

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

ANDREI SEGABINAZI KNEIPP

EFEITOS DOS PARÂMETROS DE PÓS-CURA NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DA RESINA EPÓXI

Joinville

2019

ANDREI SEGABINAZI KNEIPP

EFEITOS DOS PARÂMETROS DE PÓS-CURA NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DA RESINA EPÓXI

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso
de Graduação em Engenharia Naval do
Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Benedet
Dutra.

Joinville

2019

ANDREI SEGABINAZI KNEIPP

EFEITOS DOS PARÂMETROS DE PÓS-CURA NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DA RESINA EPÓXI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Gabriel Benedet Dutra
Orientador

Prof. Dr. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Wagner Maurício Pachekoski
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo apoio durante a totalidade dos anos em que aqui estive, em especial à minha mãe, Glaucia e meu pai Adriano, meus facilitadores em muitos aspectos.

Ao meu orientador, Gabriel Dutra, pela atenção e tempo dedicado ao auxílio da realização deste trabalho.

À Equipe Babitonga e seus membros que me fizeram amadurecer muito e proporcionaram grandes amizades.

Ao professor Wagner e ao João que cederam seus laboratórios para realização dos ensaios e processos necessários para este trabalho.

À colega e amiga, Ana Carolina, por passar tranquilidade nos momentos de desespero e pelas inúmeras horas de discussões devido às provas e trabalhos.

Aos amigos que me deram força e me ajudaram a encarar os últimos anos de faculdade: Eduardo, Felipe, Gustavo Gota, Henrique, Igor, Jhonny, Leonardo, Lucca, Pedro e Raphael.

RESUMO

A resina epóxi possui alta versatilidade e vem sendo amplamente utilizada na indústria, também sendo alvo de pesquisas devido ao seu fácil processamento, relação custo-benefício e propriedades de alto desempenho. O objetivo deste estudo foi avaliar a alteração das propriedades mecânicas de uma resina epóxi comumente utilizada no mercado náutico, a qual foi submetida a diferentes ciclos de pós-cura. Os ensaios realizados foram o de dureza Shore D, resistência ao impacto Izod e de resistência à tração regidos pelas normas ASTM D256, D2240 e D638 respectivamente. As amostras foram confeccionadas por meio de vazamento em molde metálico e pós-curadas em estufa, onde variou-se a temperatura entre 60°C, 80°C e 100°C com um tempo fixo de 8 horas. Para a temperatura de 80°C realizou-se a variação também no tempo de pós-cura, para 16h, com a intenção de verificar a influência não somente da temperatura, mas também do tempo. Como parâmetro de comparação foi utilizado um grupo de amostras que não passou pelo processo da pós-cura. A pós-cura poderia aumentar a densidade de ligações cruzadas da resina, aumentando sua resistência mecânica, porém o resultado aqui encontrado foi no sentido oposto, obtendo uma queda no módulo de elasticidade, tensão de escoamento, tensão máxima e na dureza. O alongamento máximo foi a única propriedade que aumentou com a elevação da temperatura de pós-cura, sugerindo que em temperaturas baixas (60°C) a pós-cura causou uma maior mobilidade nas cadeias poliméricas e para temperaturas mais altas uma oxidação das ligações cruzadas.

Palavras-chave: Resina epóxi. Pós-cura. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The epoxy resin has high versatility and has been widely used in the industry, being the subject of researches due to its easy processing, cost-benefit and high performance properties. The purpose of this study was to evaluate the changes of the mechanical properties of an epoxy resin commonly used in the maritime industry, putting it through different post-cure schedule. The tests performed were the hardness Shore D, impact izod and the tensile guided by the ASTM Standards D256, D2240 and D638. The samples were molded in a metallic mold and post-cured in an oven, where the temperature varied between 60°C, 80°C and 100°C, always in an 8 hours period. For the 80°C temperature, there was also a variation to a 16 hours period post-cure, with the intent to investigate the influence of, not only the temperature, but also the time. As a comparison parameter a group of samples that hasn't been post-cured was used. The post-cure could increase the density of cross-linking of the resin, improving its mechanical resistance, however, the results found here were the opposite, showing a decrease of young's modulus, yield strength, ultimate tensile strength, and in hardness. The strain to failure was the only property that increased with the increasing of the post-cure temperature, suggesting that the post-cure in low temperatures (60°C) caused a mobility in the polymer chains, while in high temperatures it caused a cross-linking oxidation.

Keywords: Epoxy resin. Post-cure. Mechanical properties

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura e propriedades de uma resina epóxi.....	12
Figura 2 - Imagem de topo do molde metálico desenvolvido por Durigan Neto (2018).....	15
Figura 3 - Imagem de uma amostra SPC antes do ensaio de tração.	19
Figura 4 - Dureza Shore D das amostras pós-curadas.....	21
Figura 5 - Módulo de elasticidade das amostras pós-curadas.....	23
Figura 6 - Imagem das amostras pós-curadas após ensaio de tração.	23
Figura 7 - Tensão de escoamento das amostras pós-curadas.....	24
Figura 8 - Tensão máxima das amostras pós-curadas.....	25
Figura 9 - Alongamento máximo das amostras pós-curadas.....	26
Figura 10 - Valores obtidos nas medições de dimensão das amostras.....	32
Figura 11 - Valores encontrados no ensaio de dureza Shore D.	33
Figura 12 - Valores obtidos após o ensaio de impacto izod.	34
Figura 13 - Curva tensão-deformação das amostras SPC.	35
Figura 14 - Curva tensão-deformação das amostras PC60.....	35
Figura 15 - Curva tensão-deformação das amostras PC80.....	35
Figura 16 - Curva tensão-deformação das amostras PC80-16.	36
Figura 17 - Curva tensão-deformação das amostras PC100.....	36
Figura 18 - Valores obtidos após os ensaios de tração.....	37
Figura 19 - Informações fornecidas pelo fabricante da resina Ampreg 21....	39
Figura 20 - Informações fornecidas pelo fabricante da resina Ampreg 26....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nomenclatura dos grupos.....	17
Tabela 2 - Variação da área da seção transversal média real em relação a teórica das amostras.	20
Tabela 3 - Valores do ensaio de impacto izod.....	22

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS.....	10
1.1.1 Objetivo Geral	10
1.1.2 Objetivos Específicos	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 RESINA EPÓXI.....	11
2.2 PROCESSO DE PÓS-CURA.....	12
3 METODOLOGIA	15
3.1 MATERIAIS.....	15
3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	16
3.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4.1 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	19
4.2 ENSAIO DE DUREZA.....	20
4.3 ENSAIO DE IMPACTO IZOD.....	21
4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	22
5 CONCLUSÃO	28
REFERÊNCIAS	30
APÊNDICE A – Resultados das medições de dimensões das amostras.	32
APÊNDICE B – Resultado das medições de dureza Shore D	33
APÊNDICE C – Resultados dos ensaios de impacto izod.	34
APÊNDICE D – Curvas tensão-deformação do ensaio de tração	35
APÊNDICE E – Resultados obtidos pelo ensaio de tração	37
ANEXO A – Informações das resinas Ampreg 21 e Ampreg 26	39

1 INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento tecnológico dos projetos criou a necessidade do emprego de materiais avançados de engenharia. Este fato impulsiona grande quantidade de estudos para melhorias dos materiais existentes através de investigações teóricas e experimentais.

Uma importante classe destes materiais avançados são os compósitos que apresentam uma microestrutura heterogênea, constituída pela combinação discreta de diferentes fases, classe onde se enquadram os plásticos reforçados por fibras. Os materiais compósitos mais comuns são os reforçados por fibras de alta resistência e uma matriz, que usualmente é uma resina poliéster, epóxi ou fenólicas (ESCARPINI FILHO, 2010). Os tipos de compósitos que são mais utilizados na indústria naval são os que tem resina como matriz e fibras como reforço estrutural (NASSEH, 2011).

Os compósitos são utilizados em diversas áreas da engenharia, como por exemplo na área aeroespacial, automobilística e naval, desde pás de geradores eólicos, carenagens de veículos terrestres até cascos inteiros de embarcações de alto desempenho.

As limitações do uso de compósitos são normalmente dadas pela matriz, que além de apresentar temperaturas máximas de trabalho muito abaixo do reforço em fibras, possui um módulo de elasticidade muito inferior ao do reforço. Assim sendo, entende-se a necessidade do estudo do aumento das propriedades mecânicas associadas à matriz.

A resina epóxi talvez seja o mais versátil dos polímeros termofixos. Ela tem sido o centro de estudos para usos industriais devido ao seu fácil processamento, custo-benefício e propriedades de alto desempenho (PARAMESWARANPILLAI et. al, 2017). Porém, seu processo de cura à temperatura ambiente muitas vezes não é suficiente para que sejam feitas todas as ligações cruzadas que representam o nível de cura, assim necessitando da aplicação de um tratamento de pós-cura para otimização de propriedades (LEE, 1967).

Para realizar o processo de pós-cura, a temperatura dos grupos de amostras será variada na estufa, bem como o tempo. Em seguida serão analisadas as propriedades mecânicas por meio de ensaios de dureza, impacto e resistência à tração.

Como referência será utilizado o trabalho de Zargiski (2018), que varreu uma faixa de tempos e temperaturas e não obteve melhorias significativas nas propriedades. Também será utilizado o trabalho de Campana et al. (2018) que realizou a pós-cura em resinas epóxi como parte do trabalho para identificar qual componente (fibra, resina ou interface) é responsável pela maior mudança nas propriedades mecânicas em um compósito, sendo realizado a pós-cura do compósito como um todo e também em cada componente de forma separada. No trabalho realizado por Carbas et al. (2013) foram utilizados três tipos de resinas adesivas estruturais à base epóxi, onde realizou o processo de cura a temperaturas elevadas e pós-cura à temperatura ambiente verificando a influência dos ciclos térmicos nas propriedades mecânicas. Zhang, Xu e Huang (2009) desenvolveram um modelo de elementos finitos para simular a temperatura e a distribuição do grau de cura durante o processo de cura da resina epóxi e mediram a dureza Shore D de amostras experimentais para validarem o modelo.

Considerando os trabalhos acima citados, esta investigação consiste em uma variação de temperatura e tempo de pós-cura para uma resina epóxi comercial comumente utilizada em aplicações na indústria náutica.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção será apresentado o objetivo geral bem como os objetivos específicos necessários para a realização deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar as alterações das propriedades mecânicas da resina epóxi com a aplicação de diferentes ciclos de pós-cura.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar diferentes ciclos de tratamento térmico de pós-cura.
- ✓ Avaliar diferentes temperaturas (60°C, 80°C, 100°C) e tempos (8h e 16h) .
- ✓ Observar a variação das propriedades mecânicas das amostras por meio de ensaios de dureza, impacto e de tração.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados os conceitos básicos e necessários para o desenvolvimento deste trabalho como as características da resina epóxi e do processo de pós-cura.

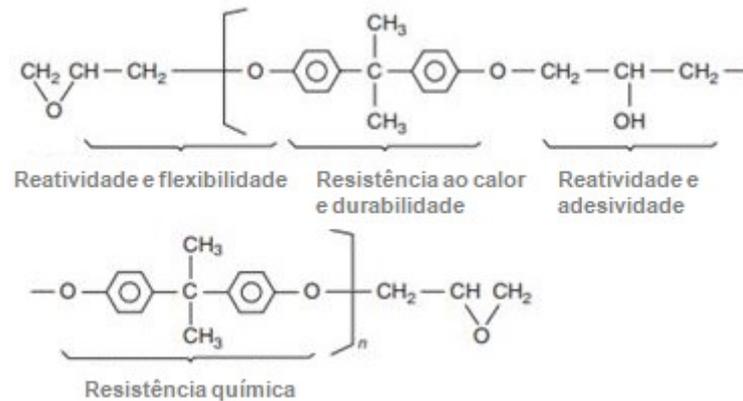
2.1 RESINA EPÓXI

Resinas epóxi são uma classe de polímeros versáteis de alto desempenho que contém dois ou mais grupos epóxi na sua estrutura molecular que podem ser transformados em plásticos termofixos através do uso de um agente de cura (SHI; XIAO, 2017).

Devido sua alta versatilidade e principalmente a sua baixa absorção de água é amplamente utilizada na área naval. Suas propriedades físicas, tais como sua baixa contração durante à cura, compatibilidade com diversos tipos de materiais, adesividade, resistência química e contra corrosão, fazem com que sejam utilizadas além de resinas para laminações mas também como adesivos, selantes, bases para tintas entre outros (PETRIE, 2006). Foram descobertas em 1909 por Prileschajew (MAY, 1988), porém seu desenvolvimento iniciou por volta de 1920, mas sua utilização industrial só se deu por volta de 1960 (NASSEH, 2011).

A estrutura básica e propriedades da resina epóxi são influenciadas por vários grupos químicos como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura e propriedades de uma resina epóxi.



Fonte: Adaptado de Osumi (1987).

Tais resinas não são as mais economicamente viáveis encontradas no mercado, porém podem agregar um valor ao produto final que justifica seu custo adicional. São comercialmente encontradas tanto na forma sólida em tecidos pré impregnados, quanto na forma líquida vindo na forma de dois componentes, a resina e o agente endurecedor, que quando misturados na proporção correta são convertidos em sólido através de uma reação química irreversível das moléculas poliméricas das quais é composta, onde são realizadas suas ligações cruzadas que afetam diretamente a sua resistência.

O tipo de agente de cura é que determina qual tipo de reação, a cinética da cura os tempos de trabalho e as propriedades finais do material (NASSEH, 2007). Um dos agentes de cura mais importantes são as aminas alifáticas que promovem uma cura relativamente rápida com uma alta densidade de ligações cruzadas à temperatura ambiente (PETRIE, 2006), que por sua vez pode ser aumentada por um processo de pós-cura.

2.2 PROCESSO DE PÓS-CURA

Durante o processo de cura a resina passa por reações químicas, evolução de voláteis e evolução de temperatura, que causam a geleificação e, por fim a vitrificação. A cura é uma reação química irreversível onde ligações cruzadas são realizadas tornando a resina térmica e mecanicamente estável (ARUNIIT et al, 2012). É esperado que a extensão da reação de cura influencie a estrutura e as

propriedades finais do sistema devido à quantidade de ligações cruzadas realizadas durante a reação (WU, 1922).

Acredita-se que a maior parte das resinas epóxi utilizadas no mercado náutico tem sua formulação para que sejam obtidas boas propriedades mecânicas com seu processo de cura sendo realizado a temperatura ambiente. Entretanto uma cura completa é raramente alcançada nesta situação, o que reduz as propriedades do material. A solução para este problema é realizar uma pós-cura do material obtendo-se uma maior quantidade de ligações cruzadas (ARUNIIT et al, 2012).

O processo de pós-cura é realizado pela elevação da temperatura da resina após a cura à temperatura ambiente, objetivando o aumento da quantidade de ligações cruzadas realizadas. A pós-cura pode ser realizada em estufas que elevem a temperatura da resina até a temperatura de transição vítrea ou acima (LIPOVSKY, 2006), sendo a temperatura e o tempo de exposição ao calor os dois maiores fatores que influenciam a pós-cura.

De acordo com Nasseh (2007) o processo de pós-cura pode ser feito com várias combinações de tempo e de temperaturas porém a resina deve ser aquecida levemente acima de sua temperatura de transição vítrea por pelo menos uma hora e com uma rampa de aquecimento lenta e gradual. Salienta-se o fato de que cada sistema de resina epóxi tem uma temperatura de transição vítrea específica que pode ser melhor determinada através de análises térmicas.

Bourchak, Khan e Juhany (2013) investigaram os efeitos do pré-aquecimento e da pós-cura da resina epóxi nas propriedades mecânicas. Fizeram a comparação de um grupo de amostras que passou por um pré-aquecimento por 30 minutos à 80°C, uma cura de 6h à 80°C e que não passou por pós-cura e outro grupo que passou pelo mesmo procedimento sendo pós-curado por 2h à 90°C. Bourchak, Khan e Juhany (2013) reportaram que com a pós-cura houve um aumento da tensão de ruptura e no módulo de elasticidade e uma queda no alongamento máximo.

No trabalho de Campana et al. (2018) foi constatado um decréscimo no módulo de elasticidade da resina para temperatura de pós-cura mais alta de 150°C em relação às amostras sem pós-cura e, também, uma diminuição na tensão máxima para este mesmo grupo de amostras. Campana et al. (2018) atrela esses resultados a uma possível degradação térmica causada pela pós-cura, já que está a somente 15°C abaixo da temperatura de transição vítrea da resina. Para os demais grupos estudados não foram observadas mudanças significativas ou os efeitos foram

ocultos pelos grandes desvios padrões obtidos. As temperaturas de pós-cura foram de 100°C, 120°C e 150°C.

Carbas et al. (2013) que realizou a cura para diferentes temperaturas (23°C, 40°C, 60°C, 80°C, 100°C, 120°C e 140°C) em duas faixas de tempo, de 30 minutos e de 2 horas, reportou um aumento do módulo de elasticidade e na tensão de escoamento, para dois dos três tipos de resinas, com o aumento da temperatura de cura. Já para o terceiro tipo houve uma diminuição tanto no módulo de elasticidade quanto na tensão de escoamento, constatando que quando a temperatura de cura está acima da temperatura de transição vítrea máxima da resina ou até mesmo abaixo porém próximo, observou-se um decréscimo nas propriedades mecânicas.

Zargiski (2018) que pós-curou suas amostras em temperaturas entre 75°C e 110°C com os tempos de 1h e 2h, mediu o módulo de elasticidade dinâmico e a dureza Shore D. Tais propriedades não sofreram alterações devido a pós-cura, sugerindo que a temperatura de cura e as heterogeneidades geradas pelo processo de obtenção das amostras foram fatores que tiveram maior influência nas propriedades do que o processo de pós-cura adotado.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos necessários para confecção dos corpos de prova e a caracterização mecânica dos mesmos, que serão feitos através de um ensaio de impacto izod, ensaio de dureza Shore D e ensaio de resistência à tração para determinação das propriedades mecânicas.

3.1 MATERIAIS

O molde utilizado foi desenvolvido no trabalho de Durigan Neto (2018) e usinado em alumínio 7075-T6 com as dimensões dos corpos de prova de modo que atendessem a norma American Society for Testing and Materials (ASTM) D638 (2014) para ensaio de resistência à tração. Já o ensaio de impacto foi realizado de acordo com a norma ASTM D256 (2018). O molde tem capacidade para 5 corpos de prova para ensaio de tração e 2 corpos de prova para ensaio de impacto. A Figura 2 mostra uma imagem de topo do molde.

Figura 2 - Imagem de topo do molde metálico desenvolvido por Durigan Neto (2018).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

Os corpos de prova foram preparados utilizando o sistema de resina epóxi Ampreg 21, vendido pela e-composites da marca Gurit, que é a base de bisfenol A e uma pequena quantidade de bisfenol F. O Sistema é certificado pela sociedade classificadora Det Norske veritas-Germanischer Lloyd (DNV-GL). O agente endurecedor usado foi o de cura lenta à base de aminas. De acordo com o fabricante este sistema é de baixa viscosidade e nos proporciona boas propriedades mecânicas mesmo quando curada à temperatura ambiente.

3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Antes do molde receber a resina e com o objetivo de facilitar o desmolde das amostras criou-se um procedimento que consiste na limpeza do molde a fim de remover qualquer resquício de resina da utilização anterior, aplicação de 3 camadas de cera de carnaúba da marca TecGlaze-N e aplicação do desmoldante semi-permanente PVA da marca ABCol. Vale salientar que estes desmoldantes são utilizados com frequência pela indústria náutica.

Realizou-se a mistura da resina como agente endurecedor na proporção 100:33 do peso, conforme recomendação do fabricante. Em um recipiente plástico realizou-se a homogeneização mecânica de forma cuidadosa, após isto deixou-se o recipiente com a resina em repouso por cinco minutos com o objetivo de minimizar as bolhas que pudessem ser geradas durante o processo de mistura e por fim o molde metálico foi preenchido. Todo procedimento foi realizado em um ambiente climatizado a temperatura de 25°C.

Após o processo de cura à temperatura ambiente por 24 horas os corpos foram desmoldados com auxílio de ar comprimido por meio de orifícios do próprio molde e colocados na estufa para o tratamento de pós-cura. Os corpos foram retirados do molde antes do processo de pós-cura a fim de evitar quaisquer concentrações de tensões que pudessem ser geradas devido à diferença de dilatação térmica do molde e resina.

Para pós-curar as amostras utilizou-se a estufa da marca Solab, modelo SL100, onde as amostras foram inseridas à temperatura ambiente. Então, a temperatura foi elevada até a temperatura de pós-cura do conjunto, sendo mantida durante o tempo proposto. Após isto, foram retiradas e resfriadas à temperatura

ambiente. Durante o processo não foi possível fazer o controle da rampa de aquecimento e resfriamento devido à limitação da estufa.

A nomenclatura dos grupos, bem com suas respectivas temperaturas e tempos podem ser verificados na Tabela 1.

Tabela 1 - Nomenclatura dos grupos.

Nome do Grupo	Temperatura de pós-cura [°C]	Tempo de pós-cura [h]
SPC	Temperatura ambiente	-
PC60	60	8
PC80	80	8
PC80-16	80	16
PC100	100	8

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Para a seleção das temperaturas e tempos deste trabalho, utilizou-se o catálogo de especificações técnicas da resina (E-composites, 2017), em que há a sugestão de pós-curar a resina a uma temperatura de 50°C por 16 horas ou á 80°C por 5 horas e, a partir dessas informações, determinou-se os tempos e temperaturas presentes na Tabela 1 de forma em que a variação de temperatura fosse uniforme, com a variação de 20°C. A variação do tempo no grupo de PC80 para o PC80-16 foi criada para medir a influência do tempo na dada temperatura nas propriedades mecânicas finais.

3.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

Nas medições das dimensões dos corpos de prova foi utilizado um paquímetro digital de 150mm da marca Digimess e, foram realizadas medições em três pontos ao longo do comprimento dos corpos de prova para determinação da área da seção transversal média real e estão dispostos na íntegra no Apêndice A.

Os ensaios de dureza foram realizados por um durômetro Shore D da marca UHAG Metrology em 5 locais diferentes das amostras, 5 amostras para cada grupo, seguindo o procedimento conforme descrito na norma ASTM D2240 (2017). As amostras foram ensaiadas 73 dias após a confecção, todas no mesmo dia. O ensaio

que consiste em aplicar uma força em uma pequena área do corpo de prova através de uma agulha, assim medindo a resistência a penetração da agulha sobre a superfície da amostra.

Para o ensaio de impacto izod, foi utilizada a máquina de impacto para não metais da marca Equilam, modelo EQUIMP-IZOD/CHARPY-50C, com um martelo de 5,5 Joules, de acordo com a norma ASTM D256 (2018), exceto pela quantidade dos corpos de prova, somente 3, dimensões e o entalhe que não foi realizado. As amostras foram ensaiadas 121 dias após a confecção, todas no mesmo dia. Os corpos de provas têm 75mm x 8,5mm x 4,3m (comprimento x largura x espessura).

As propriedades mecânicas foram obtidas por meio de 25 ensaios de resistência à tração, 5 amostras por condição, de acordo com a norma ASTM D638 (2014), utilizando a máquina MTS Criterion, modelo 45, com uma célula de carga de 5kN. As amostras foram ensaiadas 75 dias após a confecção, todas no mesmo dia. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 2 mm/min e as condições ambientais do laboratório eram de 21°C e 58% de umidade relativa do ar. Tal ensaio permitiu obter informações como módulo de elasticidade do material, tensão de escoamento, tensão máxima e alongamento máximo.

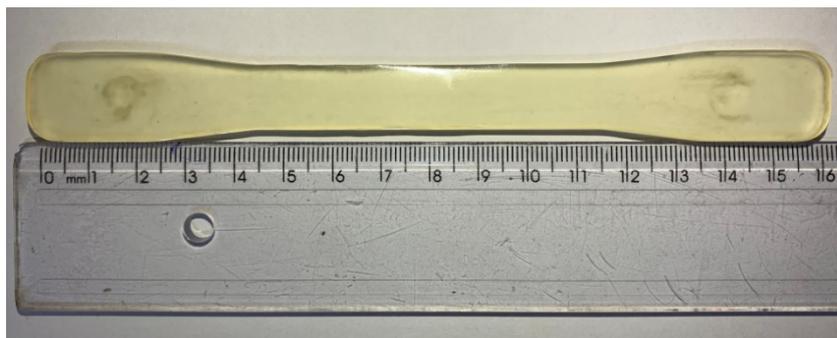
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os dados obtidos já com o tratamento estatístico através da técnica de distribuição de t de *student* com intervalo de confiança de 95% e feita análise e discussão dos mesmos.

4.1 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

O processo utilizado para obtenção dos corpos de provas foi dado como satisfatório devido à baixa quantidade de bolhas de ar contidas nas amostras e também a qualidade das dimensões de comprimento e largura das mesmas que se mostraram fiéis ao molde. A Figura 3 mostra a imagem de uma das amostras. É importante lembrar que a inspeção da quantidade de bolhas foi feita somente de forma visual não sendo utilizada nenhuma técnica de observação de bolhas em escala microestrutural. A espessura foi a dimensão que apresentou maior variabilidade devido ao molde ser aberto e não tendo uma superfície limitante, possibilitando uma leve variação. Este fato foi também observado por Durigan Neto (2018).

Figura 3 - Imagem de uma amostra SPC antes do ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Na Tabela 2, podemos observar a variação da área da seção transversal real das amostras em relação a área da seção transversal teórica. O fator que mais tem influência nesta diferença é a variação nas espessuras, como dito anteriormente.

Tabela 2 - Variação da área da seção transversal média real em relação a teórica das amostras.

Amostras	Área da seção transversal média real [mm²]	Desvio padrão	Diferença para teórica [%]	IC 95%
SCP	44,87	0,97	6,8%	1,24
PC60	43,82	1,29	4,3%	1,65
PC80	41,05	0,41	-2,3%	0,53
PC80-16	41,94	1,44	-0,2%	1,85
PC100	40,89	0,68	-2,6%	0,87

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

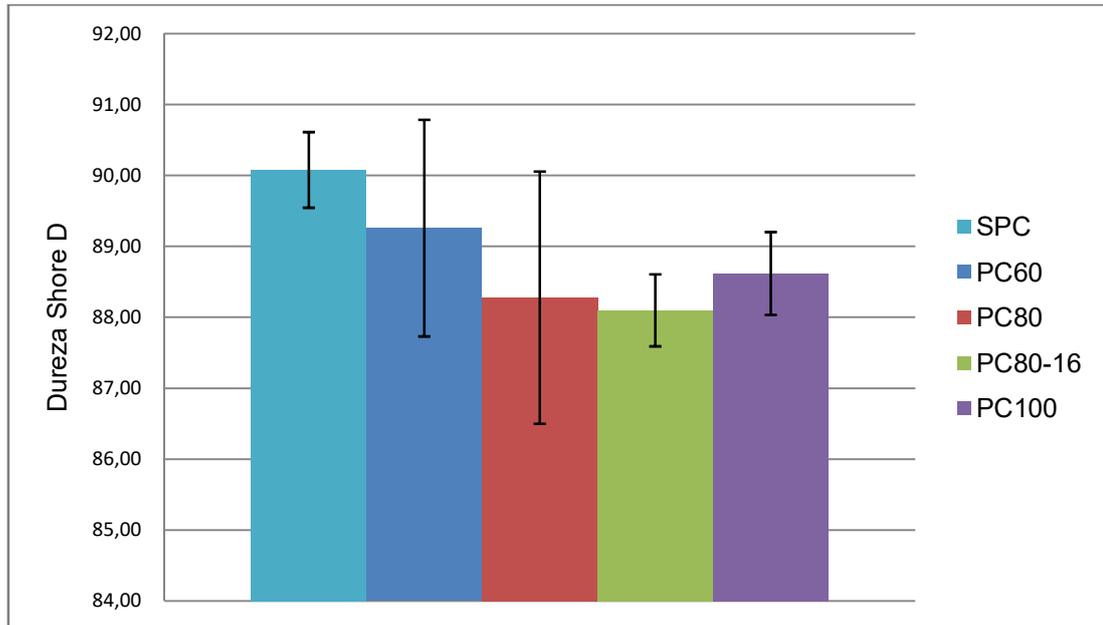
4.2 ENSAIO DE DUREZA

A Figura 4 mostra os resultados de ensaio de dureza. É possível verificar que os valores de dureza ficaram em uma faixa entre 85 e 90 Shore D, sendo os resultados muito similares para todas as condições. Zhang, Xu e Huang (2009) obtiveram resultados de dureza Shore D entre 76 e 90. Os valores das medições podem ser encontrados no Apêndice B.

É importante salientar que o ensaio tem sua precisão reduzida devido à forma de utilização do aparelho de medição, que por ser feita de forma manual e sem um suporte de fixação para inserção da agulha exatamente perpendicular à superfície do corpo de prova, pode gerar pequenos erros, apesar do extremo cuidado do operador no momento da medição.

Ao realizar as medições das amostras, foram observadas oscilações ao longo do comprimento das mesmas, introduzindo um alto desvio padrão e gerando um aumento nos intervalos de confiança.

Figura 4 - Dureza Shore D das amostras pós-curadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Com os valores muito próximos, não são observadas claras influências causadas pelo processo de pós-cura, entretanto, verifica-se na Figura 4, uma tendência que revela que os valores de dureza tendem a decair com a realização da pós-cura, fato mais acentuado para as amostras do grupo PC80-16 e PC100 em comparação com a referência SPC. Ao comparar as amostras PC80 e PC80-16, constata-se que o tempo mais prolongado de cura não revelou nenhum efeito significativo nos valores de dureza.

Como justificativa para as tendências encontradas elaboramos algumas hipóteses. Os valores de dureza muito próximos podem estar ligados ao fato de que o processo de pós-cura não aumentou de forma significativa a densidade de ligações cruzadas dos grupos pós-curados em relação ao SPC e a tendência de queda desses valores possivelmente está ligado ao fato das amostras terem sofrido degradação térmica como sugere Zhang, Xu e Huang (2009). Esta degradação pode ter acontecido de forma superficial, assim influenciando os valores medidos.

4.3 ENSAIO DE IMPACTO IZOD

Com base na Tabela 3 é possível observar que para todos os grupos, a energia absorvida pelos corpos de prova se mantém na mesma faixa devido ao

grande intervalo de confiança. A análise foi prejudicada devido ao baixo número de corpos de prova impactados e a possível inserção de bolhas ou vazios durante o processo de fabricação, gerando um desvio padrão alto e conseqüentemente aumentando intervalo de confiança, o qual impediu a utilização dos dados para mensurar as mudanças geradas pela pós-cura nessa propriedade. Os valores dos ensaios estão dispostos no Apêndice C.

Tabela 3 - Valores do ensaio de impacto izod.

Grupo	Valor médio [J/m]	IC 95%
SPC	37,08	33,38
PC60	112,05	161,04
PC80	43,10	48,82
PC80-16	151,27	36,45
PC100	28,06	33,34

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

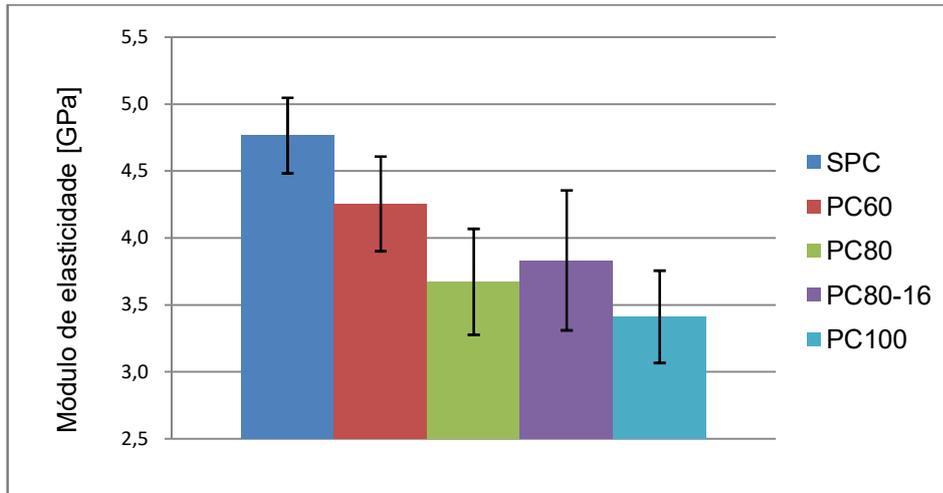
4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Por meio desses ensaios foi possível determinar o módulo de elasticidade, tensão de escoamento, tensão máxima e alongamento máximo. Tais propriedades podem ter sofrido alterações advindas do processo de obtenção dos corpos de prova, que podem ter gerado pontos concentradores de tensões em regiões de bolhas microestruturais ou pequenas cavidades na superfície, como nas quinas, por exemplo.

As curvas de tensão-deformação e os valores de cada ensaio estão dispostas no Apêndice D e Apêndice E, respectivamente. As curvas foram utilizadas para verificar a consistência dos resultados durante e após o teste.

A Figura 5 mostra os resultados de módulo de elasticidade para todas as condições investigadas. Nota-se que o processo de pós-cura utilizado possivelmente influenciou o módulo de elasticidade que apresentou uma tendência de queda nos valores, de modo que, com o aumento da temperatura de pós-cura, houve diminuição do módulo, como pode ser visto na Figura 5, causando uma diminuição de 28% nas amostras PC100 em relação às amostras que não passaram pelo processo de pós-cura (SPC).

Figura 5 - Módulo de elasticidade das amostras pós-curadas.

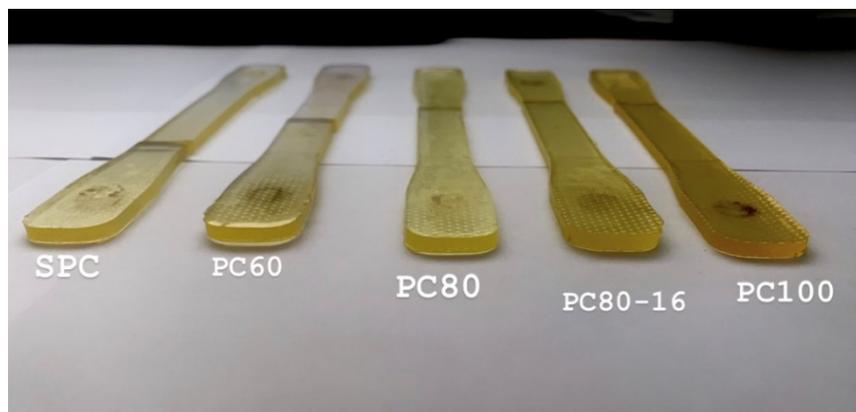


Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Para as amostras PC80 e PC80-16, verificou-se que não houve diferença demonstrando que o tempo para este caso não foi o fator que mais influenciou a propriedade, já que quando variou-se 20°C na temperatura as diferenças foram maiores, conforme Figura 5.

De acordo com Campana et al. (2018), a diminuição do módulo de elasticidade do grupo PC100 pode ser explicado devido à degradação térmica pela temperatura de pós-cura elevada estar próxima à temperatura de transição vítrea máxima da resina que é de 106,3°C, conforme com E-composites (2017) medido por meio de um DMTA. Esta degradação fica evidenciada pela leve mudança de coloração dos corpos de prova PC100 conforme a Figura 6.

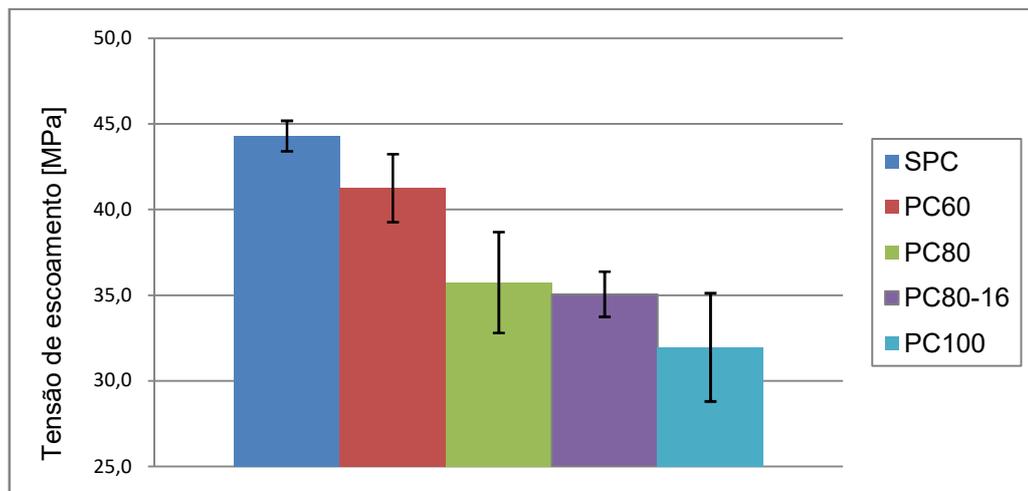
Figura 6 - Imagem das amostras pós-curadas após ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Outra propriedade mecânica investigada foi a tensão de escoamento em que os resultados apresentaram menor desvio padrão, o que nos permite confiar mais na consistência dos dados. A Figura 7 mostra os resultados de tensão de escoamento para as condições analisadas. Outra vez a diferença no tempo utilizado para os corpos de prova de PC80 e PC80-16 não se mostrou um fator de forte influência, essas diferenças podem ser vistas na Figura 7.

Figura 7 - Tensão de escoamento das amostras pós-curadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Uma tendência de queda na tensão de escoamento em relação ao aumento da temperatura de pós-cura também pode ser evidenciada na Figura 7. Com o aumento da temperatura a tensão de escoamento foi diminuindo para todas amostras em relação a SPC. A tensão de escoamento está vinculada à transição de uma deformação elástica para uma deformação plástica no material. Assim sendo, ao realizar a pós-cura as amostras começaram a sofrer uma deformação plástica a tensões menores, o que evidencia que não houve aumento de ligações cruzadas no polímero. Ao aumentar a concentração de ligações cruzadas, o comportamento mecânico devia ser oposto aos resultados encontrados. Assim, duas hipóteses podem ter causado este comportamento: (a) para menores temperaturas de pós-cura, 60°C, a faixa de temperatura utilizada pode ter causado uma maior mobilidade das cadeias poliméricas sem aumentar o número de ligações cruzadas; e (b) para amostras pós-curadas a temperaturas mais elevadas, 80°C e 100°C, um início de degradação térmica deve ter ocorrido.

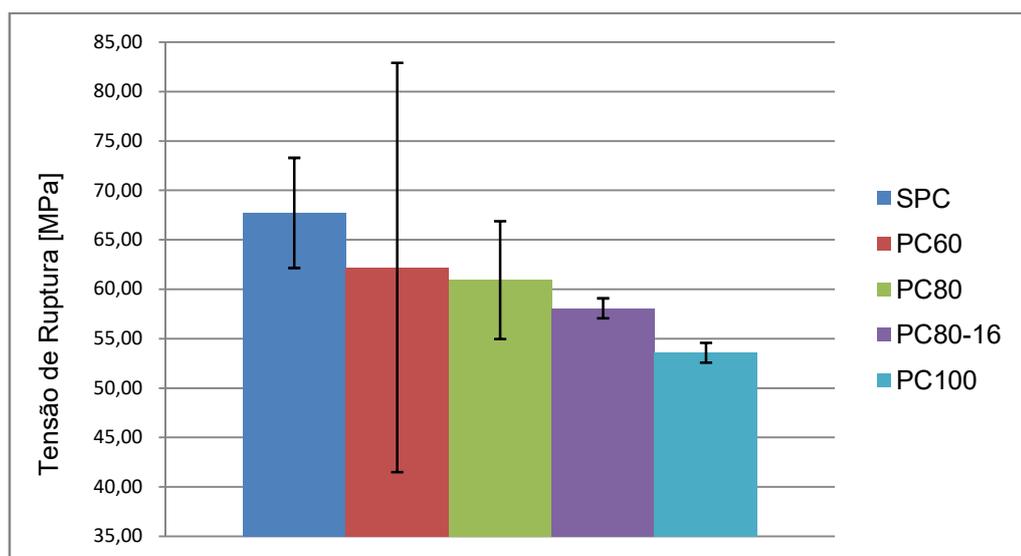
Os valores de tensão máxima e alongamento máximo estão apresentados nas Figuras 8 e 9, respectivamente. Os conjuntos de amostras, como PC60 na tensão máxima e os conjuntos PC60 e PC100 no alongamento máximo, sofreram grande variação nos resultados obtidos nos ensaios de tração, gerando um desvio padrão alto e conseqüentemente aumentando o intervalo de confiança, gerando certa dificuldade na comparação dos resultados entre esses grupos e os demais.

Tamánhas variações dentro dos conjuntos amostrais se devem, possivelmente, às imperfeições geradas nos corpos de prova durante o processo de obtenção, como bolhas em escala microestrutural e falhas na superfície, como citado previamente neste trabalho.

Para estas propriedades será feita a comparação entre conjuntos que não sofreram com a grande variação do desvio padrão, estes serão mostrados graficamente juntamente com os que se fizeram possível.

Na Figura 8 nota-se a tendência de queda nos valores de tensão máxima ao realizar a pós-cura, sendo que novamente o tempo de pós-cura na faixa analisada não demonstrou nenhum efeito marcante nesta propriedade. A redução na tensão máxima para amostras pós-curadas a elevadas temperaturas também pode ser um efeito vinculado a degradação térmica do material, sendo que a fratura é facilitada devido ao rompimento de algumas cadeias poliméricas causado previamente pela temperatura.

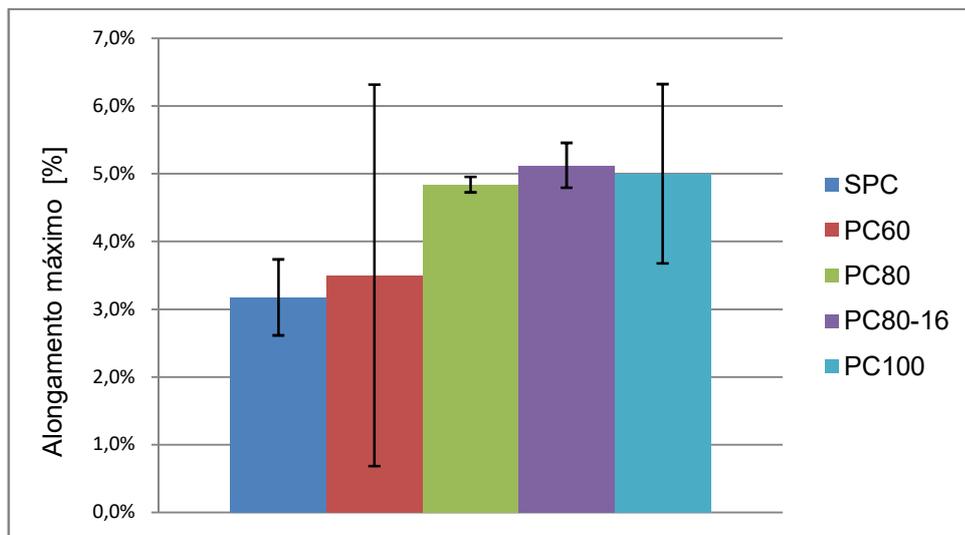
Figura 8 - Tensão máxima das amostras pós-curadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A última propriedade a ser analisada é o alongamento máximo, onde será feito a comparação entre os conjuntos SPC, PC80 e PC100. Esta propriedade analisa a razão entre o comprimento alongado das amostras na quebra e seu comprimento inicial, demonstrando a capacidade do material de se deformar geometricamente antes de quebrar, indicando a ductilidade do material, os resultados obtidos estão na Figura 9.

Figura 9 - Alongamento máximo das amostras pós-curadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Nota-se que a ductilidade aumentou ao realizar a pós-cura, efeito inverso as demais propriedades mecânicas analisadas. Assim, em termo gerais, a pós-cura causou uma redução na resistência mecânica do material com o aumento da ductilidade, sendo que este é o mesmo resultado encontrado por Carbas et al. (2013) quando o material sofreu uma possível degradação térmica ou oxidação das ligações cruzadas.

O fornecedor não disponibiliza as propriedades mecânicas da resina utilizada antes do processo de pós-cura. Entretanto, constata-se que as tendências aqui observadas, devido ao processo de pós-cura, na queda do módulo de elasticidade e no aumento do alongamento máximo são as mesmas tendências verificadas nos valores fornecidos pelo catálogo técnico (Anexo A) para a resina Ampreg 26. Resina do mesmo fabricante e muito similar em sua formulação básica à resina utilizada neste trabalho, sendo uma das diferenças informadas uma maior quantidade de bisfenol F presente na Ampreg 26. Outras diferenças na formulação química das

resinas não foram informadas devido à proteção de propriedade intelectual. O fabricante realizou a pós-cura por 16h, à temperatura de 50°C ,após 24h de cura à temperatura ambiente.

5 CONCLUSÃO

As amostras foram homogeneizadas mecanicamente, vazadas em molde metálico e pós-curadas. Em uma inspeção visual não foram observadas presença de bolhas ou vazios, entretanto alguns resultados obtidos mostraram uma dispersão de propriedades. Este fato foi vinculado a possíveis imperfeições a nível microestrutural proveniente do processo de fabricação das amostras.

Sugere-se que a pós-cura realizada possa ter alterado as propriedades mecânicas, causando uma elevação na ductilidade da resina demonstrado pela aumento do alongamento máximo no ensaio de tração e pela queda nos valores de dureza evidenciada no ensaio de dureza Shore D.

Entre as amostras PC80 e PC80-16 não foram observadas mudanças significativas nas propriedades mecânicas, demonstrando que para os tempos e temperaturas aqui utilizados, a temperatura foi o parâmetro que mais influenciou as propriedades estudadas.

Ao elevar a temperatura do sistema para a aplicação de uma pós-cura, podem-se formar mais ligações cruzadas, aumentando a dureza e rigidez do seu material. Os resultados aqui encontrados, vão no sentido oposto ao aumento de ligações cruzadas. Para baixas temperaturas, PC60, pode ter causado o aumento da mobilidade das cadeias poliméricas e nas temperaturas mais elevadas (PC80, PC100) tenha ido no sentido de oxidação dessas ligações.

Mesmo com estas constatações, salienta-se o fato de que para aplicações distintas na engenharia, a ductilidade pode ser a propriedade almejada no projeto, o que reforça a importância dos resultados aqui alcançados. Os resultados de ensaio de impacto não foram conclusivos, porém era esperado um aumento da resistência ao impacto com a pós-cura devido ao aumento da ductilidade das amostras. Além disso, vale lembrar que para materiais como compósitos fibrados, a pós-cura pode causar efeitos na resistência interlaminar entre fibra e matriz, caso o qual não foi estudado e abordado neste trabalho.

Por fim a proposta deste trabalho atendeu às expectativas onde os corpos de provas foram de qualidade satisfatória, o processo de pós-cura foi realizado como proposto, as alterações das propriedades mecânicas foram analisadas e discutidas.

Além disso, foram identificados pontos de melhorias e sugestões para trabalhos futuros que estão listados abaixo:

- Realizar pós-cura com o controle de rampa de aquecimento dos corpos de prova;
- Aumentar o número de amostras dos ensaios de tração e impacto a fim de diminuir o desvio padrão;
- Aplicar vácuo na resina após a agitação mecânica para remoção total de possíveis bolhas de ar que geram pontos concentradores de tensão;
- Realizar uma análise térmica para identificar a temperatura de transição vítrea da resina para então determinação das temperaturas de pós-cura;
- Realizar o mesmo estudo em compósitos de resina epóxi e reforços fibrados por serem amplamente utilizados na indústria náutica, a fim de investigar a interação destes com aplicação da pós-cura.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D256-10**. Standard test methods for determining the izod pendulum impact resistance of plastics. jun. 2018. Disponível em: <[https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D256+10\(2018\)#ap00100](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D256+10(2018)#ap00100)>. Acesso em 12 jan. 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D638-14**. Standard test methods for tensile properties of plastics. set. 2014. Disponível em: <https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D638+14#tfn00008>. Acesso em 13 mar. 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2240-15e1**. Standard test method for Rubber Property—Durometer Hardness. nov. 2017. Disponível em: <https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?D2240+15e1>. Acesso em: 17 abr. 2019.
- ARUNIIT, A. et al. Preliminary study of the influence of post curing parameters to the particle reinforced composite's mechanical and physical properties. **Materials Science**, Publishing House Technologija, Kaunas, v. 18, n. 3, p.256-261, set. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5755/j01.ms.18.3.2435>>. Acesso em: 28 abr. 2019.
- BOURCHAK, M.; KHAN, A.; JUHANY, K. A.. Effect of preheating and post-curing time on the mechanical properties of epoxy resin. **Advanced Composites Letters**, SAGE publications, London, v. 22, n. 5, p.95-100, set. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1177/096369351302200501>>. Acesso em: 29 mai. 2019.
- CAMPANA, C. et al. Effect of post curing temperature on mechanical properties of a flax fiber reinforced epoxy composite. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Elsevier BV, Ales, v. 107, p.171-179, abr. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.12.029>>. Acesso em: 20 jan. 2019.
- CARBAS, R. J. C. et al. Effect of cure temperature on the glass transition temperature and mechanical properties of epoxy adhesives. **The Journal Of Adhesion**, Francis & Taylor, Rio de Janeiro, v. 90, n. 1, p.104-119, 18 out. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/00218464.2013.779559>>. Acesso em: 17 abr. 2019.
- DURIGAN NETO, P. R. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de nanocompósitos a base de epóxi/nanotubos de carbono**. 2018. 60 p. Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação em Engenharia Naval) - Centro Tecnológico Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2018.
- ESCARPINI FILHO, R. S. **Análise de estruturas de materiais compósitos viscoelásticos lineares através da teoria de volumes finitos**. 2010. 86p.Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

E-COMPOSITES. **Resina epóxi Ampreg 21**: datasheet. Rio de Janeiro. E-composites, 2017. 01 p.

GURIT (UK). **Ampreg 26** : epoxy laminating system. United Kingdom. Gurit, 2018. 08 p.

LEE, H. **Handbook of epoxy resins**. 1. ed. London, Mcgraw-hill book company, 1967. 916 p.

LIPOVSKY, K. Overcoming Vitrification of Polyester Solid Surface Resin for the Kitchen Environment using Postcure. **Composites**, St. Louis, 18-20 Out. 2006. Disponível em: < <https://www.pharosproject.net/uploads/files/cml/1335302789.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2019.

MAY, Clayton. **Epoxy resins: Chemistry and technology**. 2. ed. Nova Iorque, Basel, 1988. 300 p.

NASSEH, J. **Métodos avançados de construção em composites**. 1. ed. Rio de Janeiro: Barracuda, 2007. 341 p.

NASSEH, J. **Manual de construção de barcos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Barracuda, 2011. 667 p.

OSUMI, Y. **One-Part Epoxy Resin**. West Chester: Three Bond, 1987. 19 p.

PARAMESWARANPILLAI, J. et. al. **Handbook of epoxy blends**. New York: Springer, 2017. 1121p.

PETRIE, Edward M. **Epoxy Adhesive Formulation**. [s.i.]: Mcgraw-hill, 2006. 535 p.

SHI, A. X; XIAO, X. S. Introduction to rubber toughened epoxy polymers. in: PARAMESWARANPILLAI, J. et. al. **Handbook of epoxy blends**. New York: Springer, 2017. p.3-28.

WU, C.-S. Influence of post-curing and temperature effects on bulk density, glass transition and stress-strain behaviour of imidazole-cured epoxy network. Springer, **Journal Of Materials Science**, Taiwan, v. 27, n. 11, p.2952-2959, Out. 1992. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/bf01154105>>. Acesso em: 28 Abr. 2019.

ZARGISKI, R. T. **Estudo do comportamento das propriedades termo-mecânicas da resina epóxi a partir do processo de pós-cura**. 2018. 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval) - Centro Tecnológico Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2018.

ZHANG, J.; XU, Y. C.; HUANG, P. Effect of cure cycle on curing process and hardness for epoxy resin. **Express Polymer Letters**, Taiwan, Citeseer, v. 3, n. 9, p.534-541, jun. 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3144/expresspolymlett.2009.67>>. Acesso em 17 abr. 2019.

APÊNDICE A – Resultados das medições de dimensões das amostras.

Figura 10 - Valores obtidos nas medições de dimensão das amostras.

SPC	Espessura (mm)				Largura (mm)			
Amostra	Ponto1	Ponto2	Ponto3	Média	Ponto1	Ponto2	Ponto3	Média
21	3,43	3,36	3,35	3,38	13,25	13,26	13,22	13,24
22	3,24	3,38	3,36	3,33	13,27	13,24	13,22	13,24
23	3,44	3,43	3,43	3,43	13,28	13,28	13,25	13,27
24	3,45	3,45	3,45	3,45	13,17	13,20	13,25	13,21
25	3,28	3,37	3,41	3,35	13,22	13,27	13,26	13,25

PC60	Espessura (mm)				Largura (mm)			
Amostra	Ponto1	Ponto2	Ponto3	Média	Ponto1	Ponto2	Ponto3	Média
1	3,42	3,32	3,24	3,33	13,26	13,18	13,13	13,19
2	3,51	3,41	3,22	3,38	13,21	13,27	13,18	13,22
3	3,47	3,40	3,32	3,40	13,21	13,20	13,21	13,21
4	3,31	3,25	3,16	3,24	13,18	13,19	13,18	13,18
5	3,18	3,28	3,34	3,27	13,16	13,18	13,14	13,16

PC80	Espessura (mm)				Largura (mm)			
Amostra	Ponto1	Ponto2	Ponto3	Média	Ponto1	Ponto2	Ponto3	Média
6	2,93	2,94	2,94	2,94	13,20	13,19	13,22	13,20
7	3,31	3,18	3,04	3,18	13,17	13,21	13,19	13,19
8	3,21	3,13	3,08	3,14	13,20	13,24	13,22	13,22
9	3,08	3,11	3,25	3,15	13,15	13,18	13,16	13,16
10	3,10	3,12	3,23	3,15	13,22	13,21	13,24	13,22

PC80-16	Espessura (mm)				Largura (mm)			
Amostra	Ponto1	Ponto2	Ponto3	Média	Ponto1	Ponto2	Ponto3	Média
11	3,33	3,17	3,08	3,19	13,28	13,16	13,13	13,19
12	3,06	3,09	3,32	3,16	13,18	13,22	13,22	13,21
13	3,08	3,16	3,42	3,22	13,20	13,22	13,24	13,22
14	2,99	3,06	3,42	3,16	13,20	13,24	13,23	13,22
15	3,33	3,10	3,02	3,15	13,20	13,20	13,18	13,19

PC100	Espessura (mm)				Largura (mm)			
Amostra	Ponto1	Ponto2	Ponto3	Média	Ponto1	Ponto2	Ponto3	Média
16	3,19	3,28	3,34	3,27	13,24	13,24	13,22	13,23
17	2,98	2,98	3,12	3,03	13,18	13,23	13,20	13,20
18	3,10	3,10	3,12	3,11	13,21	13,23	13,18	13,21
19	3,08	3,07	3,10	3,08	13,16	13,16	13,14	13,15
20	2,97	3,02	2,99	2,99	13,25	13,24	13,22	13,24

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

APÊNDICE B – Resultado das medições de dureza Shore D.

Figura 11 - Valores encontrados no ensaio de dureza Shore D.

SPC	Dureza Shore D				
Amostra	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
21	90,5	90,0	90,5	91,0	89,5
22	89,0	88,5	90,5	91,0	89,5
23	90,0	91,5	90,0	91,5	90,5
24	88,5	90,5	90,5	90,5	89,5
25	90	89,5	90,5	89,5	89,5

PC60	Dureza Shore D				
Amostra	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
1	88,5	90	89	88,5	86,5
2	88,5	89	87,5	88,5	87,5
3	88	89,5	86	89,5	89,5
4	90	91,5	90,5	90	91,5
5	90	90	90,5	90,5	91

PC80	Dureza Shore D				
Amostra	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
6	87,5	85,5	89	86	83
7	86	88,5	91	86	83,5
8	90	90	89,5	90,5	88,5
9	89,5	87,5	90,5	86,5	90,5
10	91,5	90,5	88	89,5	88,5

PC80-16	Dureza Shore D				
Amostra	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
11	88	83,5	89,5	85	84,5
12	88,5	88	89,5	88,5	90
13	88,5	87,5	89,5	89,5	89
14	88,5	88,5	89	87,5	87,5
15	89	87	89	89,5	88

PC100	Dureza Shore D				
Amostra	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
16	90	87	89	89	89
17	89	87,5	89	89	89,5
18	90	87	89	90	89,5
19	89	87	89,5	88	89
20	89	88,5	88	87	87

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

APÊNDICE C – Resultados dos ensaios de impacto izod.

Figura 12 - Valores obtidos após o ensaio de impacto izod.

SPC	
Amostra	Energia [J/m]
13	53,5
14	24,7
15	33,0
Média	37,1
σ	14,8
IC 95%	33,4

PC60	
Amostra	Energia [J/m]
1	32,3
2	170,6
3	133,2
Média	112,0
σ	71,6
IC 95%	161,0

PC80	
Amostra	Energia [J/m]
4	67,8
5	27,1
6	34,4
Média	43,1
σ	21,7
IC 95%	48,8

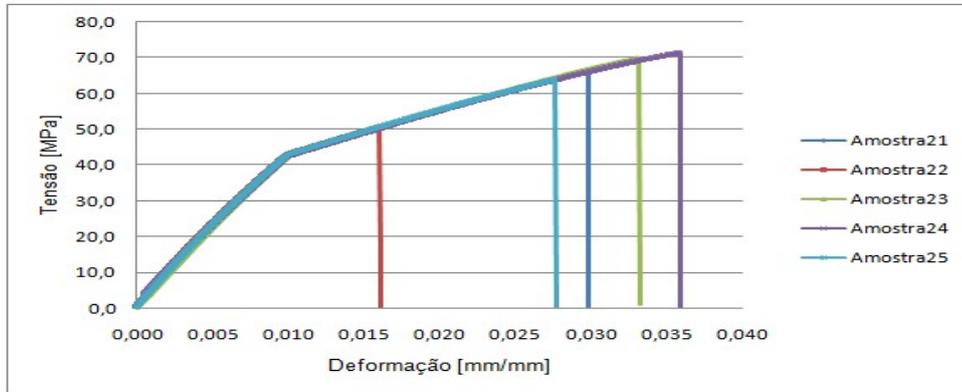
PC80-16	
Amostra	Energia [J/m]
7	132,6
8	161,5
9	159,7
Média	151,3
σ	16,2
IC 95%	36,4

PC100	
Amostra	Energia [J/m]
10	11,6
11	32,2
12	40,4
Média	28,1
σ	14,8
IC 95%	33,3

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019)

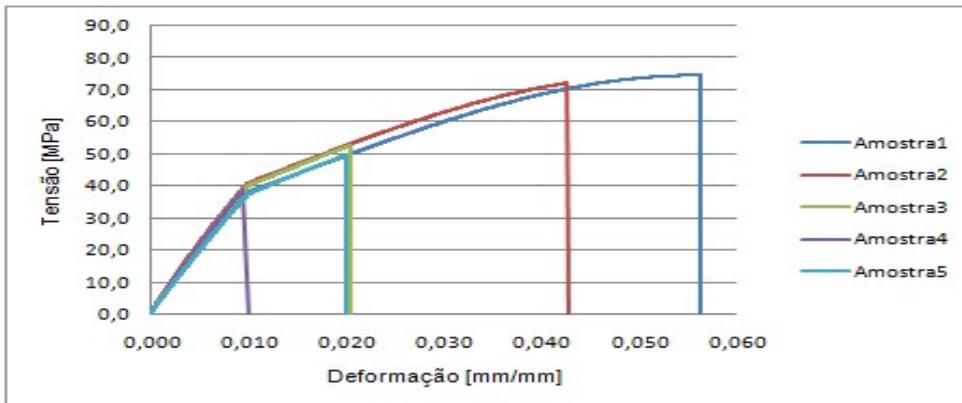
APÊNDICE D – Curvas tensão-deformação do ensaio de tração.

Figura 13 - Curva tensão-deformação das amostras SPC.



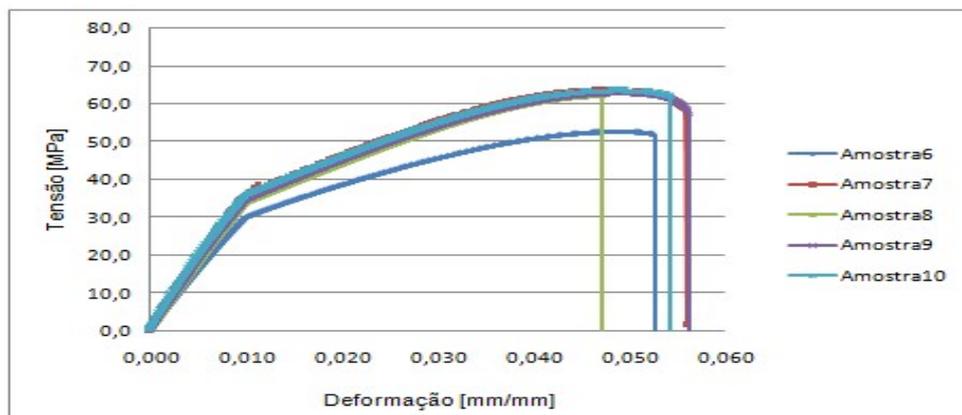
Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Figura 14 - Curva tensão-deformação das amostras PC60.



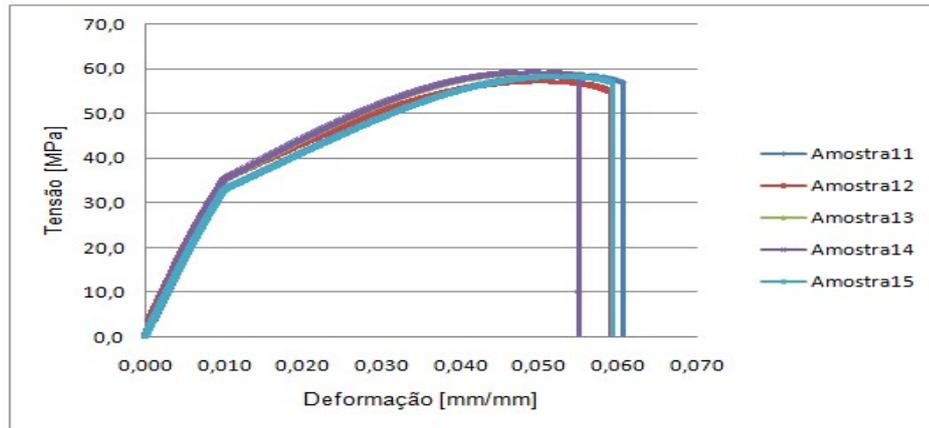
Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Figura 15 - Curva tensão-deformação das amostras PC80.



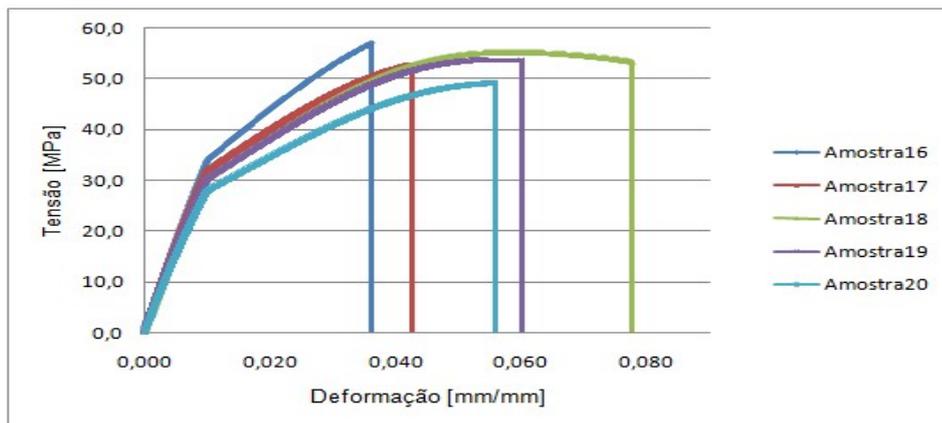
Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Figura 16 - Curva tensão-deformação das amostras PC80-16.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Figura 17 - Curva tensão-deformação das amostras PC100.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

APÊNDICE E – Resultados obtidos pelo ensaio de tração.

Figura 18 - Valores obtidos após os ensaios de tração.

(Continua)

SPC	21	22	23	24	25	Média	σ	IC 95%
Espessura [mm]	3,38	3,33	3,43	3,45	3,35	3,39	0,05	0,07
Largura [mm]	13,24	13,24	13,27	13,21	13,25	13,24	0,02	0,03
Módulo [GPa]	4,74	5,14	4,56	4,69	4,70	4,77	0,22	0,28
Limite de escoamento [MPa]	44,53	43,33	45,06	43,84	44,68	44,29	0,69	0,89
Tensão máxima [MPa]	65,90	-	69,90	71,30	63,80	67,73	3,48	5,57
Alongamento na ruptura [%]	3,00%	-	3,30%	3,60%	2,80%	3,18%	0,35%	0,56%

PC60	1	2	3	4	5	Média	σ	IC 95%
Espessura [mm]	3,33	3,38	3,40	3,24	3,27	3,32	0,07	0,09
Largura [mm]	13,19	13,22	13,21	13,18	13,16	13,19	0,02	0,03
Módulo [GPa]	3,98	4,55	4,31	4,48	3,96	4,26	0,28	0,35
Limite de escoamento [MPa]	40,37	42,39	42,23	-	40,00	41,25	1,24	1,99
Tensão máxima [MPa]	74,50	72,10	52,60	-	49,60	62,20	12,91	20,70
Alongamento na ruptura [%]	5,60%	4,30%	2,10%	-	2,00%	3,50%	1,76%	2,82%

PC80	6	7	8	9	10	Média	σ	IC 95%
Espessura [mm]	2,94	3,18	3,14	3,15	3,15	3,11	0,10	0,13
Largura [mm]	13,20	13,19	13,22	13,16	13,22	13,20	0,02	0,03
Módulo [GPa]	3,20	3,90	3,57	3,72	3,98	3,67	0,31	0,40
Limite de escoamento [MPa]	31,74	37,36	36,07	36,46	37,06	35,74	2,29	2,94
Tensão máxima [MPa]	52,70	63,50	62,10	62,80	63,50	60,92	4,63	5,95
Alongamento na ruptura [%]	4,90%	4,80%	4,70%	4,90%	4,90%	4,84%	0,09%	0,11%

PC80-16	11	12	13	14	15	Média	σ	IC 95%
Espessura [mm]	3,19	3,16	3,22	3,16	3,15	3,18	0,03	0,04
Largura [mm]	13,19	13,21	13,22	13,22	13,19	13,21	0,02	0,02
Módulo [GPa]	3,58	4,21	-	4,01	3,55	3,83	0,33	0,52
Limite de escoamento [MPa]	34,72	35,28	-	36,08	34,15	35,06	0,82	1,32
Tensão máxima [MPa]	58,70	57,20	-	58,20	58,20	58,08	0,63	1,01
Alongamento na ruptura [%]	5,30%	5,00%	-	4,90%	5,30%	5,13%	0,2%	0,33%

(Conclusão)

PC100	16	17	18	19	20	Média	σ	IC 95%
Espessura [mm]	3,27	3,03	3,11	3,08	2,99	3,10	0,11	0,14
Largura [mm]	13,23	13,20	13,21	13,15	13,24	13,21	0,03	0,04
Módulo [GPa]	3,77	3,61	3,31	3,28	3,10	3,41	0,27	0,34
Limite de escoamento [MPa]	35,53	32,53	31,74	31,30	28,70	31,96	2,46	3,16
Tensão máxima [MPa]	57,10	52,60	55,30	53,80	49,10	53,58	3,02	3,88
Alongamento na ruptura [%]	3,60%	4,20%	5,80%	5,80%	5,60%	5,00%	1,03%	1,32%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

ANEXO A – Informações das resinas Ampreg 21 e Ampreg 26

Figura 19 - Informações fornecidas pelo fabricante da resina Ampreg 21.

Cured System Properties		
	Resin/Fast Hardener (@25°C)	Resin/Slow Hardener (@25°C)
Tg Ult - DMTA (°C)	98,4	106,3
Est. HDT (°C) 77 67 66 74 73	63	48
Cured density (g/cc)	1,183	1,159
Linear shrinkage (%)	1,60	1,60
Resin cast tensile strength	84,90	58,30
Resin cast tensile modulus (GPa)	3,91	3,75
Resin cast strain to failure (%)	3,20	1,80

* Post cured (24hour at 21°C + 16hrs at 50°C)

Fonte: Adaptado de E-composites (2017).

Figura 20 - Informações fornecidas pelo fabricante da resina Ampreg 26.

Cured System Properties						
	Room Temperature Cure (26 days @ 21°C)			Post Cured (24 hrs @ 21°C + 16 hours @ 60°C)		
	Fast	Slow*	Ultra Slow*	Fast	Slow	Ultra Slow
Tg DMTA (Peak Tan δ)(°C)	78.3	62.5	63.0	96.3	82.2	82.7
Tg Ult - DMTA (°C)	98.4	106.3	109.3	98.4	106.3	109.3
ΔH - DSC (J/g)	42	57	46	9	11	3
Tg1 - DMTA (°C)	65.0	56.3	55.1	76.5	73.9	74.6
Est. HDT (°C)	63	48	48	71	67	68
Moisture Absorption (%)	1.31	1.05	1.12	1.10	0.93	0.91
Cured Density (g/cm ³)	1.183	1.159	1.158	1.183	1.160	1.159
Linear Shrinkage (%)	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Barcol Hardness	37	27	29	37	28	30
Cast Tensile Strength (MPa)	84.9	58.3	61.1	84.7	80.3	78.8
Cast Tensile Modulus (GPa)	3.91	3.75	3.7	3.63	3.45	3.62
Cast Strain to Failure (%)	3.2	1.8	1.9	5.1	4.9	4.2

Fonte: Adaptado de Gurit (2018).