiente e testada imediatamente.

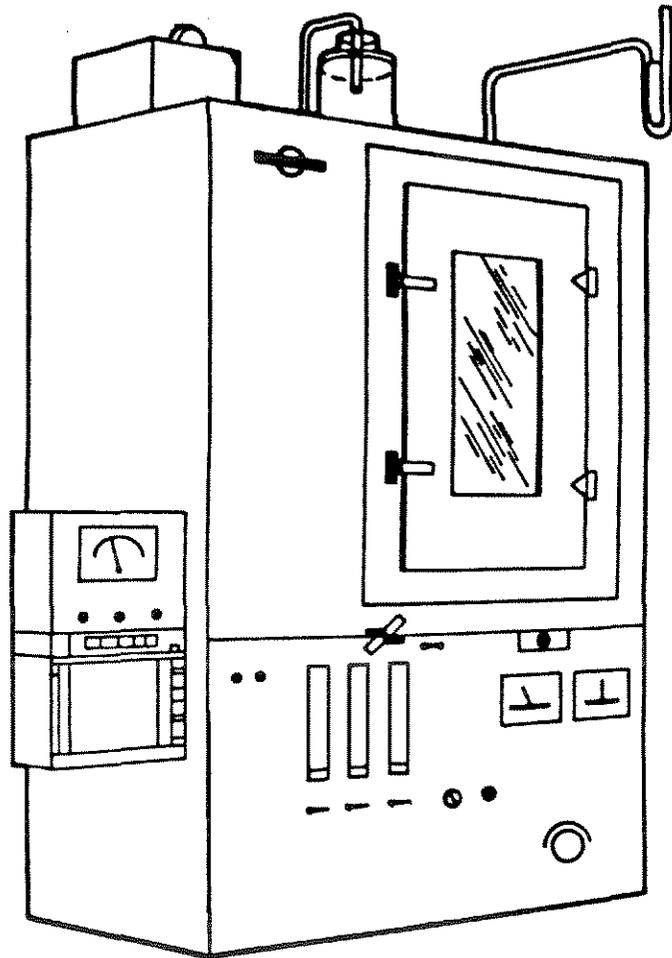


FIGURA 10 : Campana do teste de Densidade de Fumaça

Primeiramente, calibramos o registrador para a transmissão relativa de 100% ou densidade óptica de 1,00. Envolvemos a amostra numa folha de alumínio, exceto o lado que será exposto, prendemos num suporte e asseguramos que ela fique condicionada nas condições descritas acima.

Calibramos a câmara de fumaça numa temperatura de $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e posicionamos a chama piloto na mesma, na frente do suporte da amostra.

Abrimos a câmara, encaixamos a amostra num trilho e após fechá-la, posicionamos a amostra na frente da chama piloto e acionamos o tempo do teste.

Registramos a transmissão de luz durante quatro minutos. Após este tempo, removemos a amostra e abrimos as portas de exaustão para a saída dos gases.

Calculamos a densidade óptica através da fórmula [7]:

$$D_s = (V/L.A) \text{ Log } (100/T_m)$$

$$D_s = 132 \text{ Log } (100/T_m) \quad , \text{ onde:}$$

V = volume da camara = $0,5010 \text{ m}^3$

L = distância que a luz percorre = $0,914 \text{ m}$

A = área da amostra exposta = $0,00424 \text{ m}^2$

T_m = porcentagem de transmitância de luz durante quatro minutos.

A média da D_s de três amostras testadas durante quatro minutos não deve ultrapassar 160.

II.2.3 - EMISSÃO DE CALOR

Emissão de calor é uma medida da quantidade de calor emitida pelo material quando em chamas. É expressado como a média do calor total liberado ($\text{kW}\cdot\text{min}/\text{m}^2$), que é uma média dos valores de calor obtidos nos primeiros dois minutos de ensaio, e como calor liberado (kW/m^2), que é o maior valor medido de 2 em 2 segundos durante cinco minutos de ensaio. O gráfico abaixo expressa o teste de emissão de calor.

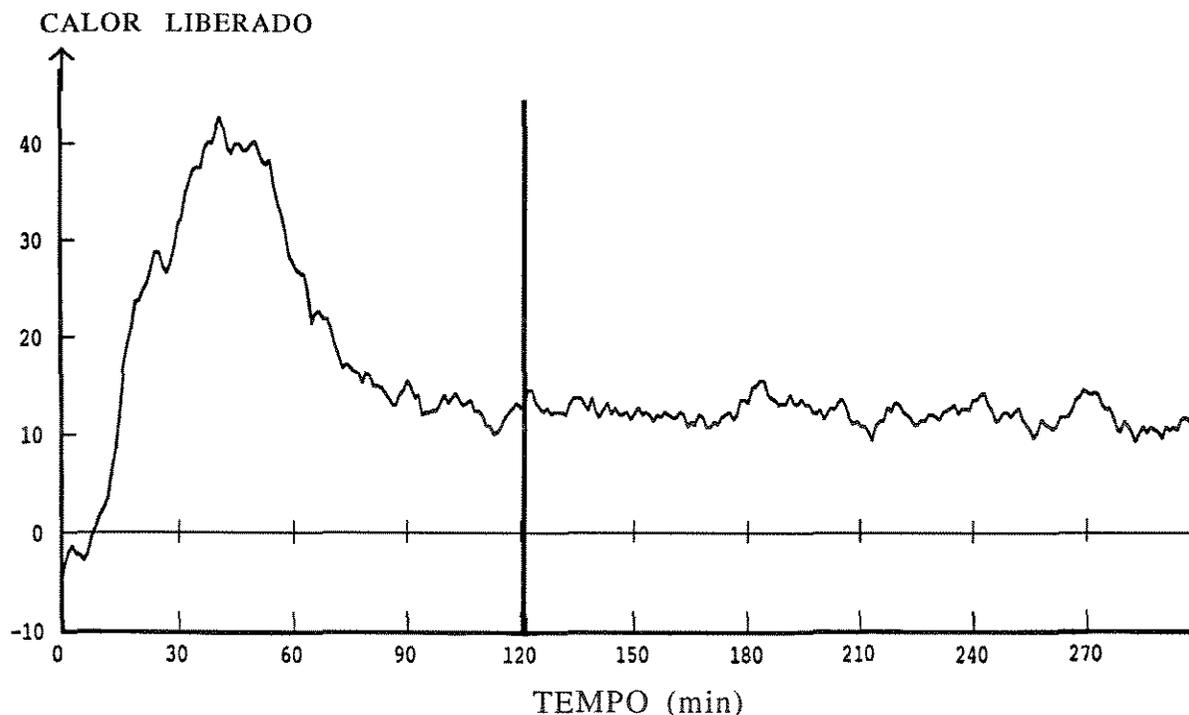


GRÁFICO 1: Medida de emissão de calor

O tamanho da amostra é de $150 \pm 0,2$ mm por $150 \pm 0,2$ mm nas dimensões laterais. A espessura máxima da amostra deve ser da ordem de 45 mm.

Deve-se testar para cada material e configuração três amostras. Somente a superfície da amostra, que irá compor o interior da cabine de passageiros, deve ser exposta durante o teste. Uma camada simples de alumínio (0,025 mm de espessura) deve recobrir o lado não exposto à chama.

As amostras devem ser condicionadas em salas à temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ e $50\% \pm 5\%$ de humidade durante 24 horas antes do teste.

Quanto ao procedimento, primeiramente ajustamos a pressão do ar dentro da câmara para 200 mmHg. Ligamos a chama piloto e checamos suas posições. Colocamos a amostra na anti-câmara com a porta de radiação fechada. Fechamos a porta de contato com o meio externo e começamos a contagem de tempo. A amostra deve permanecer na anti-câmara durante 60 ± 10 s. Após a contagem de tempo, abrimos a porta de radiação e introduzimos a amostra na frente da chama. Este procedimento não deve exceder 3 s.

Após 5 minutos, deve-se remover a amostra. Descartamos os dados vindos de qualquer teste no qual a chama tenha se extinguido em qualquer período de tempo superior a 3 s ou durante o início do teste no qual a chama tenha se apagado e não se consiga ascender num intervalo de tempo de 3 segundos.

Podemos calcular o calor liberado em qualquer intervalo de tempo, usando a voltagem marcada pelo termopar (V) e os dados colhidos durante a calibração da câmara que vale:

$$K_h \cdot (V - V_0) \quad \text{onde} \quad K_h \text{ é o fator de calibração e} \\ V_0 \text{ é a leitura do termopar no início da operação}$$

Determinamos a emissão de calor durante o intervalo de 5 minutos.

Ligamos o exaustor para remover os gases deixados pela queima da amostra.

Os dados são coletados diretamente por um microcomputador, que nos dá o gráfico de como transcorreu o teste.

O valor máximo da média do calor total liberado durante 2 minutos de teste não deve exceder $65 \text{ kW}\cdot\text{min}/\text{m}^2$ e o calor liberado durante 5 minutos não deve exceder $65 \text{ kW}/\text{m}^2$.

PROCESSAMENTO DO MATERIAL

III.1 - FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os tecidos pré-impregnados (ou pré-preg), utilizados na confecção dos corpos de prova laminados, foram feitos de resina fenólica reforçados com fibras de vidro, aramida e carbono.

Para cada tecido pré-impregnado foi utilizado o seguinte procedimento de fabricação:

Selecionou-se o tecido a ser usado e dependendo da fibra, foram feitos corpos de prova com 2 ou 3 camadas, para terem a espessura requerida, que é de 3 mm.

Para as fibras de vidro, kevlar e carbono, impregnadas com resina fenólica, preparou-se uma placa do material laminado de 930 mm por 325 mm, com 3 camadas de tecido, e com orientação das fibras de 0° a 90° , conforme a figura 11.

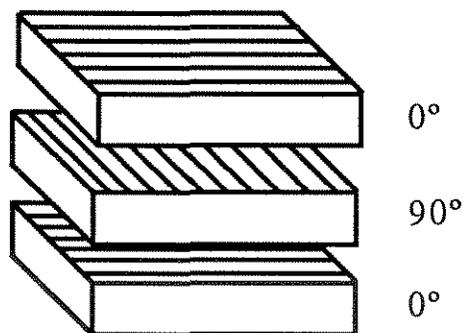


FIGURA 11 - Orientação dos tecidos na fabricação dos laminados

Foi utilizada como molde uma chapa plana de alumínio nas dimensões mínimas de 1710 mm por 810 mm, onde podemos laminar 2 tecidos de uma vez: por exemplo, um com fibra de vidro e outro com fibra de aramida, separadamente.

As placas de cada material são embaladas como visto na figura 12, para poder ser feito vácuo e curada na autoclave.

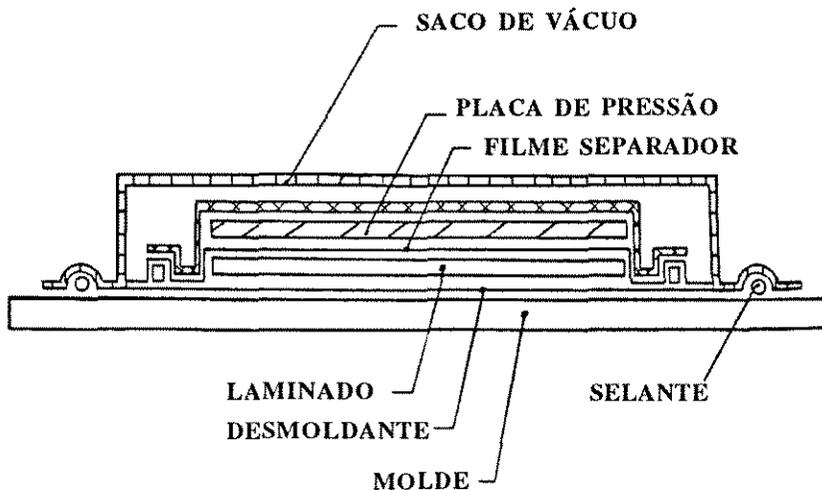


FIGURA 12: Moldagem de um laminado

Colocamos em cima do molde o material laminado a ser curado e em cima, um filme desmoldante de armalon poroso, cortado do tamanho do laminado. Fazemos uma barreira da borda ao redor do laminado utilizando selante.

Posicionamos o canalizador com base para o bico de vácuo, numa extremidade, e na outra base, um sensor de vazamento.

Cobrimos o conjunto com filme de nylon para saco de vácuo. Instalamos o bico e o sensor de vácuo e calibramos para 23 pol Hg.

III.2 - CICLO DE CURA

O molde com vácuo é introduzido na autoclave e as mangueiras de vácuo conectadas. Verificamos se há vazamentos; caso positivo o molde é retirado da autoclave até conseguirmos eliminá-los.

A cura da resina fenólica é feita dentro da autoclave, conforme o gráfico abaixo, por aproximadamente 1 hora e meia.

TEMPERATURA (°C)

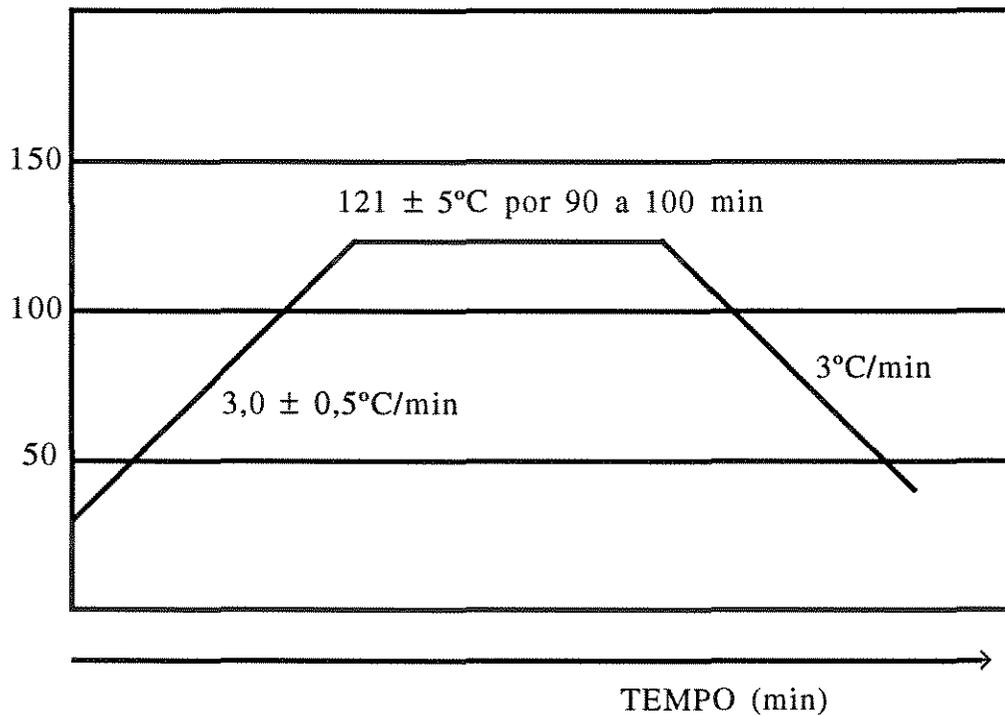


GRÁFICO 2 : Ciclo de cura realizado na EMBRAER

A cura em autoclave é sem dúvida, o melhor processo e o mais amplamente

utilizado na fabricação de materiais compostos para a indústria aeronáutica.

O laminado é feito somente em camadas pré-impregnadas de resina e submetido, durante a cura, a pressões bem maiores dentro de um vaso de pressão especial (autoclave).

O processo na autoclave utiliza-se de vácuo para ajudar na remoção de ar preso e voláteis desprendidos durante a cura. Os ciclos de vácuo e pressão da autoclave são ajustados de modo a remover o máximo de ar, sem provocar fluxo excessivo de resina. O vácuo é comumente aplicado durante o estágio inicial do ciclo, enquanto a pressão da autoclave é mantida durante o ciclo de aquecimento e resfriamento. As pressões de cura variam normalmente entre 30 psi e 100 psi e as temperaturas atingem 120°C e 180°C, dependendo da resina a ser curada. No caso da Embraer, a cura é feita com pressão de 60 ± 5 psi e temperatura de 121°C, numa razão de aquecimento de 0,5°C a 2,5°C por minuto e mantido durante 1,5 h. É resfriado até a temperatura ambiente numa razão de 2,5°C por minuto no máximo, mantendo a pressão e o vácuo.[11]

Este processo de cura produz laminados com um controle mais rígido da espessura, uma porcentagem de vazios bem menor e melhor controle da proporção fibra/resina, o que em outras palavras significa melhor nível de resistência, menor peso, melhor acabamento, maior uniformidade de espessura e geometria das peças.[11]

Após a cura, as placas são desmoldadas e recortadas, obtendo um total de 15 corpos de prova, que são 5 para cada teste de flamabilidade.

Devemos inutilizar uma faixa de 10 mm de largura nas bordas, no sentido de comprimento (0°), para recorte das peças. Após serem recortados, é dado o acabamento final em cada corpo de prova.

**RESULTADOS
E
DISCUSSÕES**

IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para verificarmos se o ciclo de cura interfere nos ensaios de inflamabilidade, densidade de fumaça e emissão de calor, fizemos corpos de prova variando a temperatura de cura em : 120°C, 130°C, 140°C e 150°C.

Comparamos os dados obtidos das três fibras dos testes de flamabilidade, para verificarmos qual possui um comportamento que não prejudique a ação da resina.

Como trabalhamos com dois fornecedores das resinas utilizadas, fizemos testes utilizando a mesma fibra com as duas resinas, para tirarmos eventuais dúvidas e possíveis discrepâncias dos dados.

A seguir, fizemos corpos de prova na temperatura de 150 °C, pois entre as quatro temperaturas foi aquela que apresentou melhores resultados nos testes de flamabilidade, mas variando o tempo de cura. Todos os corpos de prova foram curados durante 1,5h e submetidos a uma pós-cura de mais 1,5h e 3,0h.

IV.1 - VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Para a fibra de vidro:

Foram feitos corpos de prova de fibra de vidro com resina fenólica do fornecedor A, variando-se a temperatura de cura (120 °C, 130 °C, 140 °C e 150 °C) e mantendo-se constante o tempo de cura (1,5 h), a pressão e o vácuo (cura em autoclave). Não fizemos corpos de prova de fibra de vidro com resinas do fornecedor B, porque a empresa não utiliza este compósito no interior de aeronaves.

No gráfico 3, de inflamabilidade, há uma pequena diminuição no comprimento de queima, ocasionado pelo aumento do número de ligações cruzadas entre as cadeias, devido a exposição a uma temperatura maior. No gráfico 4, de densidade de fumaça, confirmamos esta teoria, pois também há uma diminuição no valor da densidade óptica, significando a diminuição da quantidade de fumaça liberada. Já no gráfico 5, de emissão de calor, percebemos que os menores valores tanto para a média do calor liberado quanto para o valor máximo são das amostras curadas a temperatura de 120 °C. Este resultado se mostra incoerente, por causa dos outros testes, mas, pela complexidade de parâmetros a serem controlados, como a pressão de entrada de ar na campana, a temperatura da mesma, o fluxo de gases, o comprimento da chama na amostra, etc., a dispersão de ensaio é uma questão a se considerar. Podemos então, dizer que a temperatura que melhor atendeu aos requisitos de inflamabilidade foi a 150°C.

Para a fibra de aramida:

Foram feitos corpos de prova de fibra de aramida com resina fenólica do fornecedor B variando-se a temperatura de cura (120 °C, 130 °C, 140 °C e 150 °C) e mantendo-se constante o tempo de cura (1,5 h), a pressão e o vácuo (cura em autoclave).

COMPRIMENTO DE QUEIMA (POL)

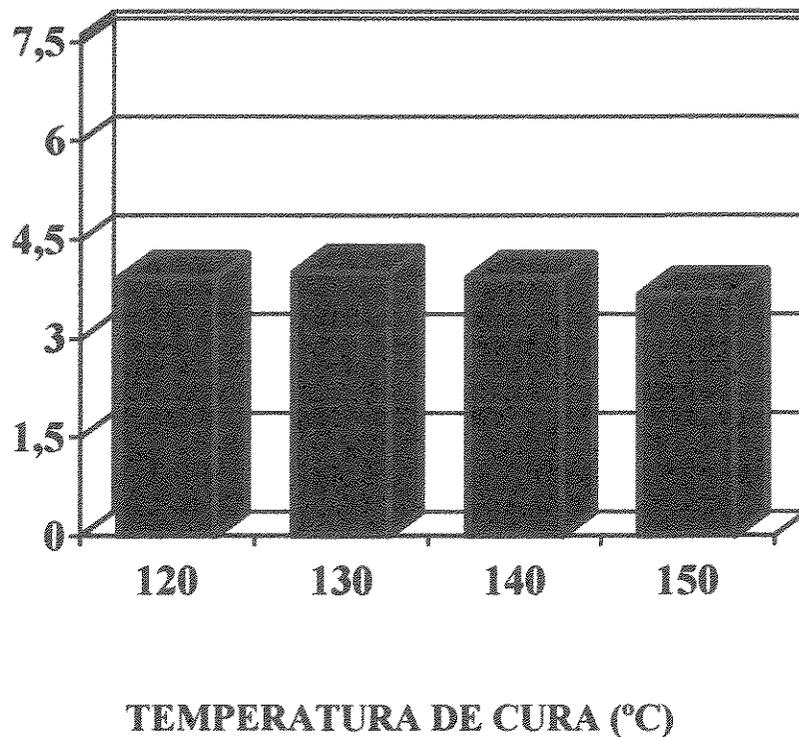


GRÁFICO 3: Inflamabilidade das amostras de compósitos de fibra de vidro com resina fenólica do fornecedor A, curadas com temperaturas diferentes num tempo de 1,5 h na autoclave.

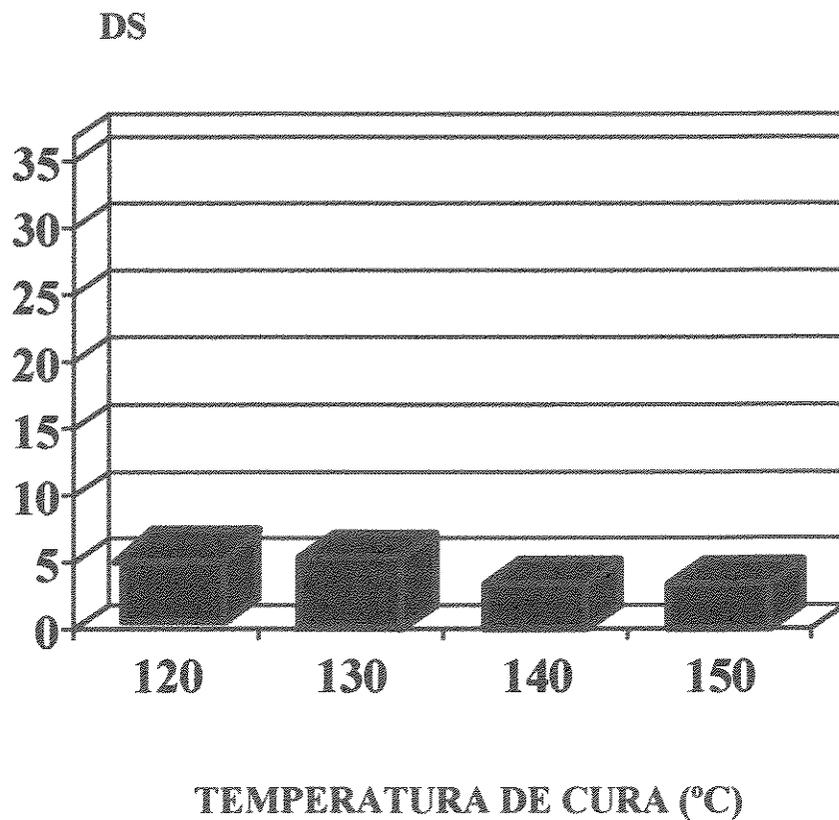
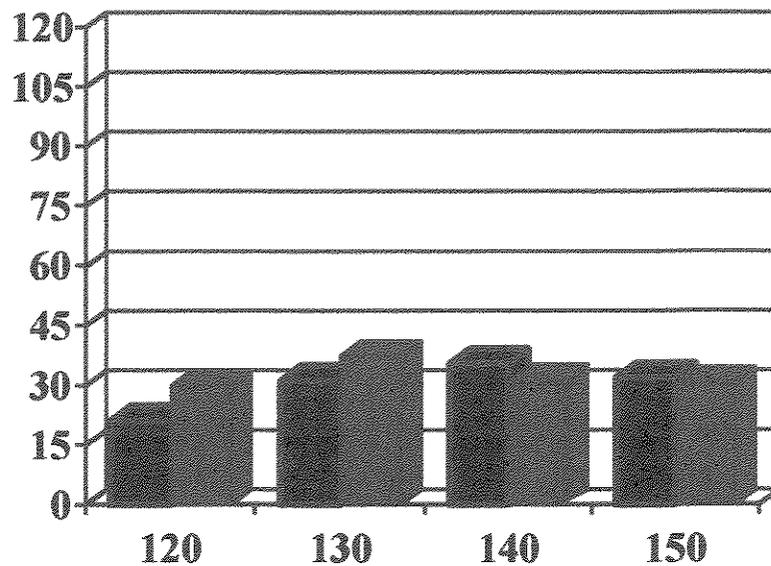


GRÁFICO 4: Densidade de Fumaça das amostras de compósitos de fibra de vidro com resina fenólica do fornecedor A, curadas em temperaturas diferentes num tempo de 1,5 h na autoclave.

CALOR LIBERADO



TEMPERATURA DE CURA (°C)



Média de 2 minutos (kW.min/m²)



Valor máximo em 5 minutos (kW/m²)

GRÁFICO 5: Emissão de calor das amostras de compósitos de fibra de vidro com resina fenólica do fornecedor A, curadas em temperaturas diferentes num tempo de 1,5 h na autoclave

Não fizemos corpos de prova de fibra de vidro com resinas do fornecedor A, porque a empresa não utiliza este compósito no interior de aeronaves.

No gráfico 6, de inflamabilidade, verificamos que há uma queda sensível no comprimento de queima das amostras devido ao aumento do número de ligações cruzadas, relativo ao aumento da temperatura de cura. No gráfico 7, de densidade de fumaça, as amostras curadas a 120 °C apresentam um comportamento inesperado, provavelmente devido a dispersão de ensaio, pois qualquer sobrecarga na rede elétrica, interfere no registrador de transmitância. Já as amostras curadas a 130 °C, 140 °C e 150 °C, mostram que são válidas as considerações de aumento do número de ligações cruzadas, pois quanto maior a temperatura, menor é a emissão de fumaça, tornando um polímero mais estável. No gráfico 8, de emissão de calor, verificamos que quanto maior a temperatura de cura, menores são os valores da média do calor liberado e do máximo de calor liberado, reforçando o que já foi dito. A fibra de aramida, por ser uma fibra orgânica e possuir uma resistência à temperatura menor que as outras, apresenta valores mais altos de emissão de fumaça. Podemos então dizer que a fibra também interfere nos testes de flamabilidade.

Para a fibra de carbono:

Foram feitos corpos de prova de fibra de carbono com resina fenólica do fornecedor B variando-se a temperatura de cura (120 °C, 130 °C, 140 °C e 150 °C) e mantendo-se constante o tempo de cura (1,5 h), a pressão e o vácuo (cura em autoclave).

Não fizemos corpos de prova de fibra de vidro com resinas do fornecedor A, porque a empresa não utiliza este compósito no interior de aeronaves.

No gráfico 9, de inflamabilidade, há novamente uma pequena diminuição no valor do comprimento de queima, indicando que o aumento de temperatura provoca aumento do número de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas, proporcionando

COMPRIMENTO DE QUEIMA (POL)

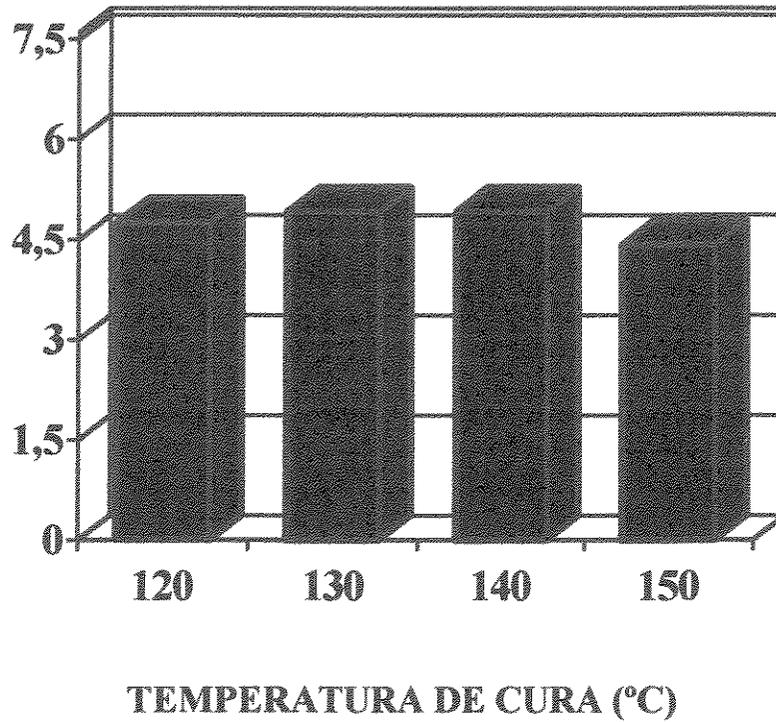


GRÁFICO 6: Inflamabilidade das amostras de compósitos de fibra de aramida com resina fenólica do fornecedor B, curadas com temperaturas diferentes num tempo de 1,5 h na autoclave.

DS

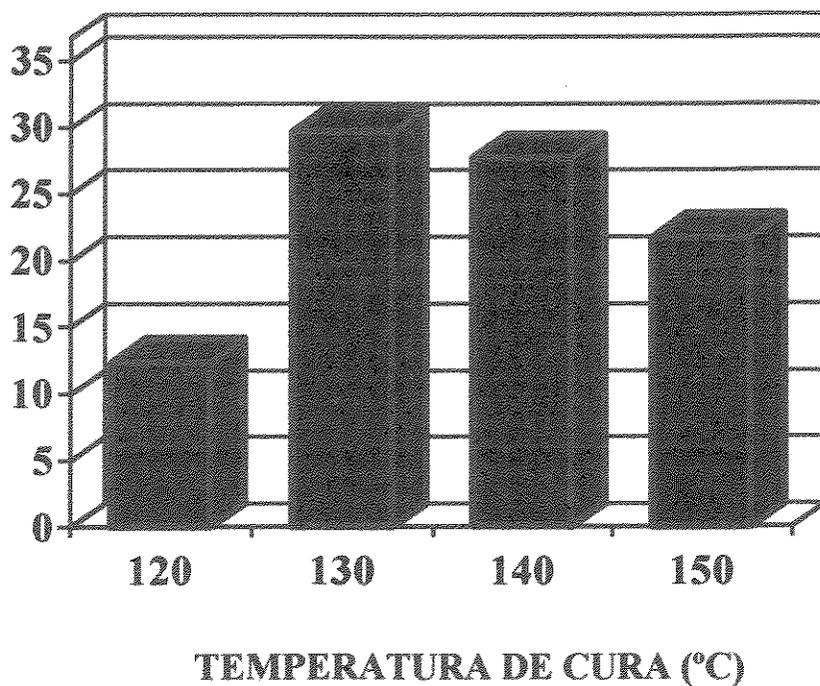


GRÁFICO 7: Densidade de fumaça das amostras de compósitos de fibra de aramida com resina fenólica do fornecedor B, curadas em temperaturas diferentes num tempo de 1,5 h na autoclave.

CALOR LIBERADO

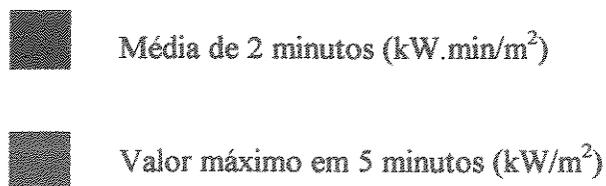
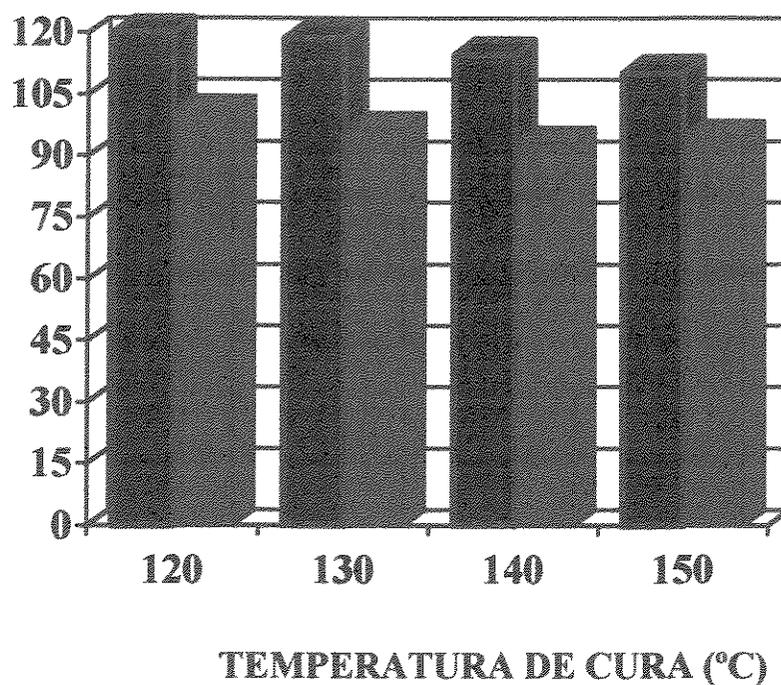


GRÁFICO 8: Emissão de calor das amostras de compósitos de fibra de aramida com resina fenólica do fornecedor B, curadas em temperaturas diferentes num tempo de 1,5 h na autoclave.

uma resina mais estável, como ocorreu nos casos anteriores. No gráfico 10, de densidade de fumaça, observamos que há uma queda no valor da densidade óptica quando se aumenta a temperatura de cura, reforçando a teoria do número de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas. No gráfico 11, de emissão de calor, observamos que há uma queda no valor da média do calor liberado, onde este se mantém constante, quando se aumenta a temperatura. São resultados coerentes com as explicações já dadas para esta fibra. Quanto ao máximo do calor liberado, verificamos que houve uma diminuição no seu valor, quando passamos de 120 °C para 130 °C, mas quando aumentamos a temperatura, os resultados tornam-se incoerentes, se mostrando ser uma dispersão do ensaio, pois muitos parametros temos que controlar. Na temperatura de 150 °C as amostras se tornam mais estáveis.

Independente do tipo de fibra, chegamos a uma temperatura ideal de cura, que é a 150 °C. Mas para obtermos este resultado, verificamos que as fibras também interferem nos ensaios de flamabilidade. Analisando o gráfico 12, de inflamabilidade, observamos que a fibra de vidro, em todas as temperaturas, apresenta uma melhor performance do que as outras, provavelmente devido a natureza inorgânica da fibra. No gráfico 13, de densidade de fumaça, chegamos à mesma conclusão: a fibra de vidro é aquela que apresenta os melhores resultados em relação as outras. No gráfico 14, de emissão de calor, verificamos que a fibra de vidro é a mais estável, pois apresenta valores mais coerentes e está dentro do permitido pela F.A.A.. A fibra de aramida, se mostrou a mais instável, isto é, influencia diretamente neste teste, pois apresenta valores mais altos que as outras fibras.

Durante os testes de temperatura, observamos que havia diferenças marcantes entre as resinas dos fabricantes A e B. Para sanar estas dúvidas, fizemos amostras com o mesmo tecido - fibra de vidro impregnada com resina fenólica, pois esta se mostrou

COMPRIMENTO DE QUEIMA (POL)

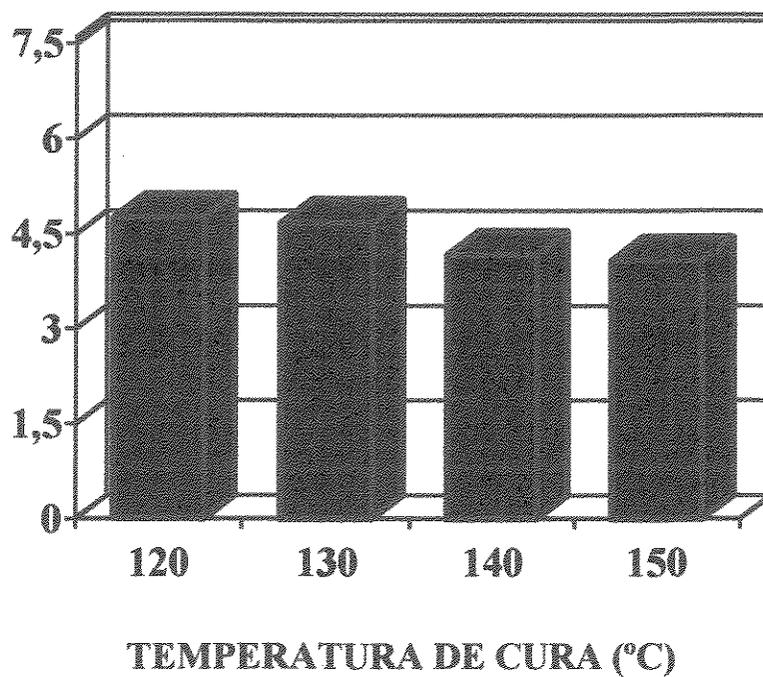


GRÁFICO 9: Inflamabilidade das amostras de compósitos de fibra de carbono com resina fenólica do fornecedor B, curadas com temperaturas diferentes num tempo de 1,5 h na autoclave.

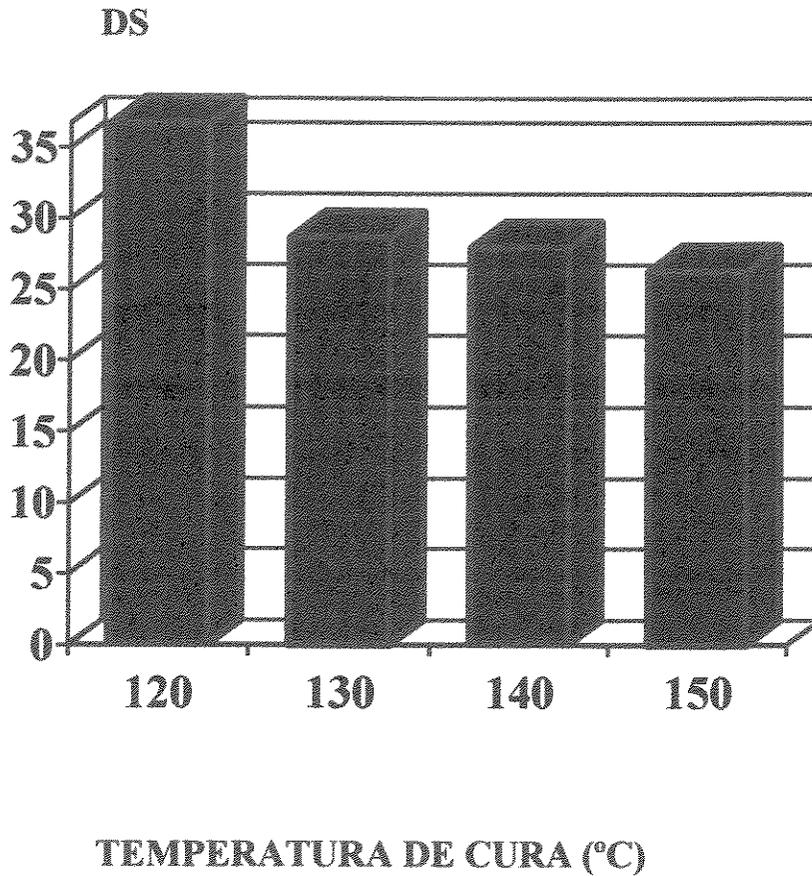


GRÁFICO 10: Densidade de fumaça das amostras de compósitos de fibra de aramida com resina fenólica do fornecedor B, curadas em temperaturas diferentes num tempo de 1,5 h na autoclave.

CALOR LIBERADO

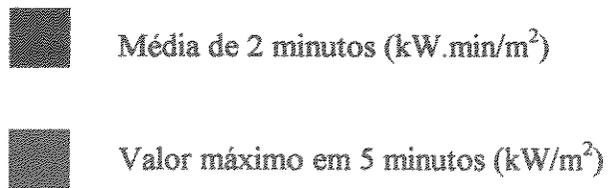
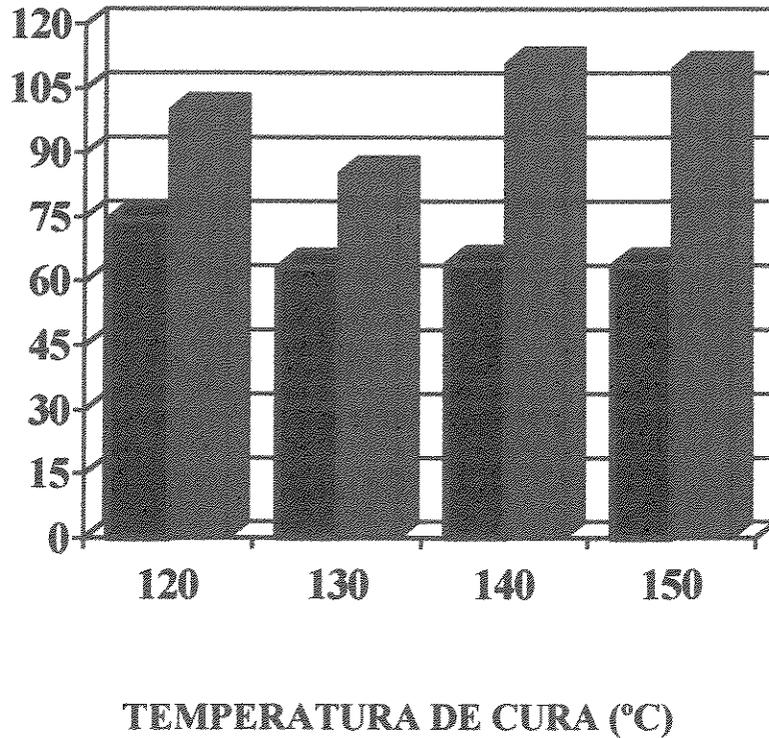


GRÁFICO 11: Emissão de calor das amostras de compósitos de fibra de carbono com resina fenólica do fornecedor B, curadas em temperaturas diferentes num tempo de 1,5 h na autoclave.

COMPRIMENTO DE QUEIMA (POL)

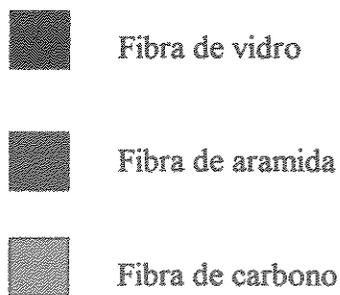
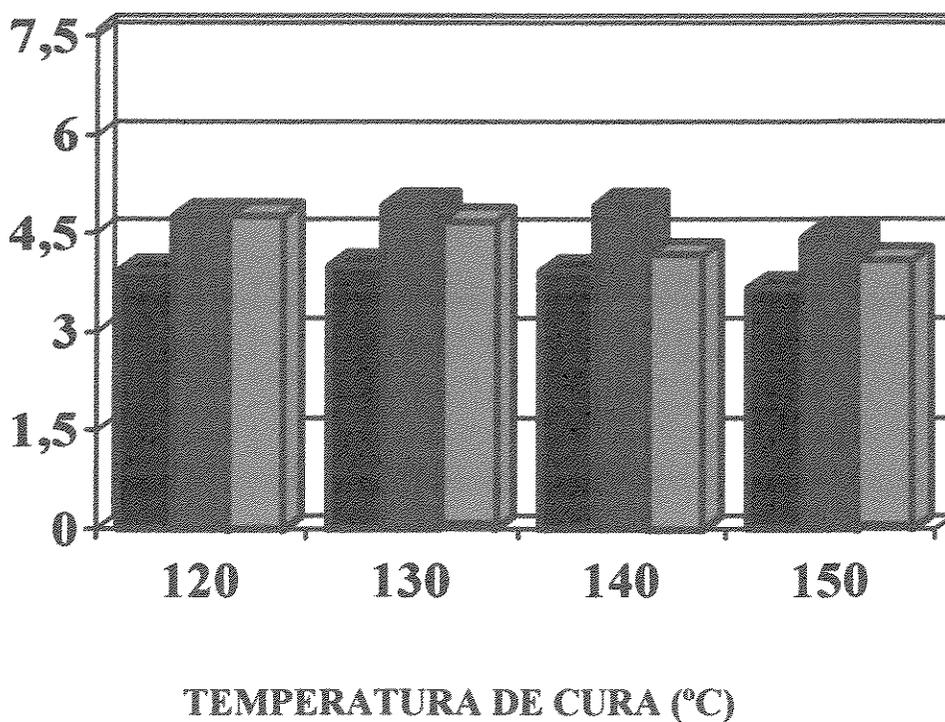
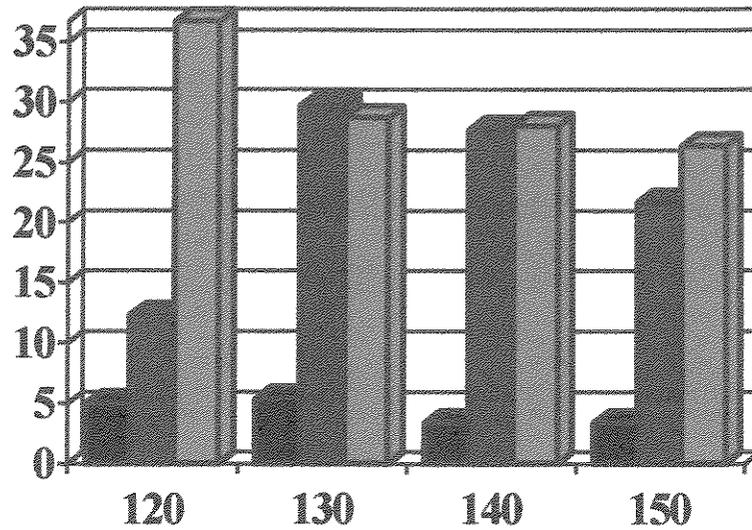


GRÁFICO 12: Comparação entre os valores de Inflamabilidade das fibras de vidro, aramida e carbono com resina fenólica, curadas a temperaturas diferentes por um tempo de 1,5 h em autoclave.

DS



TEMPERATURA DE CURA (°C)

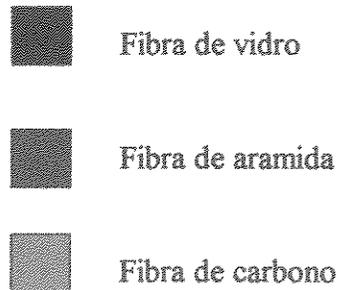
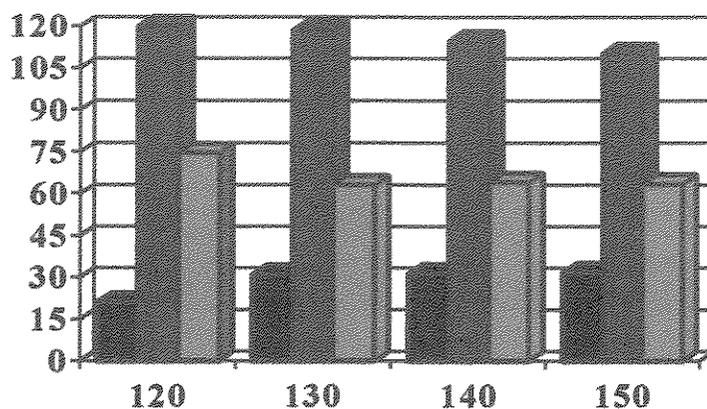
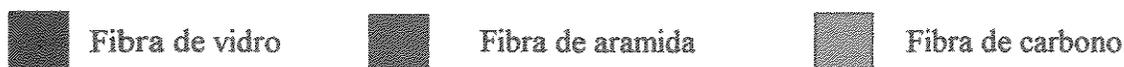


GRÁFICO 13: Comparação entre os valores de Densidade de fumaça das fibras de vidro, aramida e carbono com resina fenólica, curadas a temperaturas diferentes por um tempo de 1,5 h em autoclave.

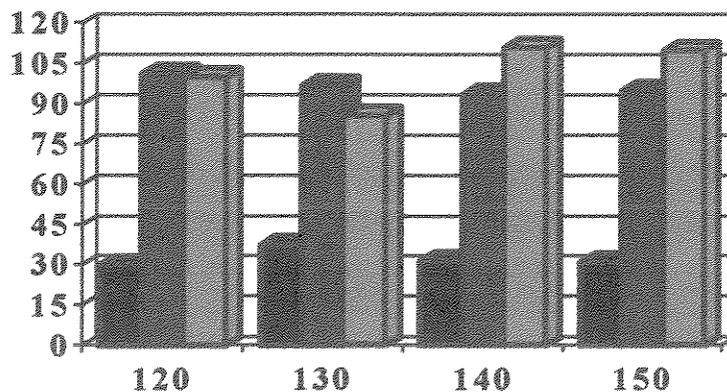
MÉDIA DO CALOR LIBERADO DURANTE 2 MIN (kW.min/m²)



TEMPERATURA DE CURA (°C)



VALORES MÁXIMOS DE CALOR LIBERADO (kW/m²)



TEMPERATURA DE CURA (°C)

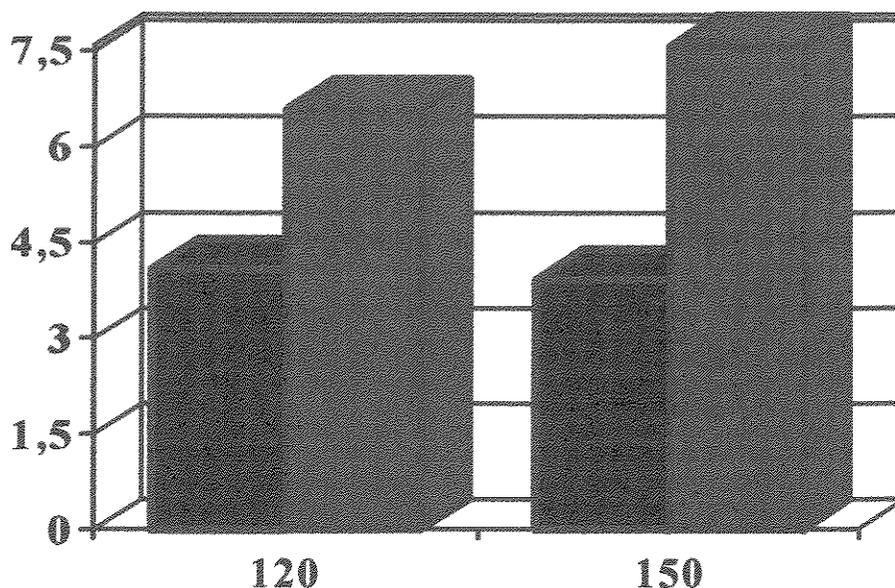


GRÁFICO 14: Comparação entre os valores de Emissão de calor das fibras de vidro, aramida e carbono com resina fenólica, curadas a temperaturas diferentes por um tempo de 1,5 h em autoclave.

a mais inerte entre todas, mas de fornecedores diferentes (A e B), para compararmos os resultados. O procedimento de fabricação foi o mesmo já descrito, mas como o compósito apresentava uma espessura mais fina, fizemos corpos de prova com 6 camadas para chegar na espessura de outros já testados. Curamos a 120°C e a 150°C, que são os extremos da temperatura investigada. O tempo de cura permaneceu o mesmo - 1,5 h. Os gráficos 15, 16 e 17, de inflamabilidade, densidade de fumaça e emissão de calor, mostram as diferenças entre as resinas A e B. No gráfico 15, de inflamabilidade, observamos que as amostras com resina A estão abaixo dos valores máximos permitidos pela F.A.A., o que não acontece com as amostras com resina B. No teste de densidade de fumaça (gráfico 16), chegamos a mesma conclusão do teste de inflamabilidade, ou seja, a resina A supera a resina B. Já no teste de emissão de calor, gráfico 17, vemos claramente que a diferença entre as resinas é marcante. Este resultado se deve ao fato de que há diferenças entre os antichamas das resinas e também de suas quantidades presentes na formulação.

Devemos salientar que os resultados dos três testes possuem valores mais altos do que os analisados pelos gráficos 3, 4 e 5, pois agora estamos utilizando amostras com seis camadas em vez de três, acarretando numa quantidade de resina maior, acentuando a diferença entre os dois fornecedores.

COMPRIMENTO DE QUEIMA (POL)



TEMPERATURA DE CURA (°C)

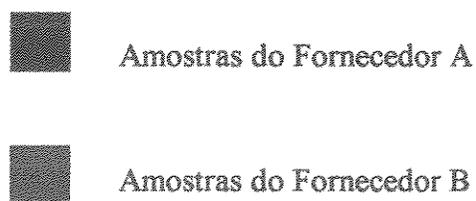


GRÁFICO 15: Inflamabilidade das amostras de compósitos de fibra de vidro com resina fenólica dos fornecedores A e B, curadas com temperaturas diferentes num tempo de 1,5 h na autoclave.

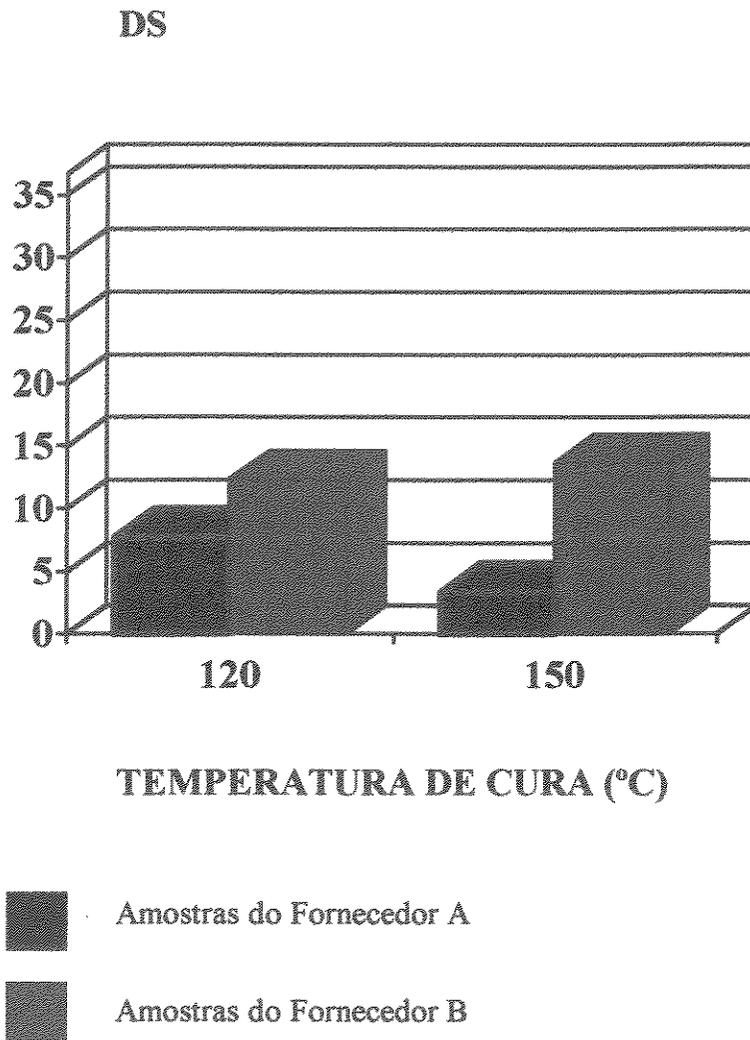
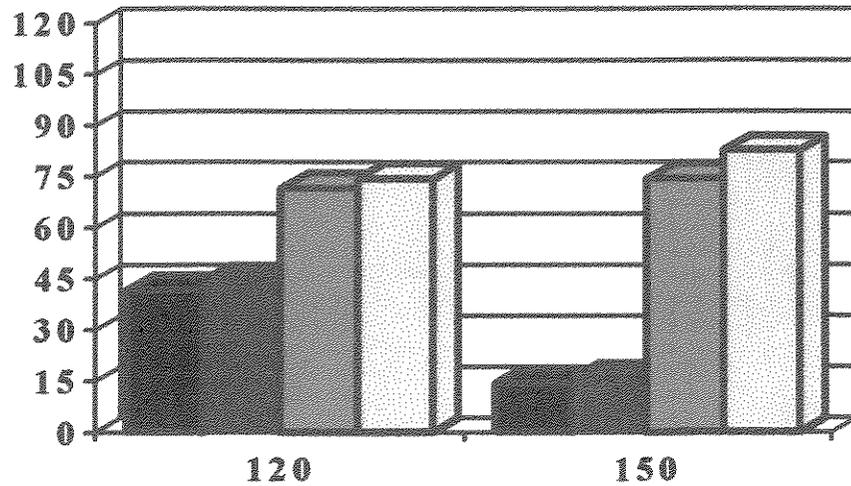


GRÁFICO 15: Densidade de Fumaça das amostras de compósitos de fibra de vidro com resina fenólica dos fornecedores A e B, curadas com temperaturas diferentes num tempo de 1,5 h na autoclave.

CALOR LIBERADO



TEMPERATURA DE CURA (°C)

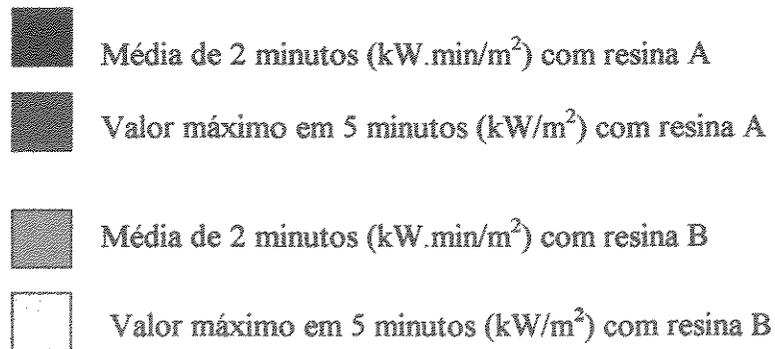


GRÁFICO 17: Emissão de calor das amostras de compósitos de fibra de vidro com resina fenólica dos fornecedores A e B, curadas com temperaturas diferentes num tempo de 1,5 h na autoclave.

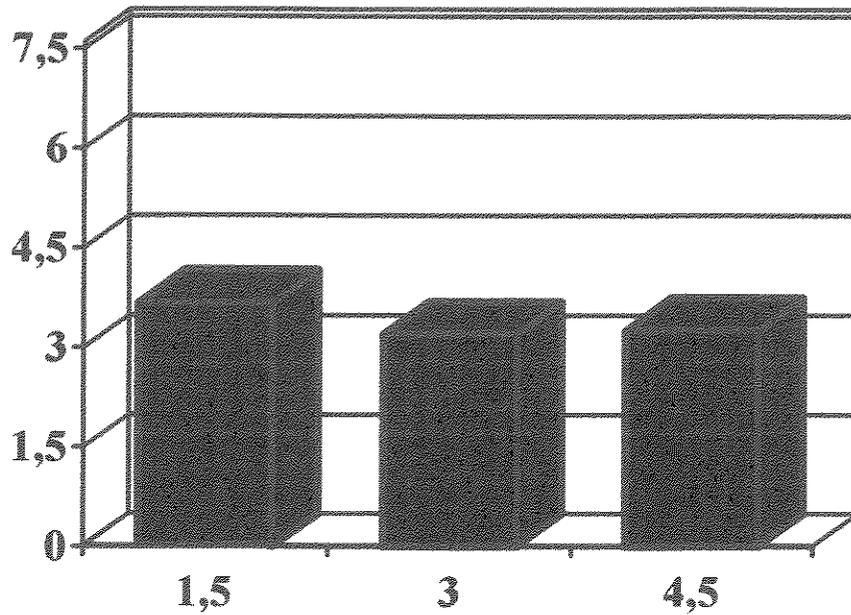
IV.2 - VARIAÇÃO DE TEMPO

Novas amostras foram feitas, mas agora, curadas à temperatura de 150°C. Variamos, então, o tempo de cura. Curamos as amostras por uma hora e meia, e depois, dentro de uma estufa, fizemos uma pós-cura de mais uma hora e meia e também de três horas, com o propósito de saber qual o tempo ideal para cura da resina fenólica.

Para a fibra de vidro:

No gráfico 18, de inflamabilidade, observamos que houve uma queda no valor do comprimento de queima quando se aumenta o tempo de exposição da amostra para 3 horas. Aumentando-se em mais 1,5 h o tempo de exposição, verificamos que o comprimento de queima também aumenta. Isto se deve ao fato de que há quebra das ligações primárias da cadeia por causa do aumento do tempo de exposição da amostra numa temperatura alta, acarretando em um início de degradação da resina. No gráfico 19, de densidade de fumaça, reforçamos a tese de que, com um tempo de exposição maior da amostra, temos a quebra das ligações primárias, comprometendo a propriedade antichama do material. No gráfico 20, de emissão de calor, observamos que o valor da média do calor liberado se manteve constante quando aumentamos o tempo de cura para 3,0 h, e este aumenta, quando as expomos durante 4,5 h. Já para o valor máximo de calor liberado, observamos que as amostras curadas num tempo de 3,0 h sofreram uma dispersão de ensaio, pois apresentam dados incoerentes, pois temos um aumento no seu valor e não uma diminuição, que era esperada. Esta dispersão é devida aos vários fatores que temos que controlar durante o teste; fatores estes já descritos anteriormente. Para amostras curadas num tempo de 4,5h, verificamos que há um aumento nos valores do gráfico de emissão de calor, reforçando a tese de que há um certo grau de degradação

COMPRIMENTO DE QUEIMA (POL)



TEMPO DE CURA (h)

GRÁFICO 18: Inflamabilidade das amostras de compósitos de fibra de vidro com resina fenólica do fornecedor A, curadas na temperatura de 150°C, num tempo de 1,5 h na autoclave e com pós cura de 1,5 h e 3,0 h.

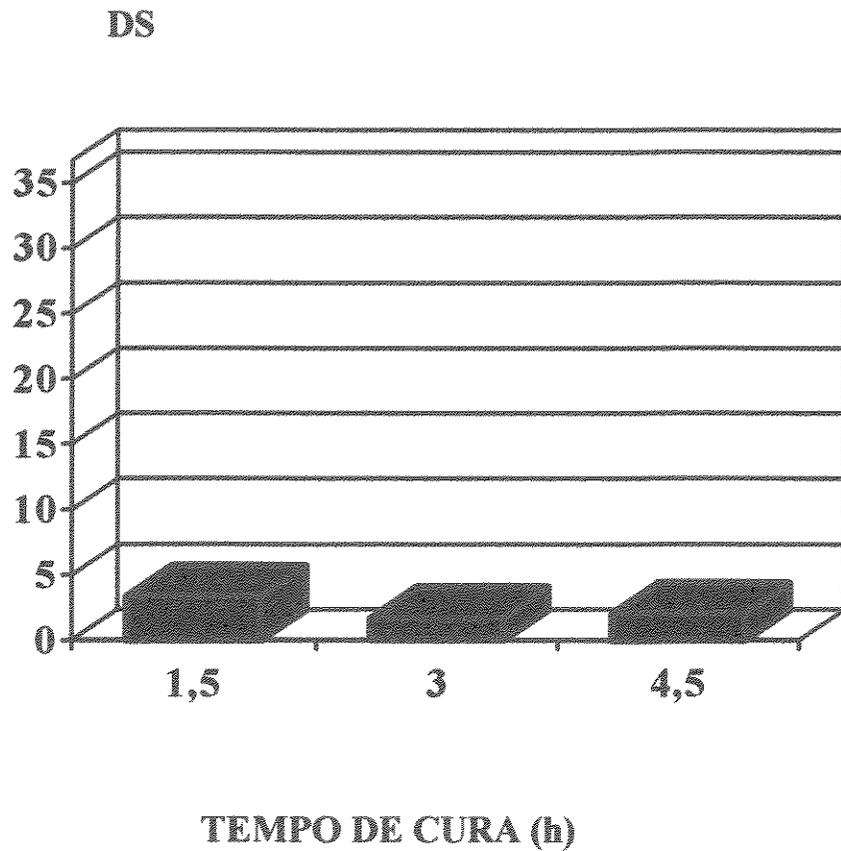


GRÁFICO 19: Densidade de Fumaça das amostras de compósitos de fibra de vidro com resina fenólica do fornecedor A, curadas na temperatura de 150°C, num tempo de 1,5 h na autoclave e com pós cura de 1,5 h e 3,0 h.

CALOR LIBERADO

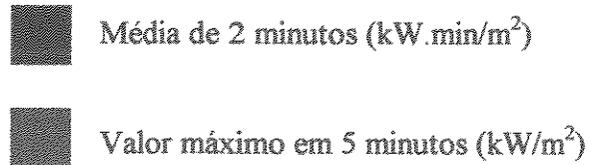
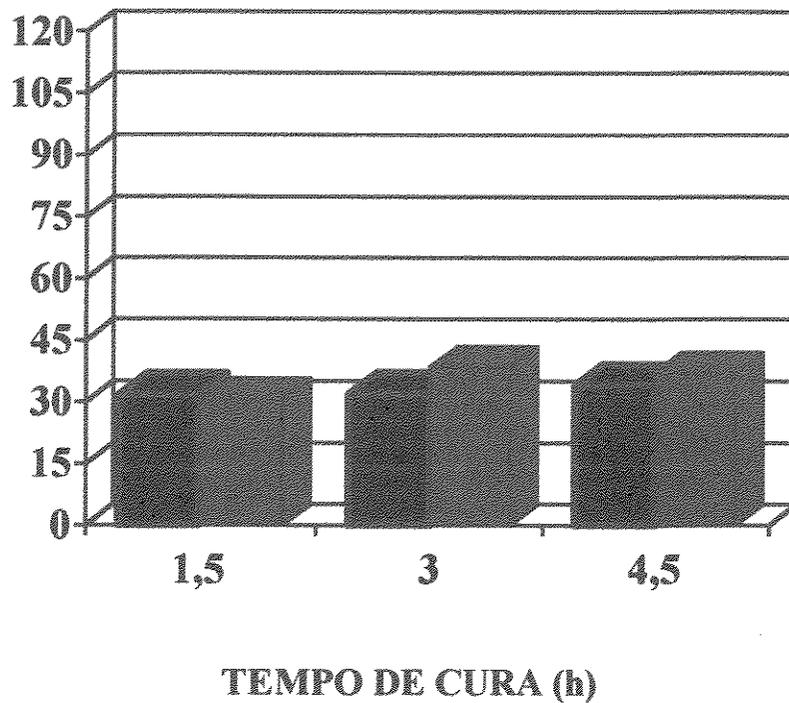


GRÁFICO 20: Emissão de calor das amostras de compósitos de fibra de vidro com resina fenólica do fornecedor A, curadas na temperatura de 150°C, num tempo de 1,5 h na autoclave e com pós cura de 1,5 h e 3,0 h.

das amostras causada pela exposição a uma temperatura e tempo maiores.

Para a fibra de aramida:

No gráfico 21, de inflamabilidade, observamos nitidamente que o melhor tempo de cura numa temperatura de 150 °C é ao redor de três horas. Acima deste tempo começamos a ter um certo grau de degradação da resina e perda das propriedades antichama. No gráfico 22, de densidade de fumaça, percebemos mais nitidamente que houve uma quebra nas ligações primárias da resina, com o aumento do tempo de exposição da amostra a temperatura de 150 °C, comprometendo, assim, a propriedade antichama do material e resultando num valor mais alto para a densidade optica. No gráfico 23, de emissão de fumaça, observamos que há uma queda no valor médio de calor liberado e também no valor máximo. Como neste teste temos que controlar várias variáveis, como por exemplo, pressão de gás de entrada, temperatura da campana, tamanho de chama, etc., a probabilidade de se ter uma dispersão no ensaio é muito grande. Por isso, consideramos o tempo de exposição ideal da amostra a temperatura de 150 °C ser o de três horas, pois é reforçado pelos outros testes.

Para a fibra de carbono:

No gráfico 24, de inflamabilidade, observamos uma redução no comprimento de queima quando aumentamos o tempo de exposição da amostra a temperatura de 150 °C de 1,5 h para 3,0 h. Isto nos dá indícios de que o ciclo de cura foi completado e que temos uma resina estável. Quando aumentamos o tempo de exposição da amostra a temperatura de 150 °C, notamos um aumento no valor do comprimento de queima, devido ao início de degradação da resina. No gráfico 25, de densidade de fumaça,

COMPRIMENTO DE QUEIMA (POL)

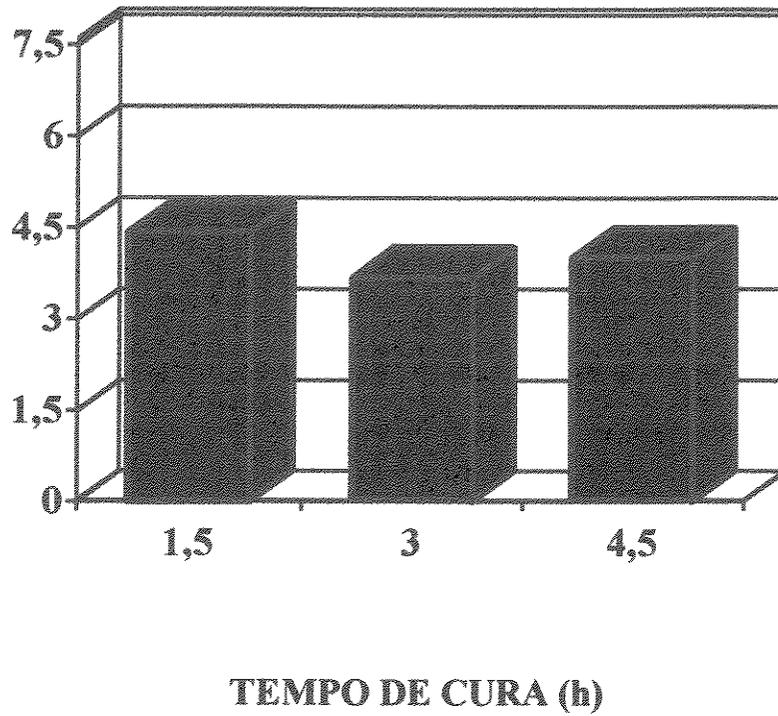


GRÁFICO 21: Inflamabilidade das amostras de compósitos de fibra de aramida com resina fenólica do fornecedor B, curadas na temperatura de 150°C, num tempo de 1,5 h na autoclave e com pós cura de 1,5 h e 3,0 h.

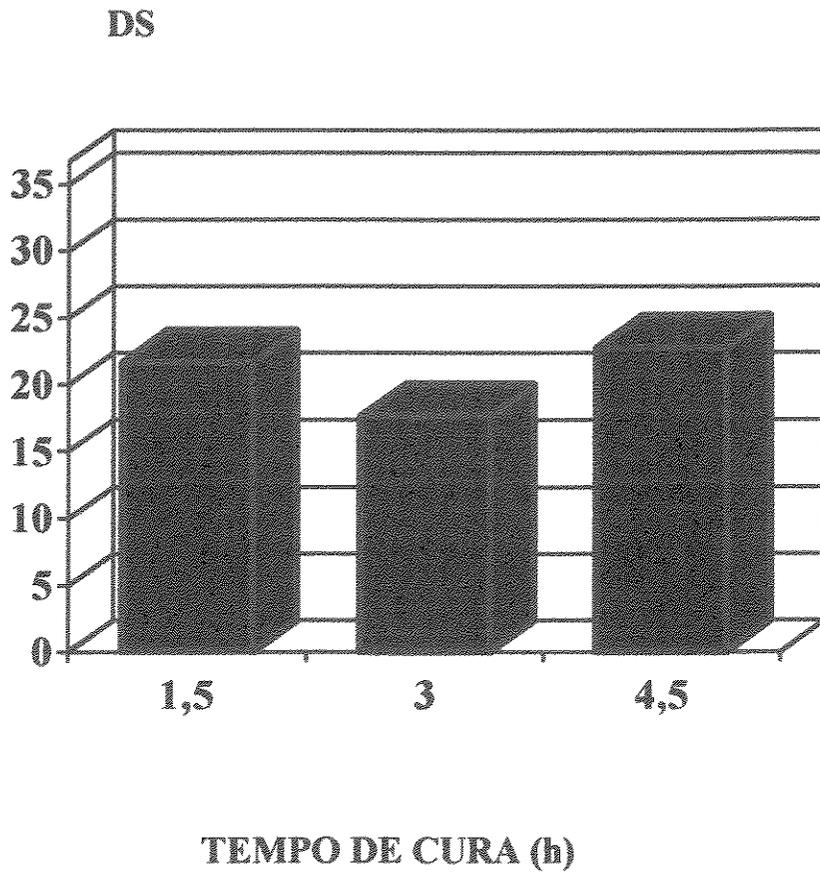


GRÁFICO 22: Densidade de Fumaça das amostras de compósitos de fibra de aramida com resina fenólica do fornecedor B, curadas na temperatura de 150°C, num tempo de 1,5 h na autoclave e com pós cura de 1,5 h e 3,0 h.

CALOR LIBERADO

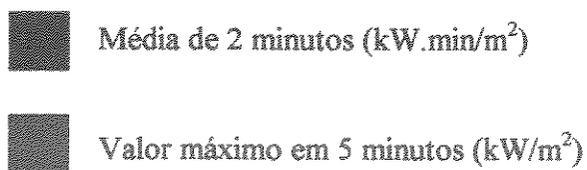
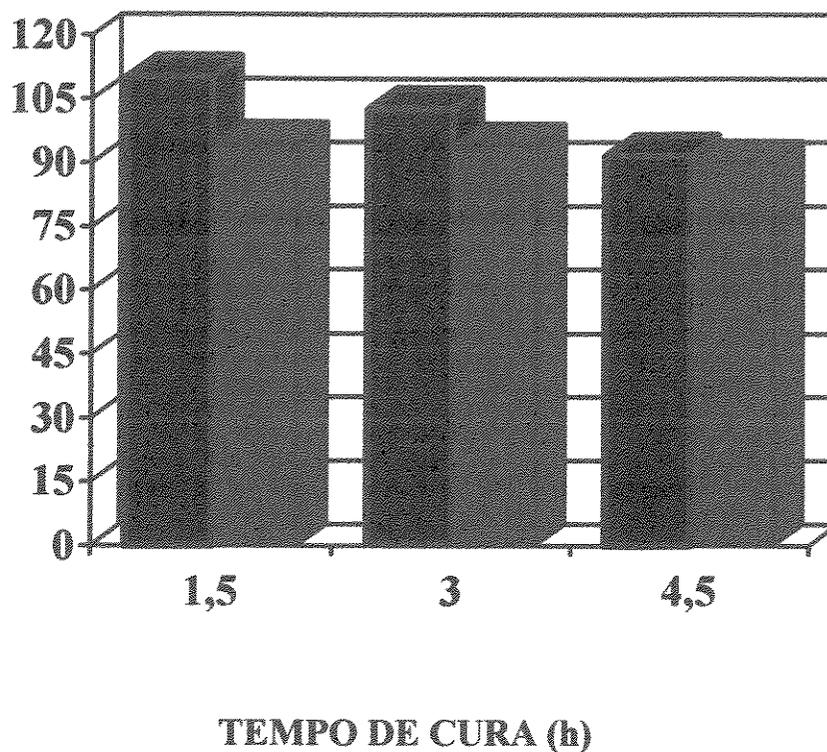


GRÁFICO 23: Emissão de calor das amostras de compósitos de fibra de aramida com resina fenólica do fornecedor B, curadas na temperatura de 150°C, num tempo de 1,5 h na autoclave e com pós cura de 1,5 h e 3,0 h.

verificamos que aumentando o tempo de exposição das amostras a temperatura de 150°C, houve a diminuição da emissão de fumaça, proporcionando uma resina estável. No gráfico 26, de emissão de calor, os valores da média do calor liberado contradizem os resultados dos outros dois testes, indicando haver uma interferência dos parâmetros a serem controlados como a pressão de entrada do gás, temperatura da campana, etc. Já para o valor máximo, podemos dizer que a cura à 150 °C num tempo de três horas, proporciona uma melhor estabilidade da resina.

COMPRIMENTO DE QUEIMA (POL)

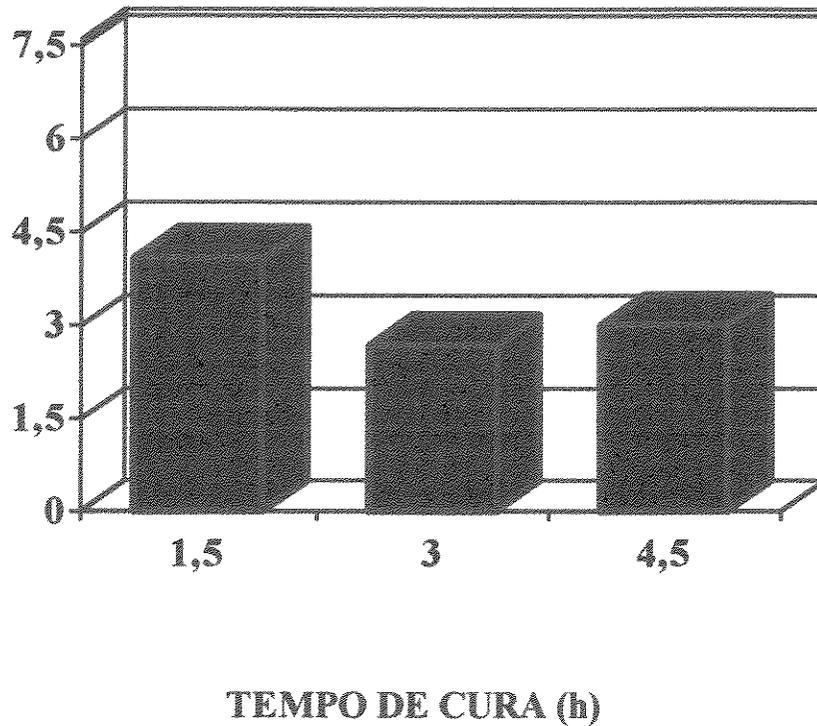


GRÁFICO 24: Inflamabilidade das amostras de compósitos de fibra de carbono com resina fenólica do fornecedor B, curadas na temperatura de 150°C, num tempo de 1,5 h na autoclave e com pós cura de 1,5 h e 3,0 h.

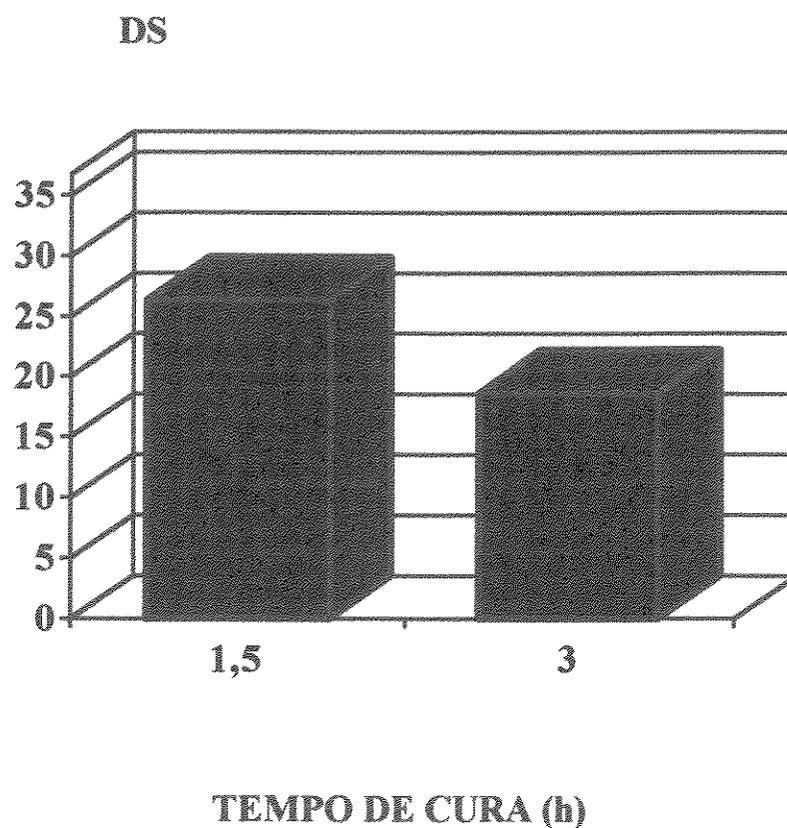
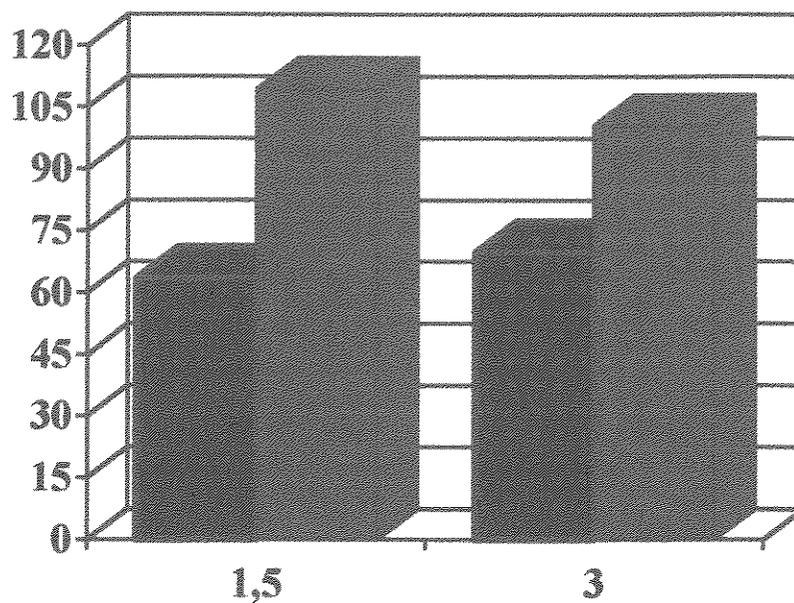


GRÁFICO 25: Densidade de Fumaça das amostras de compósitos de fibra de carbono com resina fenólica do fornecedor B, curadas na temperatura de 150°C, num tempo de 1,5 h na autoclave e com pós cura de 1,5 h.

CALOR LIBERADO



TEMPO DE CURA (h)

- Média de 2 minutos (kW.min/m²)
- Valor máximo em 5 minutos (kW/m²)

GRÁFICO 26: Emissão de calor das amostras de compósitos de fibra de carbono com resina fenólica do fornecedor B, curadas na temperatura de 150°C, num tempo de 1,5 h na autoclave e com pós cura de 1,5 h.

CONCLUSÕES

V - CONCLUSÕES

Concluimos que para a fibra de vidro com resina fenólica do fornecedor A, a temperatura ideal de cura é 150°C, pois foi onde tivemos os melhores resultados dos testes de flamabilidade.

Para a fibra de aramida, a temperatura ideal de cura é de 150°C, apesar dos dados do teste de emissão de fumaça estar acima do permitido pela F.A.A..

Para a fibra de carbono, a temperatura ideal de cura é de 150°C.

Apesar de alguns resultados estarem acima dos valores permitidos pela F.A.A., a temperatura de cura que forneceu resultados satisfatórios quanto aos testes de flamabilidade foi a de 150°C para as três fibras.

Entre todas as fibras, aquela que apresentou ser a mais estável é a fibra de vidro, pois os resultados dos testes de flamabilidade confirmam esta conclusão

Os resultados sobre os fornecedores reforçam a tese de que a temperatura ideal de cura é de 150°C e que, entre as duas resinas, aquela que apresenta melhores resultados nos testes de flamabilidade é a resina do fornecedor A.

O tempo de cura ideal à temperatura de 150°C é de três horas para todas as fibras com resina fenólica (fornecedor A e B).

Estudos anteriores e catálogos de fabricantes [15], já demonstravam que a temperatura de cura da resina fenólica deveria ser ao redor de 150°C. Esta tese, além de concluir este fato, contribuiu para encontrar o tempo de cura da resina fenólica, ficando ao redor de três horas. Com um tempo maior de exposição da resina nesta temperatura, a reticulação (ligação entre as cadeias) aumenta, garantindo melhores resultados nos testes de flamabilidade.

V.1 - RELAÇÃO CUSTO/BENEFÍCIO

Fazendo-se uma análise quanto ao custo/benefício de se aplicar os resultados obtidos na produção de peças de aeronaves, podemos dizer que, atualmente, na Embraer, são feitas curas à temperatura de 120°C e 180°C, pois além de peças com resina fenólica, utilizam-se outras resinas em lugares onde não há contato com passageiros e tripulantes. Assim, peças com resina fenólica são curadas à temperatura de 120°C durante 1,5h. Como foi verificado que a temperatura ideal de cura da resina fenólica é 150°C; e que o tempo ideal de cura da resina é de três horas; e que o custo da autoclave para a temperatura de 150°C é o mesmo para 120°C, propomos que todas as peças de interiores, que possuem resina fenólica, devem ser curadas à temperatura de 150°C. As quantidades de peças já justificam uma nova temperatura de cura entre 120°C e 180°C, pois os resultados de todos os testes, que são necessários à homologação de qualquer aeronave, mostraram ser a temperatura de 150°C ideal para a cura, trazendo, assim, um benefício para o controle de qualidade para a empresa.

V.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

-- Desenvolver um trabalho mudando-se a formulação da resina fenólica para que possamos aumentar a temperatura de cura e diminuir o tempo de exposição da amostra na autoclave.

-- Pesquisar várias formulações com diferentes concentrações de aditivos antichama, adicionados separadamente ou em conjunto no sentido de se verificar algum sinergismo.

-- Verificar a influência de fibras de vidro, aramida e carbono modificadas, nas propriedades mecânicas dos compósitos obtidos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AL - QURESHI, H. A. - Composite Materials: Fabrication and Analysis, IEM - T - São José dos Campos - SP, 1984.

- [2] FERREIRA, J. R. - Características da usinagem de um compósito de resina fenólica reforçada com fibras de vidro e carbono, Tese de Mestrado - UNICAMP - SP - 1992.

- [3] BOGDANOVA, V. V.; KLINOVTSOVA, I. A.; FEDW, S. S.; LESNIKOVICH, A. I. - On the effectiveness of Antimony - Halogen containing fire retardants, Polymer Science - 1992.

- [4] HILL, R. G.; EKLUND, T. I.; SARKOS, C. P. - Aircraft interior panel test criteria derived from full-scale fire tests, U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, New Jersey - 1985.

- [5] Handbook of Flammability tests - F.A.A. Capítulo 1 - Vertical Bunsen Burner Test for Cabin and Cargo Compartment Materials

- [6] Handbook of Flammability Tests - F.A.A. - Capítulo 5 - Heat Release Rate Test for Cabin Materials

- [7] Handbook of Flammability - Capítulo 6 - Smoke Test for Cabin Materials

- [8] LÉLIS, G. M. - Materiais Compostos - Curso Básico. EMBRAER S/A - São José dos Campos - S. P. - 1986.
- [9] BULLMEYER, F. W. JR. - Textbook of Polymer Science - Interscience Publishers, pág. 463, cap. 19 - 1962.
- [10] VARIOS AUTORES - Synthetic Resins and Allied Plastics, Oxford University Press - 1951.
- [11] Manual do Escritório de Desenhos da EMBRAER (MED) - Norma Interna EMBRAER.
- [12] Manual de Instrução EMBRAER - Noções de materiais compostos.
- [13] Aerospace Composites & Materials - Volume 3 Number 3 - Maio de 1991 - páginas 12 a 16.
- [14] Federal Aviation Administration - Ministério dos Transportes E.U.A. - normas nº 25.853 e nº 25.857 - 1991
- [15] BROCHIER S/A - Ciba-Geigy, Phenolic Prepregs for Aircraft Interiors Meeting the New F.A.A. Requirements, May - 1989.
- [16] R 1620 - A Controlled Flow, Self-Adhesive Phenolic Resin for Laminates and Sandwich Panels 125-150 °C Cure, Hexcel Corporation - California - U.S.A. - 1988

- [17] McNALLY, G. M. - Composites in Aerospace Applications, High Value Polymers - Belfast.
- [18] Modern Plastics Enciclopédia, Mc-Graw Hill, página 133 - 1989
- [19] SCHMIDT, A. X., MARLIES, C. A. - Principles de High Polymer - Teory e Practice, cap. 16, pág. 655, McGraw-Hill Book Company, INC. - 1948.
- [20] MORGAN, P. - Plastics Progress, pág. 341, Editor of British Pastics, 1957.
- [21] SIMONDS, H. R.; WEITH, A.; BIGELOW, M. H. - Handbook of Plastics, pág. 587, D.Van Nostrand Company, INC, 1949
- [22] ENGEL, H. C.; HEMMING, C. B.; MERRIMAN, H. R. - Structural plastics, McGraw-Hill Book Company, INC, 1950.
- [23] REINHART, T. J. - Engineering Materials Handbook, Composites, ASM International , Ohio, 1987.
- [24] MALHOTRA, S. K. - High Speed Steel Tool Wear Studies in Machining of Glass-Fiber Reinforced Plastics. Wear, 1989.
- [25] SPUR, G.; WUNSCH, U. E. - Turning of fibre Reinforced Thermoseting Plastics. Kunststoffe German Plastics, 1986.

- [26] HULL, D. - An Introduction to Composite Materials. Cambridge University Press, 1981.
- [27] KELLY, A.; MILEIKO, S. T. - Fabrication of Composites, Handbook of Composites, vol. 4, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1983.
- [28] NASCIMENTO, K. D. - Análise e Síntese de Placas Sandwiche Reforçadas, Anuário de Pesquisa, UNICAMP, S.P., 1991.
- [29] SHELDON, R. P. - Composite Polimeric Materials, University of Bradford, U.K., 1982.
- [30] ODIAN, G. - Principles of Polymerization, McGraw Hill, New York, 1970.
- [31] GÄCHTER, R.; MÜLLER, H. - Plastics Additives Handbook, pág 536, Hanser Publishers, Munich Vienna New York, 1985.

ANEXO I - TABELAS COM OS DADOS EXPERIMENTAIS

TABELA 1: Dados experimentais do gráfico 3

| TEMPERATURA (°C) | 1° ENSAIO (POL) | 2° ENSAIO (POL) | 3° ENSAIO (POL) | MÉDIA (POL) |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 120 | 4.00 | 3.75 | 4.00 | 3.92 |
| 130 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| 140 | 4.00 | 4.00 | 3.75 | 3.92 |
| 150 | 3.75 | 3.75 | 3.50 | 3.67 |

TABELA 2: Dados experimentais do gráfico 4

| TEMPERATURA (°C) | 1° ENSAIO | 2° ENSAIO | 3° ENSAIO | MÉDIA |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 120 | 6.00 | 2.00 | 7.00 | 5.00 |
| 130 | 6.00 | 7.00 | 3.00 | 5.33 |
| 140 | 2.00 | 2.00 | 6.00 | 3.33 |
| 150 | 4.00 | 4.00 | 2.00 | 3.33 |

TABELA 3: Dados experimentais do gráfico 5

| TEMP. (°C) | MÉDIA (kW.mim/m ²) | | | | VALOR MÁXIMO (kW/m ²) | | | |
|------------|--------------------------------|---------|---------|-------|-----------------------------------|---------|---------|-------|
| | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA |
| 120 | 26.63 | 30.86 | 5.61 | 21.03 | 34.95 | 36.78 | 17.47 | 29.73 |
| 130 | 42.10 | 31.84 | 18.94 | 30.96 | 46.87 | 42.33 | 22.16 | 37.12 |
| 140 | 25.21 | 40.67 | 39.98 | 35.29 | 24.07 | 37.21 | 32.79 | 31.36 |
| 150 | 27.50 | 27.14 | 40.43 | 31.69 | 19.93 | 29.73 | 42.47 | 30.71 |

TABELA 4: Dados experimentais do gráfico 6

| TEMPERATURA (°C) | 1° ENSAIO (POL) | 2° ENSAIO (POL) | 3° ENSAIO (POL) | MÉDIA (POL) |
|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|
| 120 | 4.50 | 5.00 | 4.75 | 4.75 |
| 130 | 4.75 | 5.00 | 5.00 | 4.92 |
| 140 | 4.75 | 5.00 | 5.00 | 4.92 |
| 150 | 4.25 | 4.50 | 4.50 | 4.42 |

TABELA 5: Dados experimentais do gráfico 7

| TEMPERATURA (°C) | 1° ENSAIO | 2° ENSAIO | 3° ENSAIO | MÉDIA |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 120 | 10.00 | 16.00 | 11.00 | 12.30 |
| 130 | 34.00 | 26.00 | 29.00 | 29.67 |
| 140 | 26.00 | 21.00 | 36.00 | 27.67 |
| 150 | 22.00 | 29.00 | 19.50 | 22.80 |

TABELA 6: Dados experimentais do gráfico 8

| TEMP. (°C) | MÉDIA (kW.mim/m ²) | | | | VALOR MÁXIMO (kW/m ²) | | | |
|---------------|--------------------------------|---------|---------|--------|-----------------------------------|---------|---------|--------|
| | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA |
| 120 | 118.39 | 118.81 | 127.02 | 121.41 | 91.11 | 104.80 | 106.96 | 100.96 |
| 130 | 106.63 | 141.40 | 107.59 | 118.54 | 85.09 | 108.70 | 96.41 | 96.73 |
| 140 | 102.06 | 120.33 | 121.42 | 114.60 | 82.58 | 95.19 | 102.34 | 93.37 |
| 150 | 112.54 | 108.83 | 109.08 | 110.15 | 90.60 | 97.22 | 96.67 | 94.83 |

TABELA 7: Dados experimentais do gráfico 9

| TEMPERATURA (°C) | 1° ENSAIO (POL) | 2° ENSAIO (POL) | 3° ENSAIO (POL) | MÉDIA (POL) |
|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|
| 120 | 4.75 | 4.75 | 4.75 | 4.75 |
| 130 | 4.75 | 4.75 | 4.50 | 4.67 |
| 140 | 4.00 | 4.50 | 4.00 | 4.17 |
| 150 | 4.00 | 4.00 | 4.25 | 4.08 |

TABELA 8: Dados experimentais do gráfico 10

| TEMPERATURA (°C) | 1° ENSAIO | 2° ENSAIO | 3° ENSAIO | MÉDIA |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 120 | 24.00 | 47.00 | 39.00 | 36.67 |
| 130 | 22.00 | 31.00 | 33.00 | 28.67 |
| 140 | 22.00 | 40.00 | 22.00 | 28.00 |
| 150 | 27.00 | 24.00 | 28.00 | 26.30 |

TABELA 9: Dados experimentais do gráfico 11

| TEMP. (°C) | MÉDIA (kW.mim/m ²) | | | | VALOR MÁXIMO (kW/m ²) | | | |
|---------------|--------------------------------|---------|---------|-------|-----------------------------------|---------|---------|--------|
| | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA |
| 120 | 72.25 | 77.53 | 73.62 | 74.46 | 97.51 | 103.29 | 98.96 | 99.92 |
| 130 | 60.49 | 67.03 | 61.87 | 63.13 | 89.65 | 88.87 | 77.56 | 85.36 |
| 140 | 60.39 | 66.72 | 64.85 | 63.99 | 108.90 | 110.38 | 112.91 | 110.73 |
| 150 | 63.63 | 55.35 | 71.46 | 63.48 | 112.58 | 88.52 | 127.58 | 109.56 |

TABELA 10: Dados experimentais do gráfico 15

| TEMP. (°C) | FORNECEDOR A | | | | FORNECEDOR B | | | |
|---------------|--------------|---------|---------|-------|--------------|---------|---------|-------|
| | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA |
| 120 | 4.00 | 4.00 | 4.25 | 4.08 | 6.25 | 5.75 | 7.75 | 6.58 |
| 150 | 3.75 | 4.00 | 4.00 | 3.92 | 7.25 | 8.00 | 7.50 | 7.58 |

TABELA 11: Dados experimentais do gráfico 16

| TEMP. (°C) | FORNECEDOR A | | | | FORNECEDOR B | | | |
|---------------|--------------|---------|---------|-------|--------------|---------|---------|-------|
| | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA |
| 120 | 6.50 | 7.50 | 9.00 | 7.67 | 15.00 | 11.00 | 11.00 | 12.33 |
| 150 | 4.00 | 2.00 | 4.00 | 3.33 | 11.00 | 16.00 | 14.00 | 13.67 |

TABELA 12: Dados experimentais do gráfico 17

| TEMP. (°C) | FORNECEDOR A | | | | | | | |
|---------------|--------------------------------|---------|---------|-------|-----------------------------------|---------|---------|-------|
| | MÉDIA (kW.mim/m ²) | | | | VALOR MÁXIMO (kW/m ²) | | | |
| | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA |
| 120 | 44.15 | 36.64 | 44.57 | 41.79 | 45.01 | 47.09 | 43.42 | 45.17 |
| 130 | 9.27 | 16.73 | 17.32 | 14.44 | 15.90 | 16.81 | 16.21 | 16.31 |

| TEMP. (°C) | FORNECEDOR B | | | | | | | |
|---------------|--------------------------------|---------|---------|-------|-----------------------------------|---------|---------|-------|
| | MÉDIA (kW.mim/m ²) | | | | VALOR MÁXIMO (kW/m ²) | | | |
| | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA |
| 120 | 72.67 | 64.88 | 77.52 | 71.69 | 73.74 | 73.77 | 75.92 | 74.48 |
| 130 | 66.77 | 80.54 | 75.75 | 74.35 | 86.22 | 83.06 | 78.85 | 82.71 |

TABELA 13: Dados experimentais do gráfico 18

| TEMPO (h) | 1º ENSAIO (POL) | 2º ENSAIO (POL) | 3º ENSAIO (POL) | MÉDIA (POL) |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 1.5 | 3.75 | 3.75 | 3.50 | 3.67 |
| 3.0 | 3.00 | 3.25 | 3.25 | 3.20 |
| 4.5 | 3.25 | 3.25 | 3.25 | 3.25 |

TABELA 14: Dados experimentais do gráfico 19

| TEMPO (h) | 1º ENSAIO | 2º ENSAIO | 3º ENSAIO | MÉDIA |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 1.5 | 4.00 | 4.00 | 2.00 | 3.33 |
| 3.0 | 1.50 | 1.50 | 2.00 | 1.67 |
| 4.5 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |

TABELA 15: Dados experimentais do gráfico 20

| TEMP. (°C) | MÉDIA (kW.mim/m ²) | | | | VALOR MÁXIMO (kW/m ²) | | | |
|------------|--------------------------------|---------|---------|-------|-----------------------------------|---------|---------|-------|
| | 1º ens. | 2º ens. | 3º ens. | MÉDIA | 1º ens. | 2º ens. | 3º ens. | MÉDIA |
| 1.5 | 27.50 | 27.14 | 40.43 | 31.69 | 19.93 | 29.73 | 42.47 | 30.71 |
| 3.0 | 34.02 | 27.25 | 34.34 | 31.87 | 40.10 | 32.32 | 43.43 | 38.62 |
| 4.5 | 30.80 | 33.08 | 38.11 | 34.00 | 31.40 | 39.90 | 39.83 | 37.04 |

TABELA 16: Dados experimentais do gráfico 21

| TEMPO (h) | 1° ENSAIO (POL) | 2° ENSAIO (POL) | 3° ENSAIO (POL) | MÉDIA (POL) |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 1.5 | 4.25 | 4.50 | 4.50 | 4.42 |
| 3.0 | 3.75 | 3.50 | 3.75 | 3.67 |
| 4.5 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |

TABELA 17: Dados experimentais do gráfico 22

| TEMPO (h) | 1° ENSAIO | 2° ENSAIO | 3° ENSAIO | MÉDIA |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 1.5 | 22.00 | 22.00 | 21.00 | 21.67 |
| 3.0 | 15.00 | 16.00 | 22.00 | 17.67 |
| 4.5 | 20.00 | 29.00 | 19.50 | 22.80 |

TABELA 18: Dados experimentais do gráfico 23

| TEMP. (°C) | MÉDIA (kW.mim/m ²) | | | | VALOR MÁXIMO (kW/m ²) | | | |
|------------|--------------------------------|---------|---------|--------|-----------------------------------|---------|---------|-------|
| | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA |
| 1.5 | 112.54 | 108.83 | 109.08 | 110.15 | 90.60 | 97.22 | 96.67 | 94.83 |
| 3.0 | 106.98 | 106.88 | 93.67 | 102.51 | 98.34 | 96.62 | 88.01 | 94.32 |
| 4.5 | 84.56 | 101.32 | 88.80 | 91.56 | 84.74 | 96.00 | 90.12 | 90.29 |

TABELA 19: Dados experimentais do gráfico 24

| TEMPO (h) | 1° ENSAIO (POL) | 2° ENSAIO (POL) | 3° ENSAIO (POL) | MÉDIA (POL) |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 1.5 | 4.00 | 4.00 | 4.25 | 4.08 |
| 3.0 | 2.75 | 2.50 | 2.75 | 2.67 |
| 4.5 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |

TABELA 20: Dados experimentais do gráfico 25

| TEMPO (h) | 1° ENSAIO | 2° ENSAIO | 3° ENSAIO | MÉDIA |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 1.5 | 27.00 | 24.00 | 28.00 | 26.30 |
| 3.0 | 19.00 | 13.00 | 24.00 | 18.67 |

TABELA 15: Dados experimentais do gráfico 26

| TEMP. (°C) | MÉDIA (kW.mim/m ²) | | | | VALOR MÁXIMO (kW/m ²) | | | |
|------------|--------------------------------|---------|---------|-------|-----------------------------------|---------|---------|--------|
| | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA | 1° ens. | 2° ens. | 3° ens. | MÉDIA |
| 1.5 | 63.63 | 55.35 | 71.46 | 63.48 | 112.58 | 88.52 | 127.58 | 109.56 |
| 3.0 | 75.92 | 58.42 | 74.86 | 69.73 | 104.34 | 84.17 | 113.40 | 100.64 |