



# COMPRESSÃO DE MATERIAL COMPÓSITO – RESINA PARA LAMINAÇÃO (AERONÁUTICA X AUTOMOBILÍSTICA).

G.A.R. Gouveia<sup>1,\*</sup>; M.C.S. Filho<sup>1</sup>; S.M. Lugones<sup>1</sup>

1 Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos - Professor Jessen Vidal  
Av. Cesare Mansueto Giulio Lattes, 1350 - Eugênio de Melo, São José dos Campos/SP,  
CEP.: 12247-014, Brasil.  
Telefone: (12) 3905-2423

\*[gabriel\\_amal@hotmail.com](mailto:gabriel_amal@hotmail.com)

**RESUMO:** No presente trabalho foram realizados testes de compressão com o propósito de obter comportamentos e parâmetros de diferentes resinas para serem utilizados em simulações estruturais em diferentes contextos que envolvam efeitos de flambagem. Pretende-se gerar um banco de dados do comportamento da resina epóxi, amplamente utilizada na área aeronáutica e da resina automobilística, que é o outro alvo do trabalho devido a seus benefícios econômicos.

**PALAVRAS-CHAVE:** molde; corpo de prova; ensaios; compressão.

**ABSTRACT:** In the present work compression tests were performed with the purpose of obtaining behaviors and parameters of different resins to be used in structural simulations in different contexts involving buckling effects. It is intended to generate a database of the behavior of the epoxy resin, widely used in aeronautics and automobile resin is the other target of labor due to its economic benefits

**KEYWORDS:** mold; specimen; testing; compression.

## 1. INTRODUÇÃO.

As Faculdades de Tecnologia relacionadas ao Centro Paula Souza foram concebidas com um enfoque integralmente tecnológico. Este conceito expressa que o foco do ensino deve ser orientado ao auxílio das necessidades imediatas do mercado empresarial brasileiro, diferente das instituições e universidades de ensino clássicas com maior foco na pesquisa e desenvolvimento científico. A unidade de São José dos Campos almeja estimular todos os envolvidos a participarem em projetos com foco na sustentabilidade e relacionados com o desenvolvimento integrado do produto.

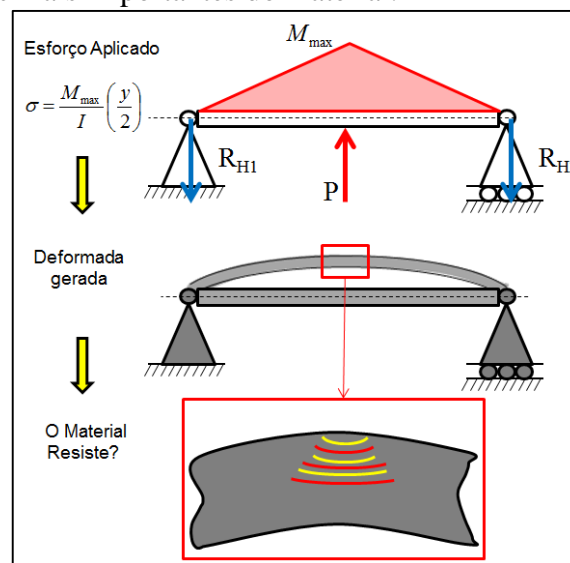
Na presente publicação pretende-se documentar os desafios encarados pelos alunos e os conhecimentos teóricos práticos adquiridos durante o percurso das disciplinas. O desafio apresentado no presente documento foi um banco de dados de Compressão de Materiais Compósitos – Resinas para laminação (Aeronáutica x Automobilística), necessários para simulação e cálculo de estruturas leves.

Além dos dados de compressão, este artigo pretende documentar os resultados obtidos dos ensaios e analisar a relação de custo benefício entre eles.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo visa elucidar a integração teórico-prática que foi levada em consideração para a concepção deste projeto.

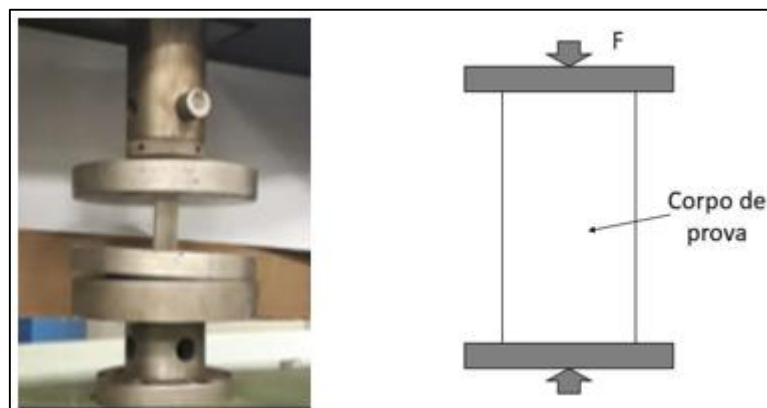
Análises dedicadas são feitas incansavelmente para poder encontrar os esforços que atuam em cada componente estrutural devido às forças externas aplicadas. Contudo, a presente publicação está dedicada ao estudo da resistência dos materiais destes componentes a fim de poder descobrir se conseguem resistir aos esforços aplicados (Figura 1). Ensaios de compressão padrão são realizados a fim de conhecer os parâmetros mais importantes do material.



**Figura 1.** Esforços Aplicados

Fonte: Autor (2019)

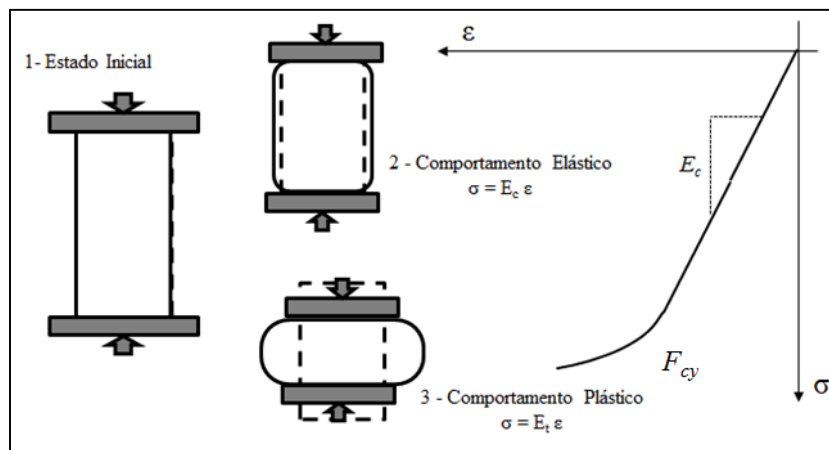
Um ensaio de compressão é composto de aplicação de carga compressiva uniaxial em um corpo de prova (Figura 2). Nos ensaios de compressão, os corpos de prova são submetidos a uma força axial para dentro, distribuída de modo uniforme em toda seção transversal.



**Figura 2.** Ensaio de Compressão

Fonte: Autor (2019)

A Figura 3 apresenta um diagrama esquemático do comportamento do corpo de prova durante um ensaio de compressão e os parâmetros mais importantes associados ao ensaio.



**Figura 3.** Comportamento do Corpo de Prova Durante um Ensaio de Compressão

Fonte: Autor (2019)

Define-se o Limite de Escoamento compressivo ( $F_{cy}$ ) como a região onde o material deixa de apresentar um comportamento elástico. Já o Módulo de Elasticidade em Compressão ( $E_c$ ) é a relação entre a tensão e a deformação experimentada pelo corpo de prova. Na zona elástica ele é considerado constante [LUGONES, 2017].

### 3. DESENVOLVIMENTO

Com o objetivo de aprimorar simulações estruturais com materiais compósitos, testes de compressão foram realizados nas amostras para obtenção de dados para futuros trabalhos.

Foram utilizadas as seguintes resinas:

- Resina epóxi para laminação aeronáutica (SQ 2004 e SQ 3154); e
- Resina automobilística (Maxi Rubber).

O requisito da reutilização do molde é fundamentado nas práticas de desenvolvimento integrado do produto, já que o trabalho é focado na cadeia de processos de produção em escala e de protótipos de baixo custo.

Para iniciar os testes, foi projetado um molde para o corpo de prova com as medidas padrão da Norma ASTM correspondente a ensaios de compressão.

Foram realizadas tentativas de fabricação em moldes de gesso, porém o objetivo de um processo eficiente e eficaz não foi atingido devido à dificuldade da produção dos corpos de prova. Um segundo projeto foi idealizado para poder realizar a produção dos moldes, com tubos padronizados de PVC.

#### 3.1. Produção do Molde em PVC

O tubo e tampão de PVC de  $\frac{3}{4}$  apresentados na Figura 4a se mostraram altamente atraentes para a fabricação dos corpos de prova devido ao seu diâmetro e fácil manuseio. Para a produção do molde, foram cortados diversos tubos de 45mm de altura (Figura 4b) para que houvesse sobra de resina, e

assim, poder realizar o acabamento facial do corpo de prova e ainda estar dentro dos parâmetros para realizar o teste de compressão.



a- Tubo PVC e tampão de  $\frac{3}{4}$

b- Molde de PVC Pronto

**Figura 4.** Fabricação do molde em PVC

Fonte: Autor (2019)

### 3.2. Custos de Desenvolvimento e Preparação das Resinas

Duas resinas foram utilizadas neste projeto conforme é apresentado na Tabela 1. Nesta tabela se percebe como o custo da Resina Aeronáutica supera em um pouco mais de quatro vezes ao custo da Resina Automobilística. A Figura 5 apresenta as resinas utilizadas

**Tabela 1.** Diferença de Custo das Resinas

| Resina                  | Catalisador | Utilização      | Peso [Kg] | Custo [R\$] |
|-------------------------|-------------|-----------------|-----------|-------------|
| Epóxi Líquida “SQ 2050” | “SQ 3154”   | Aeronáutica     | 1,25      | 125,00      |
| Maxi Rubber             | Maxi Rubber | Automobilística | 0,99      | 30,00       |



Resina Aeronáutica



Resina Automobilística

**Figura 5.** Resinas

Fonte: Autor (2019)

Para a preparação da resina aeronáutica, conta com a mistura de proporção 2:1, 50g de resina e 25g catalizador. Para o processo de cura completa, a resina é levada ao forno a 80°C por 4 horas. Esta quantidade resulta no preenchimento de aproximadamente 3 moldes. Já a resina automobilística, conta com a mistura de proporção 100:1, para um processo de cura normal. O que resulta em 100g de resina e 1g de catalizador e levada ao forno a 80°C por 4 horas para cura completa. Esta quantidade resulta no preenchimento de aproximadamente 4 moldes de corpo de prova.

Durante a preparação foi realizado ainda um teste com 3% de catalizador e foi observado que a resina se aquece a uma temperatura de aproximadamente 100°C, obtendo a cura da resina em uma média de 15 minutos sem a necessidade de ser levada ao forno. A Figura 6 apresenta a preparação dos corpos de prova das resinas nos moldes de PVC.



**Figura 6.** Preparação da Resina

Fonte: Autor (2019)

### 3.3. Processo de Retirada do Corpo de Prova dos Moldes e Acabamento

Após as resinas curadas, é a hora de retirar os corpos de prova dos moldes. Processo que será explicado passo a passo abaixo.

Inicialmente se espera os corpos de prova esfriarem para que o PVC enrijeça novamente, com o intuito de que o processo de retirada seja mais fácil e para que o PVC não deforme, e assim possa ser reutilizado em um próximo teste.

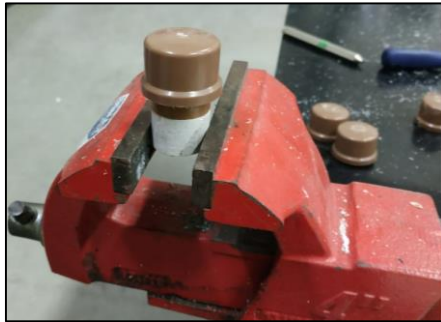
Em seguida, devesse prender o molde na morsa (Figura 7a) para que não escorregue durante o processo. Após o molde preso, devesse utilizar um alicate universal e colocá-lo entre o corpo do tubo e o tampão (Figura 7b), e fazer da base da morsa um apoio para empurrar a ponta do alicate para cima, até que o tampão seja retirado.

Após a retirada do tampão se verifica qual lado do molde está sem ocupar as bordas de fora do PVC e se usa como base de apoio para empurrar o corpo para fora o molde.

Neste processo foi utilizado um punção com a extremidade redonda para não danificar a amostra. Enquanto a extremidade redonda está apoiada no corpo de prova (Figura 7c), se deve bater levemente sobre o punção até que o corpo de prova sair totalmente do molde de PVC.

Após retirado do molde, facear o corpo de prova (Figura 7d) para melhores condições de aplicar os testes e coletar dados.

Para facear as amostras, foi utilizado um torno manual disponibilizado nas instalações da própria instituição.



a- Fixação na morsa



b- Processo de Retirada do tampão



c- Retirada da resina do molde



d- Antes e depois do Faceamento

**Figura 7.** Processos de fabricação do Corpo de prova

Fonte: Autor (2019)

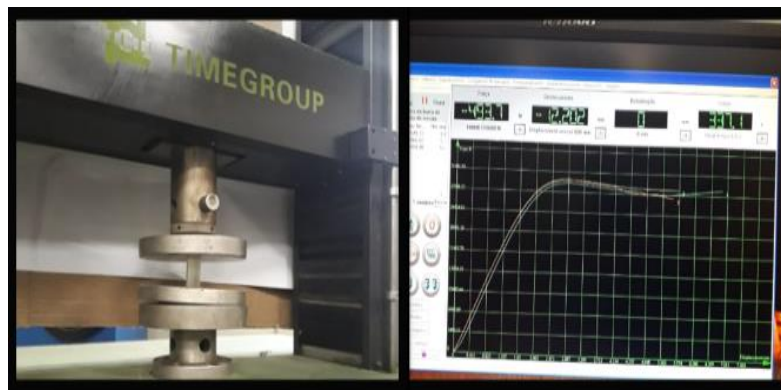
### 3.4. Ensaio de Compressão

Após finalizar o processo de acabamento da amostra (Figura 8), iniciaram-se os ensaios para obter o comportamento e os parâmetros desejados. Conforme o apresentado na Figura 9, cada corpo de prova gera uma curva onde se observa um comportamento padrão entre elas.



**Figura 8.** Corpos de Prova Acabados

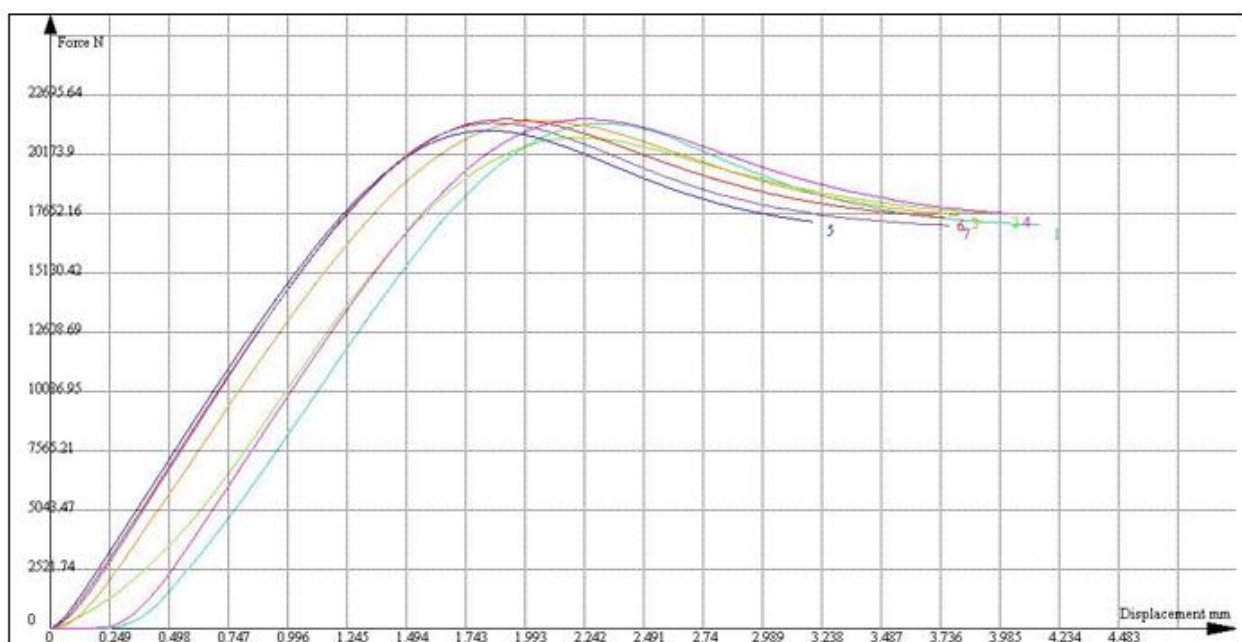
Fonte: Autor (2019)



**Figura 9.** Máquina de ensaio de tração e resultados

**Fonte:** Autor (2019)

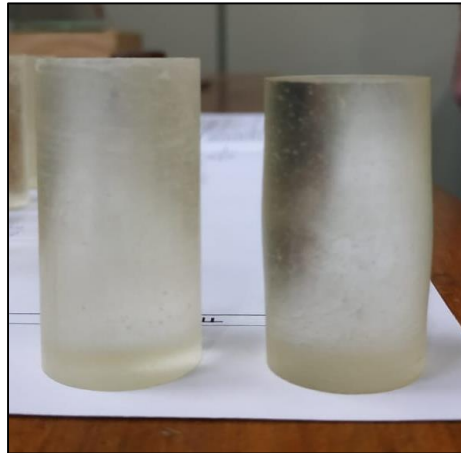
Foram realizadas duas baterias de testes. A primeira foi realizada em resinas curadas fora do forno. Já a segunda, as resinas foram curadas no forno por um período de 4h à 80°C. A Figura 10 apresenta um gráfico que representam as curvas de Força-Deslocamento da primeira bateria de testes de compressão das resinas aeronáuticas. Foi constatado que a resina aeronáutica suporta em média 2150kg de força máxima quando curada fora do forno.



**Figura 10.** Curva Força-Deslocamento da Resina Aeronáutica 1ª a 7ª amostra

**Fonte:** Autor (2019)

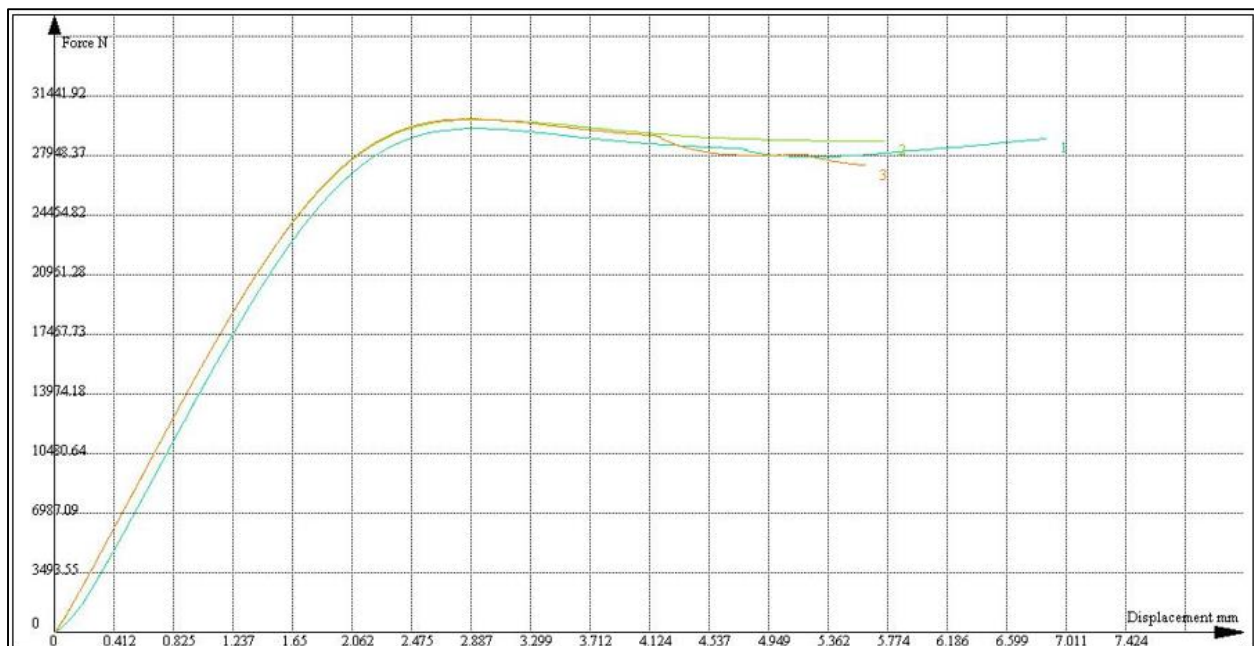
A Figura 11 mostra um corpo de prova de resina aeronáutica (CDP mais claros). Ele demonstrou ter um comportamento dúctil chegando a deslocamentos superiores aos 4 milímetros sem apresentar rachaduras.



**Figura 11.** Amostra de resina aeronáutica antes e depois do ensaio

Fonte: Autor (2019)

Já os resultados dos gráficos da resina automobilística (CDP mais escuros), que representam as curvas de Força-Deslocamento (Figura 12), com a composição de 3% de catalisador e cura em ambiente ao ar livre, constataram uma média de 3000kg de força máxima. Porém dois dos três corpos de prova apresentaram trincas após atingir um deslocamento superior aos 5 milímetros (Figura 13).



**Figura 12.** Resultados da resina automobilística 1ª, 2ª e 3ª amostra

Fonte: Autor (2019)





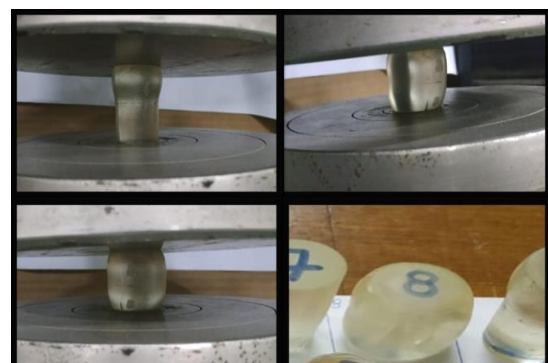
**Figura 13.** Amostra de Resina automobilística após o teste

Fonte: Autor (2019)

A Figura 14a mostra os corpos de prova da segunda bateria de testes. A 8<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup> e 10<sup>a</sup> amostra da resina aeronáutica (CDP mais claros) foram curadas no forno. Decidiu-se por colocar a 8<sup>a</sup> amostra em teste até seu ponto de ruptura. A Figura 14b apresenta os estágios de deformação da 8<sup>a</sup> amostra. Pode-se ver uma deformação de compressão típica em materiais dúcteis. A Figura 15 apresenta a curva de Força-Deslocamento completa da 8<sup>a</sup> amostra. O deslocamento obtido foi de aproximadamente 22 milímetros, o que demonstra um comportamento de alta segurança.



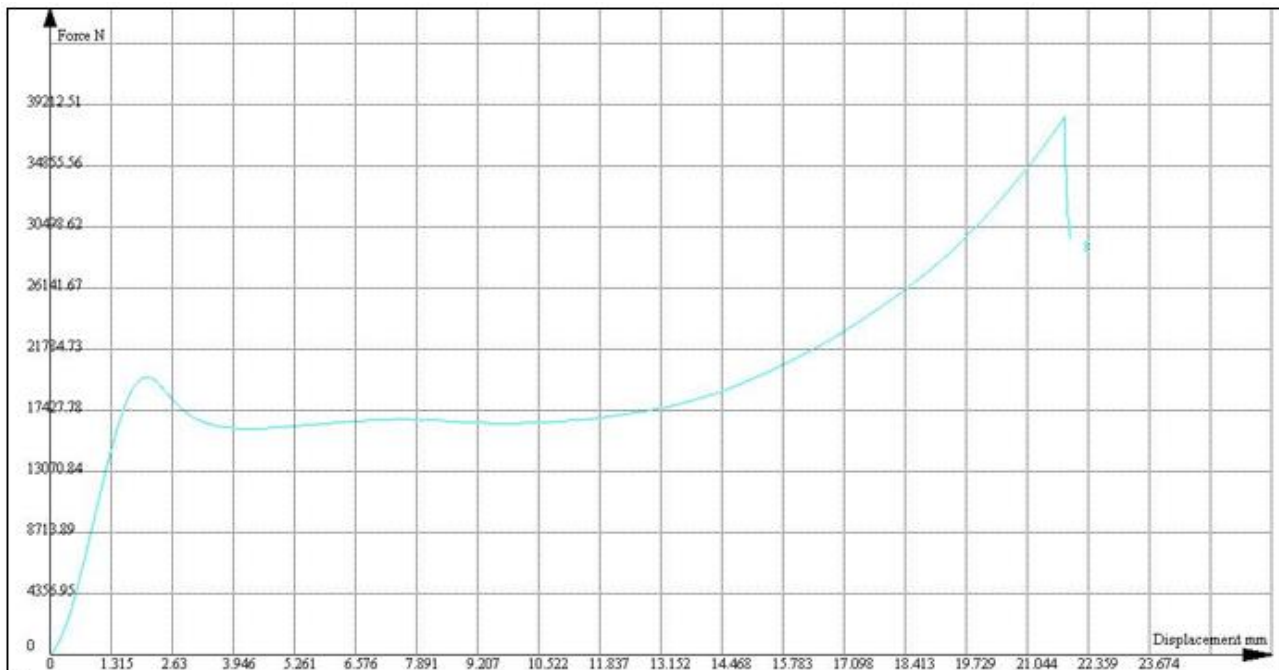
**a-** CDP de resinas utilizadas nos testes. Acima Resina Aeronáutica; e Abaixo Resina Automobilística



**b-** Comportamento da resina aeronáutica até seu rompimento total

**Figura 14.** Apresentação do Comportamento das Resinas

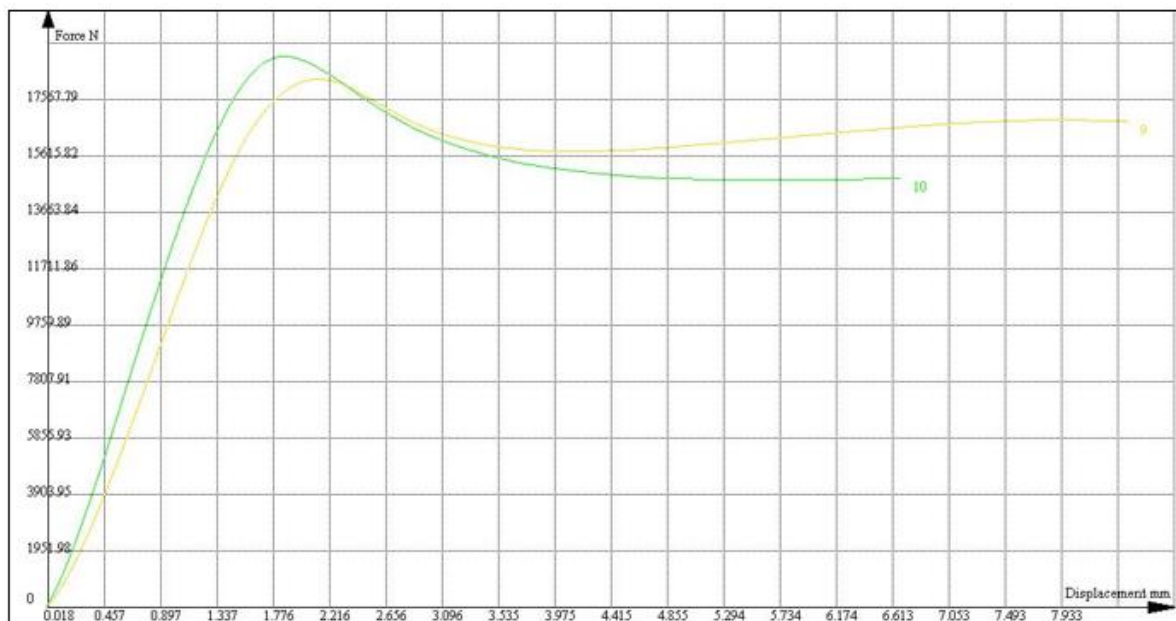
Fonte: Autor (2019)



**Figura 15.** Gráfico da resina aeronáutica 8ª amostra

Fonte: Autor (2019)

As resinas 9 e 10 tiveram um comportamento abaixo do esperado (~ 1800kg) após curadas no forno (Figura 16), resultando em um valor menor que os anteriores.

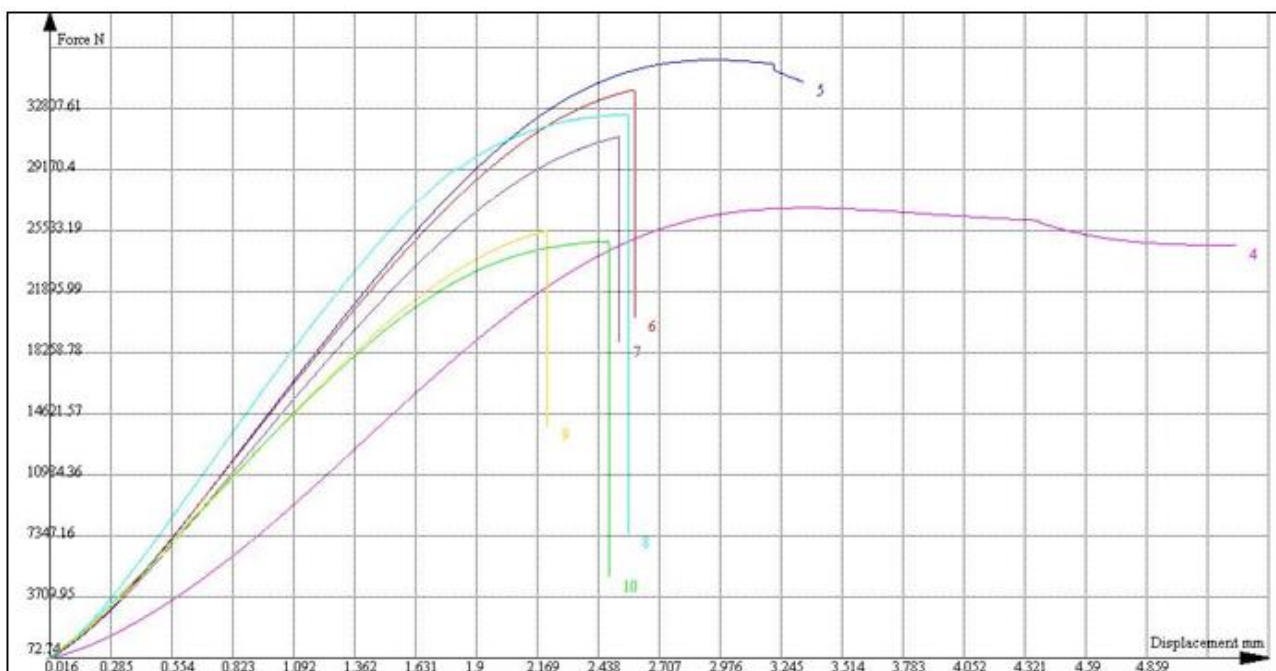


**Figura 16.** Resultado das amostras aeronáuticas 9ª e 10ª amostra

Fonte: Autor (2019)

A Figura 18 apresenta o resultado dos corpos de prova da segunda bateria de testes das resinas automobilísticas. A 4ª amostra de resina foi preparada com a composição de 2% de catalisador e totalmente curada ao ar livre pós 15 minutos. Esta amostra apresentou um resultado de carga menor (~ 2700kg) que as três resinas anteriores, cuja composição era de 3% de catalisador. Ou seja, o corpo de prova ficou menos resistente.

As amostras 5 a 10 foram realizadas com as resinas curadas no forno por 4h a 80°C com 1% de catalisador na composição. Como pode ser visto no gráfico de Força-Deslocamento (Figura 17), as resinas curadas no forno ficaram mais frágeis a ponto de romper os corpos de prova. Assim, foi constatado que o comportamento das resinas não é estável quando curadas no forno por 4h e 80°C, variando seus resultados em aproximadamente 1000kg entre os testes.



**Figura 17.** Resultados das resinas automobilísticas 4ª a 10ª amostra

Fonte: Autor (2019)

Mesmo com a variação dos resultados dos testes, a média geral de tensão obtida das amostras 5 a 10 ainda é maior que 3100kg.



**Figura 18.** Resinas automobilísticas 4ª a 10ª amostra

Fonte: Autor (2019)



#### 4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Concluimos que a resina aeronáutica apresentou confiabilidade mais elevada e suporta uma tensão de carga maior quando curada ao ar livre em temperatura ambiente entre as amostras aeronáuticas. A vantagem de cura da resina aeronáutica no forno é que ela obtém um comportamento mais elástico em relação à cura em temperatura ambiente.

Já a resina automobilística quando curada no forno, obtém um comportamento mais frágil, durante os testes o corpo de prova apresentou rupturas e trincas. Em contrapartida, os corpos de prova com 3% de catalisador em sua composição (corpo 1 a 3) são mais rápidos de serem produzidos e mais confiáveis em seus resultados, ainda obtendo um comportamento mais elástico em relação aos curados no forno.

Esta publicação evidencia que a resina automobilística pode ser uma excelente opção substitutiva em aplicações estruturais que não demandem esforços extremos, e quanto ao custo benefício, a resina automobilística chega a ser quatro vezes menor do que o custo da resina aeronáutica.

A porcentagem de catalisador em resina automobilística também desenvolve um papel importante em questões de flexibilidade. Como já mencionado, com 3% de catalisador obtém-se uma velocidade de produção maior, fato excepcional se considerado uma produção em alta escala. Com 1% de catalisador obtém-se maior tempo de cura. Fato relevante se forem necessários acabamentos mais elaborados.

Com as curvas de Força-Deslocamento reveladas nesta publicação, os parâmetros de compressão mais importantes das curvas de Tensão-Deformação podem ser obtidos. Deste modo, esta publicação abre para a instituição um alcance ilimitado de trabalhos futuros no que se refere à realização de simulações estruturais por elementos finitos ou por cálculo analítico de qualquer tipo de estrutura que utilize material compósito submetido a esforços de compressão.

#### 5. REFERÊNCIAS

N.E DOWLING, *Mechanical Behavior of Materials*, Virginia, Person, 2013

LUGONES, S. *Introdução ao Caminho de Cargas e ao Cálculo de Estruturas*. Apostila de Disciplina de Reparos Estruturais em Aeronaves do Curso de Manutenção de Aeronaves da Faculdade de Tecnologia Professor Jessen Vidal, São José dos Campos, 2017.

BRUHN, E.F. *Analysis and design of light vehicle structures*. U.S.A, Jacobs Publishing, 1973.

ASTM International. *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*. U.S.A  
ASTM International.