

# ESTUDOS DE FLEXIBILIZAÇÃO DE RESINAS EPÓXI PARA UTILIZAÇÃO EM COMPÓSITOS

## *FLEXIBILIZATION STUDIES OF EPOXY RESINS FOR USE IN COMPOSITE*

José Eduardo Salgueiro Lima<sup>1</sup>, Thiago Alexandre Alves de Assumpção<sup>2</sup>

**Resumo** – Neste trabalho foi analisado o comportamento da matriz polimérica de resina epóxi (DGEBA) quando modificada com uma resina epóxi flexibilizante, pois este estudo servirá de base para obtenção de compósitos estruturais reforçados com fibras carbono, vidro e aramida, utilizados em blindagens de veículos, para o projeto de Iniciação Científica do Centro Universitário ENIAC. Foi possível comprovar-se que um sistema epóxi DGEBA modificado, deformou-se aproximadamente 6 vezes mais que um sistema DGEBA puro, aumentando a sua flexibilidade e a resistência ao impacto. Assim foi possível observar que com a adição da resina epóxi flexibilizante ao epóxi puro aumentou o seu alongamento em aproximadamente 432 %, conferindo ao sistema epóxi rígido maior flexibilidade e provável aumento na resistência ao impacto, o que pode indicar, que o sistema epóxi modificado em estudo, poderá participar com vantagens em sistemas compósitos de blindagens com matrizes poliméricas.

Palavras-chave: amina; compósitos; DGEBA; epóxi; resina.

**Abstract** – In this article, the behavior of the polymeric epoxy resin matrix (DGEBA) when modified with a flexible epoxy resin was analyzed, as this study will serve as the basis for obtaining structural composites reinforced with carbon, glass and aramid fibers, used in vehicle armor, for the Scientific Initiation project of the ENIAC University Center. It was possible to prove that a modified DGEBA epoxy system was deformed approximately 6 times more than a pure DGEBA system, increasing its flexibility and resistance to impact. Thus it was possible to observe that with the addition of the flexibilizing epoxy resin to the pure epoxy, its elongation increased by approximately 432%, giving the rigid epoxy system greater flexibility and probable increase in impact resistance, which may indicate that the modified epoxy system in study, it will be able to participate with advantages in composite shielding systems with polymeric matrices.

**Keywords:** amine; composites; DGEBA; epoxy.

### I. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos estruturais, vêm sendo aplicados em diversos produtos nas indústrias automobilística, aeroespacial e aeronáutica, construção civil, entre outras, sempre envolvendo tecnologias de ponta, que com o desenvolvimento de novos materiais, que apresentam desempenho cada vez melhor. Compósitos com matrizes

poliméricas (resinas) e fibras de alto padrão tecnológico, vem substituindo, com vantagens componentes metálicos, pois são resistentes a ataques químicos e corrosão, não conduzem eletricidade, não são magnéticos e expressiva redução de peso [1]. Neste artigo, pretende-se flexibilizar resinas epóxi do tipo DGEBA, para utilização em compósitos para blindagens, com reforço de fibras de vidro ou carbono, de forma a se aumentar a resistência ao impacto da resina epóxi.

Este trabalho tem como objetivo comparar o comportamento mecânico de um sistema epóxi composto por uma resina epóxi do tipo DGEBA e agente de cura amínico sistema epóxi com outro sistema epóxi composta com a mesma resina do tipo DGEBA e agente de cura, no entanto, modificada por resina epóxi diluente reativa flexibilizante.

### II. REFERENCIAL TEÓRICO

Pode-se definir um material compósito como um material formado por dois ou mais componentes, isto pode levar a se pensar que todo que possua duas fases diferentes, pode ser classificado como material compósito, no entanto a definição atual de material compósito contempla a existência de materiais com fases distintas em suas propriedades físicas químicas, constituídas de uma fase descontínua e outra contínua, sendo que a fase contínua é denominada matriz e a descontínua denominadas reforços, estes compósitos estruturais tem como matrizes poliméricas, mais comumente utilizadas, as resinas termorrígidas, como a epóxi, fenólica, poliésteres e vinil éster. As matrizes metálicas também são utilizadas, sendo assim utilizam-se metais como o alumínio, níquel e titânio são os metais mais utilizadas, dentre as matrizes cerâmicas utilizam-se óxido de alumínio (alumina), nitretos de silício de carbetos de silício, nitretos de silício entre outros. A temperatura de trabalho muitas vezes determina a matriz a ser utilizada, em geral as matrizes poliméricas resistem a temperaturas até 200°C, enquanto que as matrizes metálicas são recomendadas para aplicações até 800°C, para temperaturas acima de 1000°C utiliza-se matrizes metálicas [1].

<sup>1</sup>Doutor em Ciências e Professor em Engenharias no Centro Universitário ENIAC. [jose.salgueiro@eniac.edu.br](mailto:jose.salgueiro@eniac.edu.br)

<sup>2</sup>Doutor em Ciências e Professor em Engenharias no Centro Universitário ENIAC. [thiago.alexandre@eniac.edu.br](mailto:thiago.alexandre@eniac.edu.br)

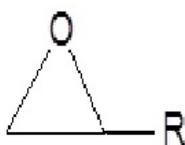
As fases descontínuas, denominadas reforços, pois, efetivamente suportam a carga mecânica que atua sobre o compósito, são fabricadas basicamente através de três processos: fiação por fusão, fiação a úmido e fiação a seco. As fibras tem utilidade estrutural desde que aglutinadas e estabilizadas pelas matrizes [2].

As fibras sintéticas mais utilizadas na fabricação de compósitos estruturais são as fibras de vidro, fibras de carbono e fibras aramida, podem ser fornecidas na forma de mantas não tecidas, tecidos e rolos, estas fibras conferem à estrutura propriedades mecânicas elevadas na direção da fibra [1].

Neste trabalho foi analisado o comportamento da matriz polimérica de resina epóxi quando modificada com uma resina epóxi flexibilizante, pois este estudo servirá de base para obtenção de compósitos estruturais reforçados com fibras carbono, vidro e aramida, utilizados em blindagens de veículos, para o projeto de Iniciação Científica do Centro Universitário ENIAC.

A resina epóxi é uma resina termorrígida de alto desempenho, com cadeias moleculares com grupos epóxi terminais reativos, estes grupos são conhecidos por oxirano, etoxilina ou simplesmente anel epóxi, conforme pode-se observar na Figura 1, a seguir [2].

Figura 1 - Anel epóxi ou oxirano

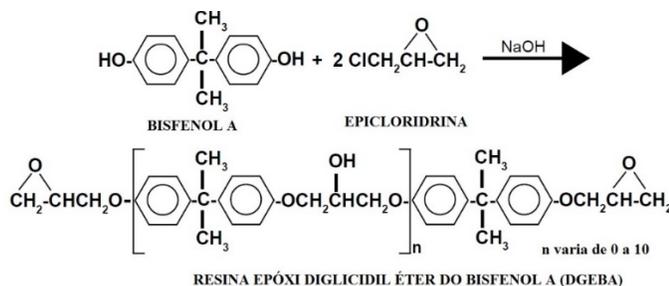


**R=cadeia molecular**

Fonte: Autor (adaptado MARINUCCI), 2019

A resina epóxi mais utilizada têm, é a diglicidil éter do bisfenol-A (DGEBA), a obtenção ocorre a partir da reação entre a epicloridrina e o bisfenol A, em relações estequiométricas que podem variar de 10:1 até 1,2:1, com isso pode-se obter de resinas líquidas até resinas sólidas, com dois anéis epóxi entremeados por uma unidade que repete n vezes, e com isso possibilita a variação das propriedades da resina obtida [2]. A reação de obtenção de uma resina epóxi do tipo DGEBA pode ser observada na Figura 2 a seguir:

Figura 2 - Reação de obtenção do Diglicidil Éter do Bisfenol A (DGEBA)



Fonte: AUGUSTSSON, 2004

Neste trabalho foi utilizada uma resina do tipo DGEBA ARALDITE® GY260 modificada pela resina flexibilizante

ARADUR® DY3601. O agente de cura ou endurecedor é quem determina algumas propriedades finais do produto em epóxi, tais como pot-life, tempo de cura, resistência química e mecânica, neste trabalho utilizou-se a amina cicloalifática ARADUR® 2965 [2]

A ideia deste trabalho é modificar a resina DGEBA com resina flexibilizante para ser aplicada em blindagem de automóveis, para que estes sistemas de blindagem se tornem mais flexível e com maior resistência ao impacto. Devido a demanda de blindagens no cenário atual tanto urbano como de guerra passou-se a pesquisar outras maneiras de se fazer blindagem, tanto as blindagens corporais, blindagens leves quanto as pesadas.

### III. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foi utilizada resina epóxi do tipo DGEBA de marca Araldite® GY 260, fabricada pela Hunstman Química do Brasil Ltda. Esta resina é líquida, não modificada, de alta viscosidade, formulada à base de Bisfenol A, sendo que as suas especificações são fornecidas através da Tabela 1, a seguir:

Tabela 1 - Especificações da resina epóxi do tipo DGEBA ARALDITE® GY-260

Propriedades	Unidades	Resultados
Estado-Físico	-----	Líquido
Viscosidade a 25°C (DIN 53015)	mPas	12.000 - 16.000
Equivalente-Epóxi	g/Eq	185 - 196
Teor-Epóxi	Eq/kg	5,10 - 5,40
Cor	Gardner	≤ 3
Massa Específica a 20°C	g/cm <sup>3</sup>	1,20

Fonte: Hunstman, 2001

A resina epóxi modificadora é o diluente reativo, Araldite® DY3601, fabricada pela Hunstman Química do Brasil Ltda, sendo reativa se incorpora ao sistema epóxi, pois reage com o endurecedor, proporcionando maior flexibilidade, resistência ao impacto e redução de viscosidade, é formulada à base de polipropileno glicol, e suas especificações encontram-se na Tabela 2 [4].

Tabela 2 - Especificações da resina epóxi do tipo DGEBA ARALDITE® DY-3601

Propriedades	Unidade	Resultados
Estado Físico	-----	Líquido
Viscosidade a 25° C (DIN 53015)	mPas	42 - 52
Equivalente Epóxi	g/Eq	385 - 405
Teor Epóxi	Eq/kg	2,47 - 2,60
Cor <sup>1</sup>	Gardner	≤ 3
Massa Específica a 20°C.	g/cm <sup>3</sup>	1,03

Fonte: Hunstman, 2001

O endurecedor utilizado é a amina cicloalifática modificada Aradur® 2965 para cura a frio, é livre de fenol e baixa viscosidade, as especificações encontram-se na Tabela 3 [4].

Tabela 3 - Especificações do endurecedor amínico cicloalifático ARALDUR® 2965

Propriedades	Unidade	Resultados
Estado Físico	-----	Líquido
Viscosidade a 25° C (DIN 53015)	mPas	100- 300
Equivalente Ativo H+	g/Eq.	94
Número de Amina	mg OH/g	2,47 - 2,60
Cor <sup>a</sup>	Gardner	≤ 4
Massa Específica a 20°C.	g/cm <sup>3</sup>	1,05

Fonte: Hunstman, 2001

Estes materiais constituem dois sistemas epóxi distintos, são eles:

- Sistema 1: [ARALIDTE® GY 260] + [ARADUR® 2965];
- Sistema 2: [ARALDITE® GY 260 + ARALDITE® DY3601] + ARADUR® 2965

Os sistemas 1 e 2 são compostos por resinas que reagem com o endurecedor pela relação estequiométrica de 1:1, em equivalente-grama das resinas e equivalente ativo H+ do endurecedor, por outro lado, para o sistema 2 a resina DY 3601 geralmente adicionado ao sistema em quantidades variando de 5% a 30% em relação ao total: resina epóxi + endurecedor, adotou-se 30% sobre a soma das partes (HUNSTMAN, 2001). Sendo assim tem-se:

#### • SISTEMA 1

Para o equivalente grama da resina GY 260 adotou-se a média do equivalente da especificação do fabricante, conforme a Tabela 1, tem-se, portanto, 190,5 g/Eq.

Para o equivalente ativo H+ do endurecedor ARADUR® 2965, adotou-se o valor especificado na Tabela 3, portanto, 94 g/Eq. Sendo assim tem-se o cálculo conforme a seguir:

ARALIDTE® GY 260	ARADUR® 2965
190,50 pp	94 pp
pp de resina	X

Desta forma para o Sistema 1 a quantidade em partes por peso (pp) de endurecedor 2965 é dada pela expressão:

$$X = \frac{ppGY260 \times 94pp}{190,5pp} \quad (1)$$

Onde: X=quantidade de endurecedor para pp GY260.

#### • SISTEMA 2

Para o Sistema 2 tem-se a adição da resina flexibilizante DY3601, que por ser ativa é necessário fazer-se o cálculo da quantidade de endurecedor 2965. O equivalente em grama da resina DY 3601 é dada pela média dos equivalentes, dados pela Tabela 2, portanto, 395 g/Eq. A quantidade de DY3601, de acordo com o fabricante, é dado por 30% da quantidade de resina GY260+2965, assim tem-se:

$$pp \text{ DY3601} = 0,3[ppGY260 + X] \quad (2)$$

Onde X=quantidade de endurecedor para pp de resina GY260.

Assim tem-se:

ARALIDTE® DY 3601	ARADUR® 2965
395 pp	94 pp
pp DY3601=0,3[ppGY260 + X]	Y

Assim tem-se:

$$Y = \frac{28,2[ppGY260+X]}{395} \quad (3)$$

Onde: Y= quantidade de endurecedor para pp DY3601.

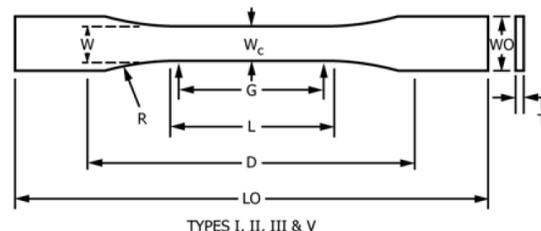
No sistema 2, a massa total ou partes total de endurecedor 2965, para as resinas constituintes é por:

$$W=X+Y \quad (4)$$

Onde: W=partes total de endurecedor

Após o cálculo das quantidades, estas são pesadas e misturadas por um minuto e meio e despejadas em moldes segundo a norma. Para a produção dos corpos de prova e seus moldes, utilizou-se a norma ASTM 638M (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) que rege os padrões de produção para esse modelo de corpo de prova com as medidas conforme a Figura 3 [4].

Figura 3 – Dimensões do corpo de prova para matrizes poliméricas segundo norma ASMT 638-14



Fonte: ASTM, 2014

Neste trabalho, adotou-se corpos de prova do tipo I com espessura T=3,2 +/-0,2 mm, e as outras dimensões encontram-se na Tabela 4:

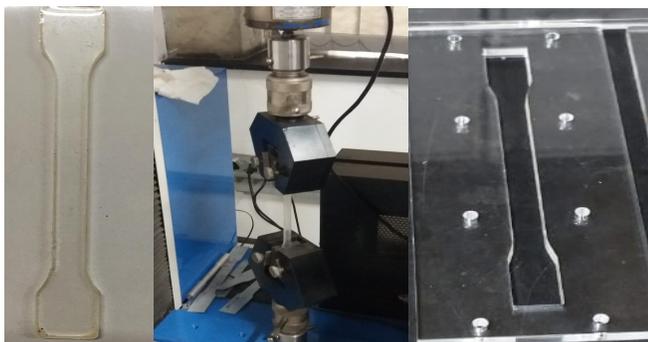
Tabela 4 - Dimensões de corpos de prova para ensaios de tração em resinas epóxi

Corpo de prova	W (mm)	L (mm)	W0 (mm)	LO (mm)	R (mm)	G (mm)	D (mm)
Tipo I	13	57	19	165	76	50	115

Fonte: Adaptado ASTM, 2019

Os moldes foram construídos a partir das dimensões da Tabela 3, a velocidade de ensaio para materiais rígidos ou semi rígidos, com dimensões do tipo I, segundo a norma ASTM D 638-14, é de 5 mm/min (adotada), na Figura 4 pode-se observar um corpo de prova, molde e um corpo de prova em teste.

Figura 4 – Corpo de prova tipo I, à esquerda, ao centro molde utilizado para se confeccionar os corpos de prova, segundo norma ASTM D 638-14.



Fonte: Autor, 2019

#### IV. DESENVOLVIMENTO

Para se obter os corpos de prova, nos dois sistemas utilizou-se as expressões de (1) a (4), desenvolvidas no item 4-MÉTODOS, assim tem-se:

Para o Sistema 1, adotou-se a 50 g, com a quantidade de GY260, aplicando-se a equação (1), obteve-se  $X=24,70\text{g}$  do endurecedor Aradur® 2965.

Para o Sistema 2, a quantidade de DY3601, é obtida pela expressão (2):

$$pp\ DY3601 = 0,3[ppGY260 + X] = 0,3[50\text{g} + 24,70] = 22,41\text{g}.$$

Através da expressão [3] obtém-se a quantidade  $Y= 5,33\text{ g}$  do endurecedor 2965, para a quantidade de 24,41 g de DY3601. A quantidade de endurecedor Aradur®2965 utilizada para o Sistema 2, será:

$$W=X+Y \rightarrow W=22,41+5,33=30\text{ g}$$

A partir dos resultados obtidos pelos cálculos, é possível construir a Tabela 5, onde encontram-se os resultados das composições utilizadas para se obter os corpos de prova:

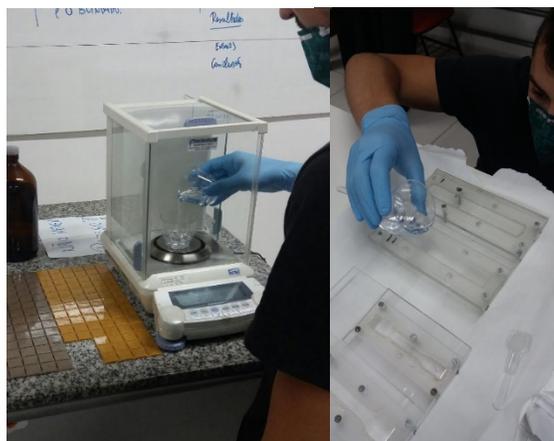
**Tabela 5 – Composições dos corpos de prova**

SISTEMA/COMPOSIÇÃO	Quantidade		
	GY 260 (g)	DY 3601 (g)	Aradur 2965 (g)
Sistema 1: GY 260 + Aradur 2965	50	-----	24,7
Sistema 2: [GY 260 + DY 3601] + Aradur 2965	50	22,41	24,7+5,33

Fonte: Autor, 2019

Determinada a quantidade de agente de cura, para cada sistema, pesou-se as quantidades através de uma balança analítica, com precisão de 0,001g, em seguida, misturou-se manualmente durante 1min e 30seg, de forma a se obter uma mistura homogênea, e livre de bolhas, em seguida verteu-se a mistura em moldes acrílicos previamente untados com cera desmoldante de carnaúba, conforme pode-se observar na Figura 5, a seguir:

Figura 5: À esquerda: Pesagem em balança analítica. À direita: Mistura sendo vertida nos moldes.



Fonte: Autor, 2019

Em seguida, deixou-se os moldes na capela com temperatura ambiente de 25°C, durante 7 dias, sendo que após este período promoveu-se a desmoldagem.

#### V. RESULTADOS

Após a realização dos ensaios de tração nos corpos de prova para os sistemas descritos abaixo:

##### Sistema 1:

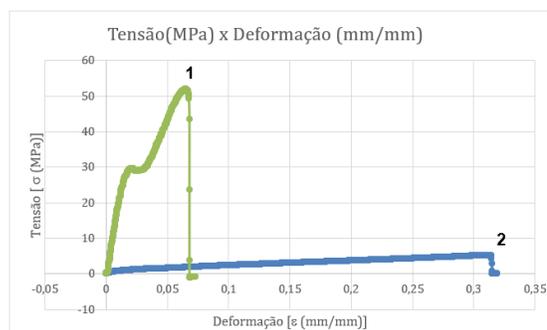
ARALDITE® GY260 + ARADUR® 2965

##### Sistema 2:

[ARALDITE® GY260 + ARALDITE®3601]+ARADUR® 2965

Foram obtidas a curva tensão x deformação conforme pode-se observar no gráfico mostrado na Figura 6, a seguir.

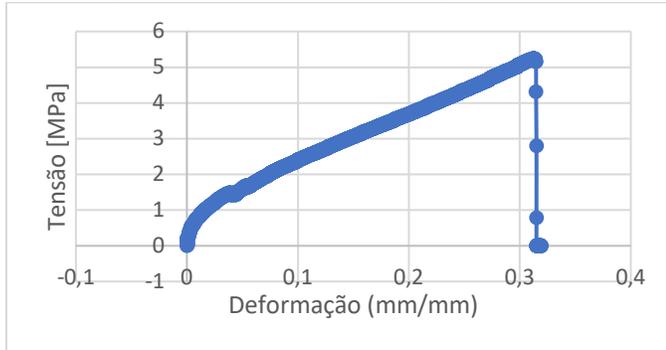
**Figura 6 - Curva tensão x deformação para os sistemas 1 e 2.**



Fonte: Autor, 2019

Pode-se observar, no gráfico da Figura 6, que o sistema 1 apresenta um aparente patamar de escoamento ou deflexão da curva, tensão máxima de tração de 51,07 MPa para uma deformação de 6,0 %, com valores típicos encontrados na literatura, na realidade trata-se de um comportamento visco elástico. Ao se analisar a curva tensão deformação da Figura 6, para o sistema 2, devido a escala, não é possível verificar-se o patamar de “escoamento” ou deflexão da curva, no entanto, a curva tensão x deformação da Figura 7, onde tem-se apenas a curva para o sistema 2, a deflexão é visível com a deformação 4,50 % e tensão 1,42 MPa, conforme pode-se observar a seguir:

Figura 7 - Curva tensão x deformação para o sistema 2



Fonte: Autor

É possível se observar que o sistema 2 apresenta alto alongamento em relação ao sistema 1, pois apresenta 33%, na ruptura enquanto que o sistema 1 apresenta 6,0 %, o que mostra o aumento na flexibilidade e provavelmente na resistência ao impacto do sistema epóxi.

## VI. CONCLUSÕES

Foi possível observar que com a adição da resina epóxi flexibilizante o epóxi puro aumentou o seu alongamento em aproximadamente 432 %, conferindo ao epóxi rígido maior flexibilidade e provável aumento na resistência ao impacto, o que pode indicar, que o sistema epóxi modificado em estudo, poderá participar com vantagens em sistemas compósitos de blindagens com matrizes poliméricas.

## VII. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Centro Universitário ENIAC, pelo incentivo às publicações do Programa de Iniciação Científica.

## VIII. REFERÊNCIAS

1. MARINUCCI, Gerson. **Materiais compósitos poliméricos. Fundamentos e tecnologia.** 1ª. Ed. São Paulo: Artliber Editora, 2011
2. LEVY NETO, Flávio; PARDINI, Luís Claudio. **Compósitos Estruturais: Ciências e tecnologia.** 2ª ed. São Paulo, Revista e ampliada: Blucher, 2016. 413 p.
3. AUGUSTSSON, Curt. **NM Epoxy Handbook.** Ytterby, Suécia, 2004.
4. CATÁLOGO Técnico Araldite®, Aradur®. São Paulo: Hunstman Química, 2001.
5. AMERICAN STANDARD TEST METHOD. **D 638-14:** Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. New York: Astm International, 2004