



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA

**ENGENHARIA DE MATERIAIS**

---



## TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

### **RECICLAGEM PRIMÁRIA DE RESÍDUOS DE RESINA EPOXI EM ENCAPSULAMENTO DE CAPACITORES DE FILME**

Gabriel Regio

00183373

Orientador: Prof(a). Dr(a). Ruth Campomanes  
Santana

Porto Alegre

2021

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradecer a Deus por me manter em plena saúde espiritual, mental e física.

À minha noiva Ana Paula e à minha família por todo suporte dado neste trabalho e durante toda a trajetória do curso.

Agradeço a TDK por toda infraestrutura disponível para execução deste trabalho. Também agradeço ao meu tutor de estágio, Rafael que sempre esteve presente e aconselhou de diversas maneiras este estudo. E ao Diogo pela oportunidade de estar realizando este estudo juntamente ao trabalho.

Agradeço a prof.<sup>a</sup> Ruth Santana por todo suporte dado e o desprendimento para me orientar, ajudar e dedicar seu tempo em função deste estudo.

Agradeço ao Rodrigo Banaszkeski por auxiliar nos ensaios de confiabilidade, ao Lacor por ceder o moinho de facas, separador granulométrico e o suporte necessário para realização do trabalho.

## RESUMO

Atualmente, a reciclagem de polímeros termofixos tem sido um grande desafio para cientistas no mundo inteiro, devido as inúmeras ligações cruzadas e a impossibilidade de reprocessamento destes materiais. Neste estudo avaliou-se a aplicação de resíduo de resina epóxi para complementar o encapsulamento de capacitor de filme. O resíduo proveniente do processo de encapsulamento na fábrica foi cominuído e segregado em três diferentes granulometrias: abaixo de 1 milímetro (Amostra A), entre 1 e 2 milímetros (Amostra B), acima de 2 milímetros (Amostra C) e sem adição de resíduo (Branco), após a cura das amostras de resina epóxi sem e com a carga foram caracterizadas. O desempenho das amostras, de resíduo no capacitor, foi verificado pelo ensaio de confiabilidade de capacitores de filme, em que são avaliados perante aplicação de umidade com tensão, ciclos térmicos e tensão acima do nominal. As amostras foram avaliadas por análise visual (aparecimento de bolhas ou corpos estranhos) e variação de capacitância. Todas as amostras apresentaram desempenho similar na capacitância, porém as Amostra A e amostra Branco não apresentaram incidência de bolhas e corpos estranhos em sua superfície. Portanto, conclui-se que a granulometria ótima do resíduo incorporada na resina epóxi que apresentou melhor desempenho nas propriedades testadas foi a menor de 1 mm.

**Palavras-chave:** Capacitores de filme, Resina epóxi, Reciclagem mecânica, Encapsulamento.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	6
2. OBJETIVOS .....	8
2.1 Objetivo geral .....	8
2.2 Objetivos específicos .....	8
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3.1 Capacitor .....	9
3.2 Capacitor de filme .....	10
3.3 Encapsulamento de capacitores: materiais .....	13
3.4 Resina epóxi .....	14
3.5 Processo de cura .....	15
3.6 Reciclagem de polímeros termofixos .....	17
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	19
4.1 Materiais.....	19
4.2 Métodos .....	19
4.2.1 Preparação do resíduo de resina.....	20
4.2.2 Preparação de amostras .....	23
4.2.3 Encapsulamento do capacitor.....	23
4.3 Ensaio de confiabilidade.....	25
4.3.1 Análise visual.....	25
4.3.2 Medição elétrica (capacitância) .....	25
4.3.3 Ensaio de Vida útil com tensão contínua (VDC).....	25
4.3.4 Ensaio de calor úmido com tensão (CUT).....	26
4.3.5 Ensaio de ciclagem térmica (ECT) .....	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	28
5.1 Análise visual .....	28
5.2 Capacitância .....	29

5.3	Confiabilidade (Vida útil do capacitor).....	30
5.4	Calor úmido com tensão (CUT).....	33
5.5	Ciclagem térmica (CTE).....	36
6.	CONCLUSÕES .....	39
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	40
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

## 1. INTRODUÇÃO

As resinas termorrígidas oferecem um grande potencial de utilização em diversas áreas, porém surge um problema relacionado ao seu descarte. As propriedades destes materiais fazem atender diferentes aplicações, porém cria um novo desafio, proporcionar a destinação correta deste material de forma economicamente viável e de maneira segura. Em vários países já existem legislações ambientais regulamentando este tipo de descarte, no Brasil, foi aprovada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12305/10) [1], que busca orientar as entidades a encontrar novos métodos para tratar os materiais.

A resina epóxi é um polímero termofixo que tem sido predominantemente utilizado nos diversos setores da indústria automotiva, aeroespacial, de revestimento e construção civil, devido ao processo de cura envolvido, por apresentar propriedades mecânicas superiores a outros polímeros termofixos, baixo encolhimento, resistência ao calor, resistência química e propriedades dielétricas. Este material possui estrutura química reticulada formada por suas ligações cruzadas, que impede a fusão, o que torna difícil reciclagem, inviabilizando o reaproveitamento de materiais – pois não é possível dissolver ou reprocessar conforme outros materiais termoplásticos [2]. Na Europa, 85% dos materiais automotivos devem ser reciclados com a diretiva End-of Life Vehicle 2000/53 EC [3] e no setor automotivo, cada vez mais tem sido utilizado materiais eletrônicos com encapsulamento epóxi (exemplo: capacitores) – visto que os automóveis estão mais tecnológicos perante anos atrás, sendo assim, a reciclagem destes materiais crescerá futuramente.

A diversidade de materiais termofixos existentes no mundo, e a crescente necessidade de destinar-se estes materiais, e se possível, valorizar os resíduos existentes, proporciona a oportunidade para a criação de processos para tratamento de resíduos sólidos. Atualmente, os métodos de reaproveitamento abordam as reciclagens mecânica, energética e química, desde a simples trituração do material e utilização como carga até incineração do mesmo, aproveitando a energia quando o material é submetido a combustão. Existem estudos, para separação de fibras de carbono/resina epóxi que utilizam tratamentos de resíduos a partir da reciclagem química, esta forma busca desenvolver técnicas que não geram grande emissão de produtos ao meio

ambiente [4]. Mas este trabalho visa avaliar a reutilização de resina epóxi isenta de outros materiais.

Na indústria de capacitores de filme, a resina epóxi consiste em 70% do consumo de encapsulantes, o que gera um alto índice de falhas, visto que pode não haver mistura perfeita entre resina e endurecedor e as fases se manterem heterogêneas; também pode haver vazios gerados no processamento, entre outros. Os capacitores que apresentam falhas são direcionados a aterros, método mais economicamente viável, porém prejudicial ao meio ambiente devido à alta demanda de materiais produzidos pelo setor fabril.

A reutilização de resina epóxi, como carga em capacitores, visa recolocar este material que seria destinado a aterros nos produtos novamente, e conseqüentemente diminuir o impacto ambiental gerado por estas falhas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a influência da incorporação de resíduos pós-industrial de resina epóxi como carga, via método de reciclagem primaria em capacitores de filme.

### **2.2 Objetivos específicos**

Diminuir o consumo de resina epóxi na fábrica gerando diminuição de gastos com produtos químicos;

Determinar a melhor granulometria do resíduo de resina epóxi para reuso como carga incorporada na resina epóxi virgem.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Capacitor

O capacitor, também chamado de condensador, é um componente elétrico capaz de acumular cargas elétricas e é fundamental para qualquer circuito elétrico, assim como resistores e indutores. Ele é formado por dois condutores elétricos separados por um isolante ou dielétrico com superfícies equipotenciais conforme Figura 1, entre elas há uma diferença de potencial que pode ser obtida perante Equação 1:

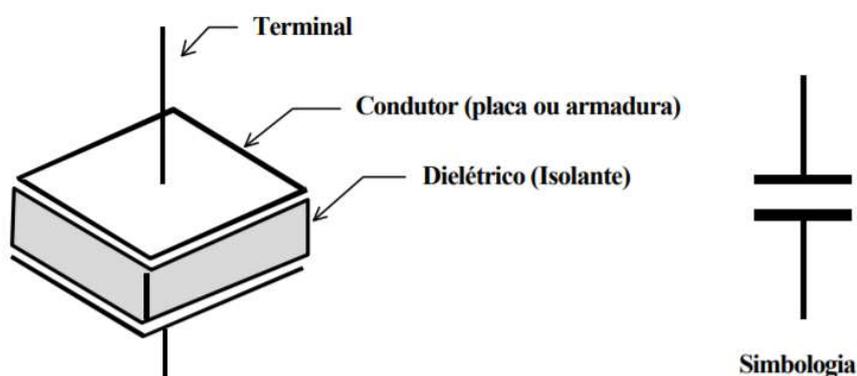


Figura 1: Elementos constituintes do capacitor e simbologia.

$$Q = C \times V \quad \text{Equação 1}$$

Onde: “Q” significa a carga diretamente proporcional a capacitância “C” e o potencial/tensão elétrica “V” que é inversamente proporcional a capacitância.

O foco neste estudo é o capacitor de placas paralelas, em que sua capacitância é definida pela Equação 2.

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad \text{Equação 2}$$

Onde “C” significa a capacitância, “ $\epsilon_0$ ” significa a permissividade do material dielétrico, “A” significa a área das placas condutoras e por fim “d” é a distância entre as placas.

Os capacitores tem por características e propriedades dependentes dos seguintes parâmetros: Capacitância, que se refere a capacidade de armazenar

energia; o fator de perdas relacionado a facilidade de circulação de cargas; a Tensão elétrica (V) está relacionada com a espessura do dielétrico; e a Resistência a isolação que é a capacidade de retenção de energia. Neste estudo, vamos nos ater a capacitância, fim principal do capacitor.

### 3.2 Capacitor de filme

Um capacitor de filme é composto por um filme dielétrico a base de polímero com espessura na faixa de micrômetros. Sobre a superfície é depositado uma camada metálica de alumínio e/ou zinco na ordem de nanômetros, por aspersão de metal a vácuo. Estes filmes são bobinados em torno de um mandril oco. Para conectar estes filmes é necessária uma metalização externa por spray (“schoopagem”), em que são realizadas nas duas extremidades a fim de conectar ambos filmes metalizados. Os filmes são bobinados em pares, com borda livre para separar as duas camadas e manter o conceito do capacitor conforme Figura 2:

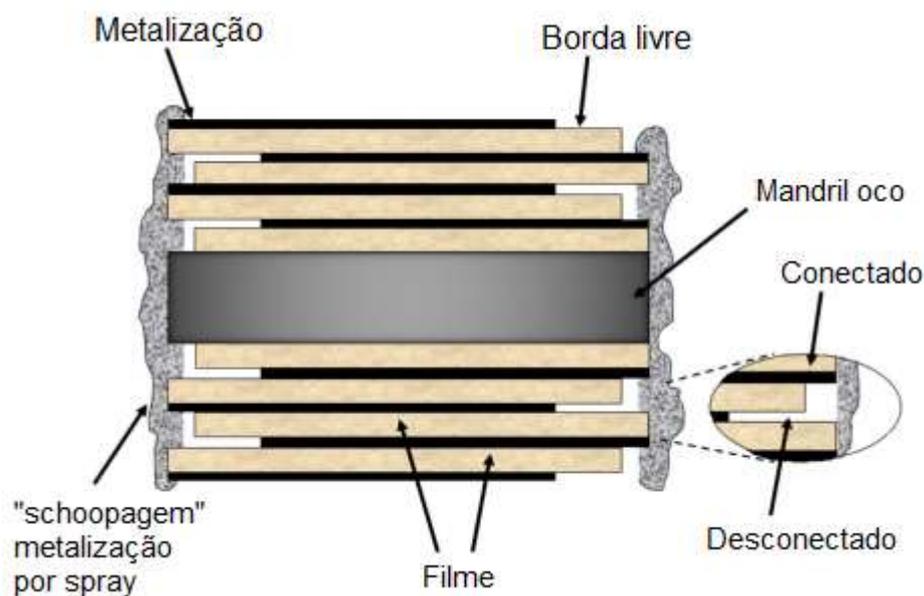


Figura 2: Esquema de construção de um capacitor de filme. [5]

Os capacitores de filme podem ser classificados pela forma de produção, dielétrico e método de acabamento.

Quanto a forma de produção, podem ser definidos por camadas (*Stacked*) conforme Figura 3 (A), neste caso as rodas são serradas e os filmes são considerados empilhados; e os denominados bobinados (*Wound*) conforme Figura 3 (B), neste caso os filmes não passam por corte. Neste estudo iremos nos ater aos capacitores bobinados.

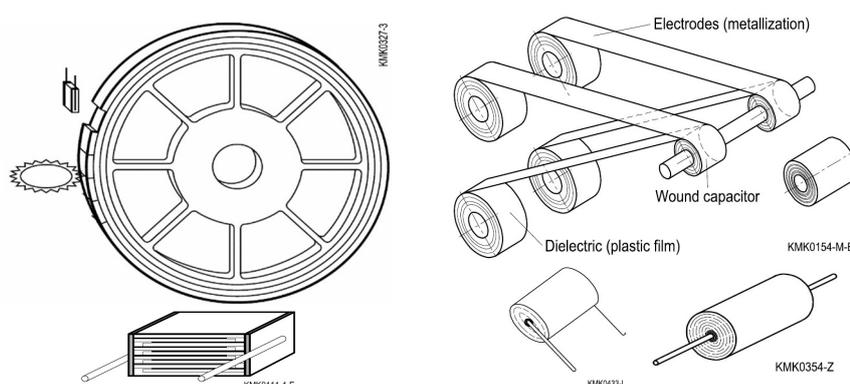


Figura 3: bobinas (A) empilhadas (*stacked*) e sem corte (*wound*).

Quanto ao dielétrico - filme plástico que é metalizado - existem 2 tipos de capacitores principais, de acordo ao tipo de material polimérico sendo o MKT (Poliéster) e MKP (Polipropileno) de acordo com as características na Tabela 1.

Parâmetro	Poli tereftalato de etileno (PET)	Polipropileno (PP)
Constante dielétrica	3.2	2.2
Fator de dissipação @ 1kHz ( $\tan \delta$ em %)	0.5	0.02
Absorção dielétrica (%)	0.2	0.05
Tolerâncias padrão do capacitor	$\pm 5\%$ ou mais normalmente $\pm 10\%$	$\pm 1\%$ ou mais normalmente $\pm 10\%$

**Tabela 1:** Comparativo entre propriedades dielétricas do PET e PP [5].

O filme de Poliéster (Tereftalato de etileno - PET) oferece uma alta constante dielétrica, uma alta rigidez dielétrica e é capaz de operar em temperaturas de até 125 °C. Sua constante dielétrica aumenta com o aumento da temperatura e da frequência. Essa variação limita o uso de PET em aplicações de eletrônica de potência, que costumam ser de frequência e temperatura relativamente altas. No entanto, o PET oferece a melhor eficiência volumétrica de todos os capacitores de filme a um custo moderado,

conseqüentemente é utilizado quando o volume é uma condição crítica. Em geral, os capacitores PET são preferíveis para aplicações DC (corrente contínua).

O filme de PP apresenta perdas dielétricas muito baixas, alta resistência de isolamento, baixa absorção dielétrica e alta rigidez dielétrica. O fator de dissipação do filme de PP muda apenas minimamente com a temperatura e a frequência, tornando-o uma ótima escolha para aplicações de eletrônica de potência. Além disso, o filme oferece excelente resistência à umidade e boa estabilidade a longo prazo. Os capacitores com filme de PP são normalmente usados em aplicações de corrente alternada e de pulso em altas frequências. A maior preocupação com os filmes de PP é que eles possuem uma temperatura máxima de operação de apenas 105 ° C. [5]

Quanto ao tipo de acabamento e terminal, podem ser definidos de maneira variadas conforme Figura 4. Os estilos podem variar de acordo com a aplicação e onde serão postos, os axiais (a) são para montagem ponto-a-ponto e através de orifícios; os de caneca plástica radial stacked com terminal em fio (b) para montagem de solda através de orifício em placas de circuito impresso; os com caneca plástica radial com terminais de solda resistentes (c) para aplicações de amortecimento e altas cargas de pulso – também chamado de Snubbers.



Figura 4: Estilos de capacitores de filme: (a) axial; (b) caneca plástica stacked com fio; (c) caneca plástica com terminal flat – Snubber.

Atualmente, os capacitores radiais são mais utilizados em comparação aos axiais. Os capacitores de caneca plástica stacked são diferenciados pela distância padrão entre os fios, podendo ter distância de 5, 7,5, 10, 15, 22,5 e

27,5mm. Já os capacitores Snubber, geralmente, utilizam terminais especiais que promovem maior resistência de solda.

Todos os capacitores com caneca plástica passam por encapsulamento com resina em suas bobinas, com a finalidade de proteger as conexões internas perante umidade e calor para garantir o tempo de vida útil do capacitor.

### **3.3 Encapsulamento de capacitores: materiais**

Os componentes eletrônicos são utilizados em variadíssimas aplicações incluindo comunicação, industrial, automotivo, militar e aeroespacial. Desta forma, devem operar em diversas condições climáticas, temperatura e umidade, sejam elas controladas ou extremas.

Estes dispositivos podem apresentar falhas quando expostos a umidade, radiação, calor ou estresse mecânico. Com isso, o encapsulante tem a função de proteger os materiais ativos dos componentes para que possa suportar as condições de aplicação para qual foi destinado, bem como ter facilidade de manuseio e montagem. Nessas aplicações, o encapsulamento visa reduzir o calor gerado, promover resistência a umidade, proteger da radiação UV e proporcionar suporte mecânico. [6]

No envasamento da resina, o dispositivo eletrônico é posicionado dentro de uma caneca e a resina líquida é despejada, cobrindo o dispositivo completamente. A resina é solidificada e a caneca torna-se parte da unidade eletrônica encapsulada. O material mais comumente utilizado é a resina epóxi. Os materiais poliméricos tem vantagens perante metais e cerâmicos, como: menor custo para produção e menor massa.

Em geral, os encapsulantes são materiais poliméricos termofixos, pois podem ser utilizados em condições de baixas temperaturas e alta umidade, bem como não alterar suas propriedades de acordo com a variação brusca de temperatura. Em contrapartida os termoplásticos são raramente usados, pois seu processamento requer alta temperatura e pressão. Além disso, o derretimento do material termoplástico pode prejudicar o desempenho dos capacitores se a temperatura de fusão for muito elevada, pois os materiais

poliméricos termoplásticos podem apresentar impurezas e contaminar a camada de filme do capacitor, ocasionando corrosão e perda de performance. Já os elastômeros são polímeros alternativos, deformáveis e macios devido a  $T_g$  (temperatura de transição vítrea) ser menor que a temperatura ambiente, porém apresenta limitações de uso devido à baixa pureza e deformabilidade.

A resina epóxi é a que fornece melhores propriedades contra umidade, isolamento de calor, resistência mecânica, entre outros. Dessa forma, ela se sobressai perante as outras resinas e é a mais utilizada para encapsulamento de componentes, entretanto, o valor de consumo é alto. Para o capacitor ser competitivo perante o mercado, é necessário um balanço entre custo versus qualidade. E a redução de resina epóxi para encapsular o material é um motivo de estudo.

### 3.4 Resina epóxi

A resina epóxi é um polímero termofixo que é endurecido quando misturado com um agente catalisador/endurecedor. São definidas a partir do aparecimento de um grupo epoxídico, conforme Figura 5.

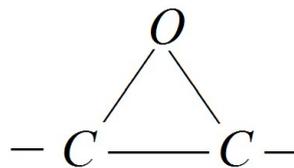


Figura 5: Estrutura molecular do epóxi. [7]

Epóxi é um componente sintético formado pela reação de epicloridrina com o Bisfenol A. As 2 moléculas são mostradas na Figura 6, que quando reagem, na presença do catalisador, formam o composto DGEBA (diglicidil éter de bisfenol A), um dos principais componentes da resina epóxi.

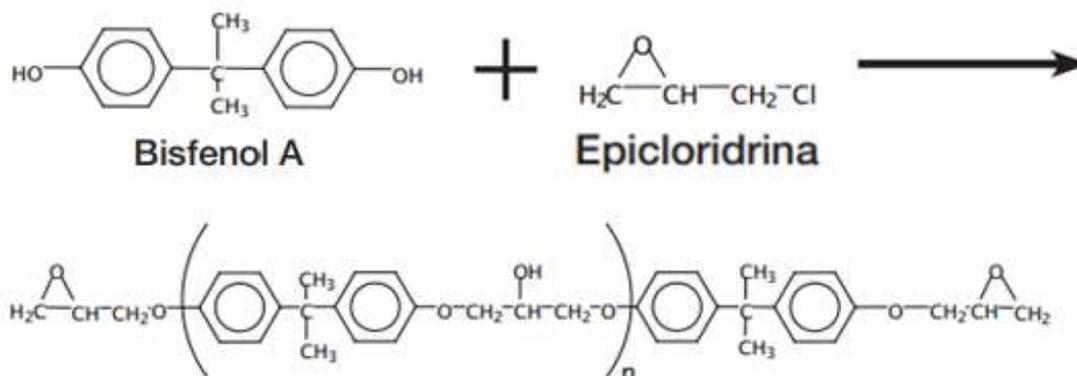


Figura 6: Formação e estrutura química do DGEBA. [8]

Suas propriedades dependem dos tipos de resinas e endurecedores utilizados, porém, apresentam excelentes propriedades mecânicas, boa adesividade sobre diversos substratos, boa resistência térmica e química, desta forma são utilizados para aplicações e revestimentos de alto desempenho.

O agente de cura utilizado é o anidrido, apesar de existir uma infinidade de catalisadores, isto devido às excelentes propriedades elétricas e físicas, pois possui um longo de *pot life* - tempo de vida útil da mistura até que a viscosidade atinja duas vezes sua viscosidade inicial.

Uma problemática da resina epóxi é a presença de Bisfenol A em sua composição, este componente quando destinado a locais impróprios causa problemas ambientais quando estiver na fase líquida [9]. Desta forma, a cura da resina é primordial para que este componente não afete ecossistemas e reservatórios.

### 3.5 Processo de cura

A cura da resina epóxi é um processo complexo que contém mudanças irreversíveis, por causa da reação química, gerada pela reação exotérmica proveniente da interação entre resina e endurecedor, que acontece para que as moléculas sejam formadas. O endurecedor é um polímero de baixo peso molecular com grupo terminal amina e a resina é um polímero terminado por epóxido, os dois componentes são misturados antes da aplicação.

Este processo possui 4 etapas, inicialmente indução e finalmente cura completa, porém, dentro do processo de cura existem dois fatores macroscópicos importantes, conforme Figura 7, gelificação e vitrificação. A gelificação é quando não tem mais controle da reação, começa o comportamento viscoelástico do fluido, pois está relacionado com a transição do estado líquido para “borrachoso”, devido à reticulação das ligações covalentes no processo de cura. O ponto de gel é quando a viscosidade que era constante, passa a aumentar de maneira exponencial, após esse ponto a resina não se dissolve mais.

A vitrificação é após o processo de gelificação, em que o estado de borracha/líquido passa a ser um estado vítreo, por causa do emaranhamento das cadeias. O ponto de vitrificação é quando o material começa a solidificar e as reações química cessam, a qual só resta a difusão até a cura completa.

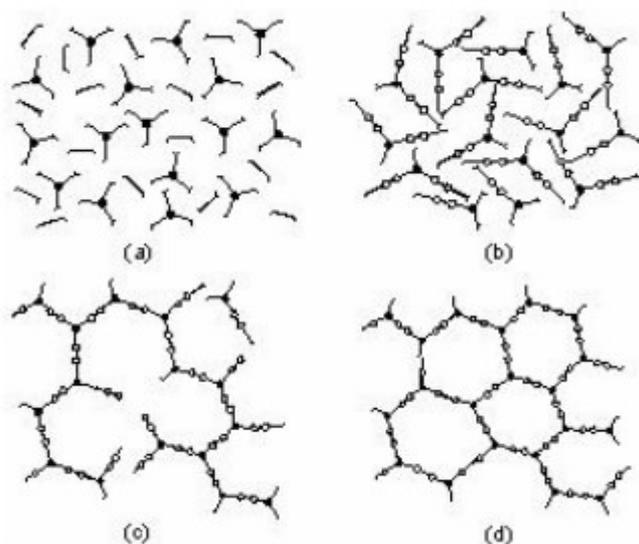


Figura 7: Estágios de cura para resina epóxi: (a) indução; (b) gelificação; (c) vitrificação e (d) cura completa. [10]

Os capacitores Snubbers passam por 2 processos de envasamento de resina, o primeiro para diminuir a incidência de vazios entre caneca e bobina, e o segundo para aumentar a camada de resina sobre a bobina, a fim de evitar a entrada de umidade na peça quando exposta ao ambiente. As peças passam por aquecimento em fornos para garantir a cura da resina e também para acelerar o processo de produção.

Após o processo de envasamento e cura do material, sempre é gerado resíduo que necessariamente é descartado (aterros) ou incinerado para geração de energia. Neste estudo, é verificado a reciclagem mecânica do resíduo de resina epóxi aplicada nos produtos encapsulados pela mesma matéria-prima, como fonte alternativa para destinação deste polímero termofixo.

### **3.6 Reciclagem de polímeros termofixos**

Os materiais poliméricos termofixos apresentam estrutura molecular reticulada com ligações cruzadas. Uma vez curado este material não pode ser reprocessado em um novo formato. São materiais resistentes e capazes de suportar altas temperaturas e frequentemente aditivados com retardante de chama e, na maioria dos casos, reforços de fibra de vidro.

Um dos maiores problemas na reciclagem de polímeros termofixos é a mistura de componentes, tanto em camadas quanto reforço, isto inviabiliza a reutilização e reciclagem, visto que a mistura torna os componentes inseparáveis.

A reciclagem dos materiais poliméricos pode ser classificada por quatro maneiras: primária, secundária, terciária e quaternária [11]. A reciclagem mecânica abrange a primária e a secundária, a diferença consiste na origem do resíduo. Basicamente, a reciclagem mecânica é tornar o resíduo polimérico em grânulos para ser reutilizada em outra aplicação, carga ou outros processos e produtos que utilizam resina termofixa.

Reciclagem primária é a recuperação de resíduos efetuada na própria indústria geradora. A secundária é a conversão de resíduos descartados no lixo [11]. A terciária se trata da reciclagem química, ou seja, decomposição dos resíduos por processos químicos ou térmicos. A reciclagem quaternária é a reciclagem energética, a qual o resíduo polimérico é destruído por combustão para geração de energia. A reciclagem quaternária é diferente da incineração, porque utiliza os resíduos como combustível, enquanto a incineração não aproveita.

A reciclagem primária, foco deste estudo, é a forma mais simples e de menor investimento, pois somente é necessário a segregação e trituração do material moído. Os métodos de reciclagem dos polímeros termofixos são os mesmos usados para polímeros termoplásticos, com a diferença de reprocessamento facilitado e volume reciclados bem maiores [12].

As etapas da reciclagem mecânica são: separação do resíduo polimérico, moagem, lavagem (se necessário), secagem (se necessário), reprocessamento (apenas para polímeros termoplásticos) e transformação do grânulo em produto final [13]. Os equipamentos mais utilizados para este fim, são: trituradores, e moinhos, de bolas ou de facas.

## 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1 Materiais

No presente trabalho, foram usadas a resina epóxi virgem e o resíduo pós-industrial de resina epóxi proveniente do encapsulamento de capacitores para fazer envasamento e preenchimento do mesmo. A resina é formulada a base de diglicidil éter de bisfenol-A (DGEBA) com 10% de polipropilenoglicol e com pigmento de coloração azul, a viscosidade é 2.000 mPa.s, densidade 1,16 g/cm<sup>3</sup> a 25°C, cedida pela empresa TDK Electronics do Brasil Ltda.

Foi utilizado o capacitor de filme de polipropileno (MKP) metalizado com zinco e alumínio com caneca plástica de PBT com 30% de fibra de vidro conforme Figura 8. Capacitor com capacitância de 2000 nF e tensão 1600V, com dimensões 28mm x 44 x 54mm, utilizado para aplicações especiais não automotivas, fabricado pela empresa TDK Electronics do Brasil Ltda.

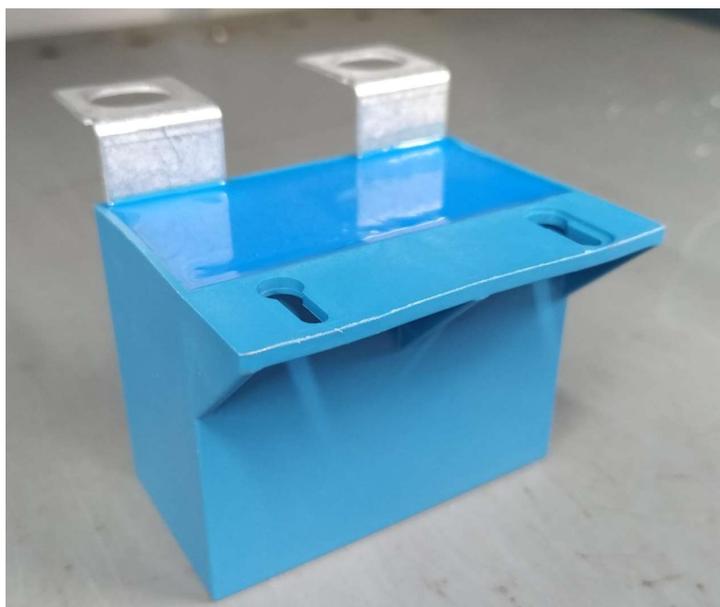


Figura 8: capacitor montado (referência) sem adição de resina moída.

### 4.2 Métodos

A metodologia adotada para este estudo foi conforme fluxograma da Figura 9. A partir da coleta do resíduo de resina epóxi da fábrica, a mesma foi posta em moldes para submeter a cura, cominuição e posteriormente separação granulométrica. Após separação do resíduo, o mesmo foi aplicado no produto e avaliado sua aprovação nos ensaios de calor úmido com tensão (CUT), ensaio

de ciclagem térmica (ECT) e ensaio de vida (VDC) Os capacitores foram caracterizados pela medida de capacitância e o grau de bolhas na superfície. Nos próximos capítulos serão apresentados os detalhes de cada ensaio.

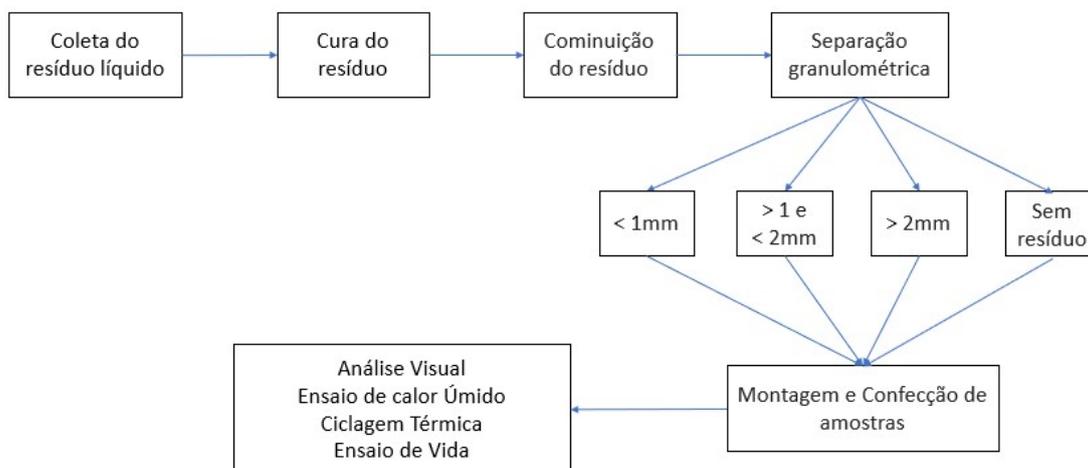


Figura 9: Fluxograma da metodologia aplicada.

#### 4.2.1 Preparação do resíduo de resina

O resíduo de resina foi envasado em moldes de silicone de  $\varnothing 50\text{mm}$  – Figura 10, a partir da mistura do componente epóxi com o endurecedor/agente de cura na proporção mássica conforme o fabricante indica. A proporção utilizada para o sistema a base de anidrido foi de 100 para 30 partes por massa de resina e agente de cura, respectivamente.

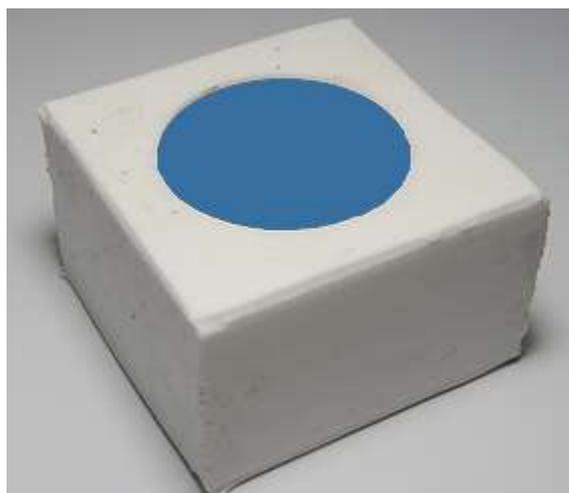


Figura 10: molde de silicone com resíduo de resina não curada.

Estes resíduos de resina foram aquecidos por 1 hora e 30 minutos na condição de  $100^{\circ}\text{C}$  na estufa Multitec 34124, até a cura completa do polímero.

Após a coleta de amostras, a resina curada passou pelo moinho de facas, cedido pelo Lacor, conforme Figura 11, marca Retsch modelo SM300.



Figura 11: Moinho de facas da marca Retsch, modelo SM300.

No moinho de facas com rotação de 900 RPM, o resíduo de resina epóxi foi cominuído e peneirado, primeiramente, passando por uma malha grosseira 5mm (Figura 12-A), o material segregado foi dividido metade em resíduo grosseiro e outra metade foi submetida uma malha mais fina 1mm (Figura 12-B). Após isto, o material moído foi segregado em 3 diferentes granulometrias por uma peneira, conforme Tabela 2, utilizando as malhas: MESH #1mm e #2mm, também cedida pelo Lacor. Na Figura 13 está segregado as 3 diferentes granulometrias.

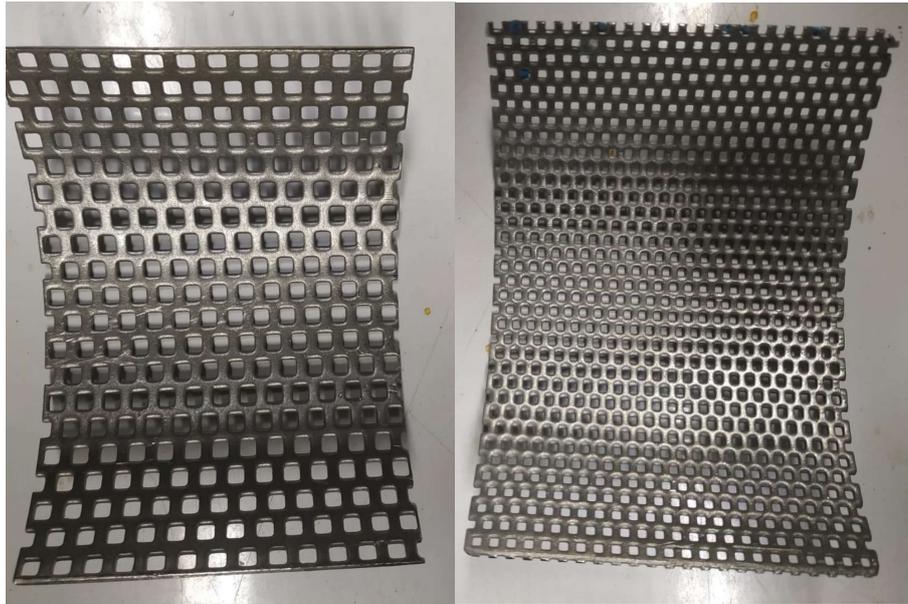


Figura 12: Malha de 5mm (A) e malha de 1mm (B).

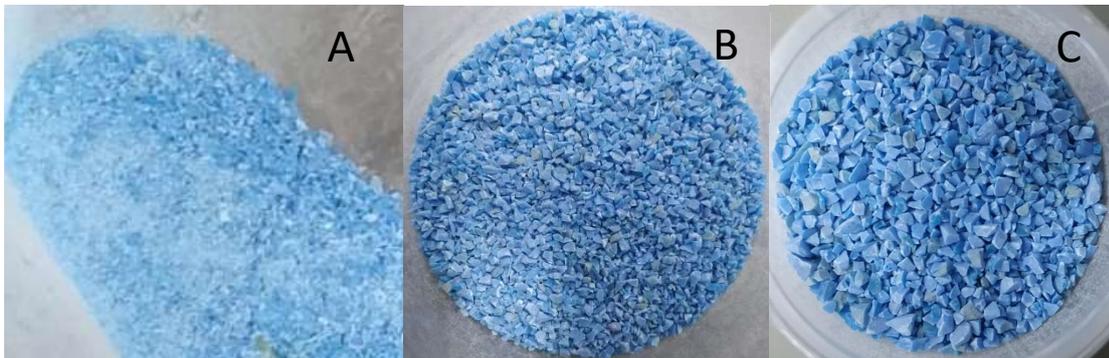


Figura 13: Resíduo de resina epóxi cominuído (A)  $< 1\text{mm}$ ; (B)  $> 1\text{mm}$  e  $< 2\text{mm}$  e (C)  $> 2\text{mm}$ .

**Tabela 2:** Especificação das amostras.

Amostras	Granulometria
A	$< 1\text{mm}$
B	$> 1\text{mm}$ e $< 2\text{mm}$
C	$> 2\text{mm}$
Branco	-

#### **4.2.2 Preparação de amostras**

Os capacitores de especificação 2000nF de capacitância; tensão 1600V com filme de polipropileno (MKP) foram produzidos conforme ordem de produção padrão da fábrica e no encapsulamento foram adicionadas diferentes granulometrias na caneca manualmente. Nos capacitores foram utilizadas, 20% de resíduo – equivalente a 3,5g – e 80% de resina virgem.

#### **4.2.3 Encapsulamento do capacitor**

O enchimento de resina no capacitor é feito através de duas etapas, conforme figura 14, uma até preencher a bobina e outra para deixar a superfície isenta de bolhas. Foi colocado 3,5 gramas de resíduo de resina entre o primeiro enchimento e o segundo, o que não aparentou irregularidades superficiais, visto que o grânulo permanece decantado na resina líquida.

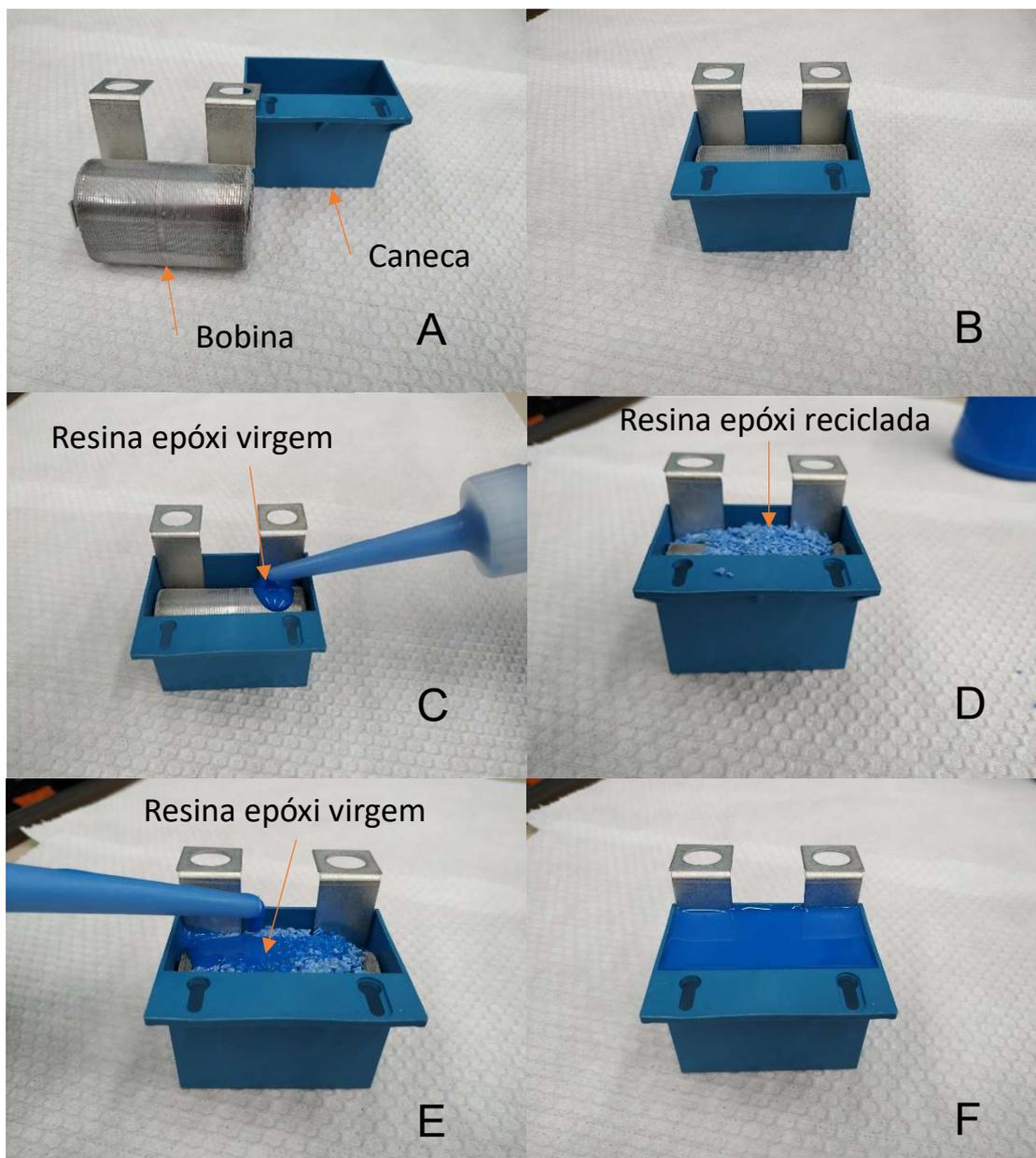


Figura 14: Etapas de montagem do capacitor, Amostra B. (A) Componentes do capacitor; (B) Montagem dos componentes; (C) Primeiro enchimento com resina epóxi virgem; (D) Inserção de resíduo de resina epóxi sobre a bobina; (E) Segundo enchimento de resina epóxi virgem; (F) Encapsulamento final do capacitor

Após a montagem das amostras, os capacitores foram submetidos a alguns ensaios de confiabilidade que certificam e aprovam qualquer alteração de resina.

### 4.3 Ensaios de confiabilidade

#### 4.3.1 Análise visual

Para avaliar as diferentes condições de cura da resina moída no produto, foi realizada uma análise visual da superfície das amostras, verificando a formação de bolhas ou corpos estranhos. Foram montados ao total 21 capacitores de cada amostra e 12 capacitores da amostra referência.

#### 4.3.2 Medição elétrica (capacitância)

Os capacitores foram protocolados conforme capacitância através do equipamento Ponte Wayne Kerr – Figura 15, modelo 6440B na frequência de 1kHz. As medições foram realizadas no início e após o ensaio para verificar o seu desempenho.



Figura 15: ponte de capacitância

#### 4.3.3 Ensaio de Vida útil com tensão contínua (VDC)

Este ensaio visa avaliar a performance do capacitor com a aplicação de 1,25 vezes a tensão nominal do capacitor com temperatura elevada. As amostras de capacitores foram submetidas a condição de 85°C, tensão de 2000V (DC) por 2000 horas, isto equivale a 84 dias inserida dentro da câmara climática que mantém a temperatura controlada durante todo o ensaio, Fonte de tensão FUG, conforme Figura 16(A) e estufa Multitec 34124 conforme Figura 16(B). O teste

foi realizado conforme norma IEC 60384-14:2013 utilizando 25 peças, 8 peças das amostras A, B e C e 4 peças da Branco.



Figura 16: (A) Fonte de tensão (B) Estufa Multitec

#### 4.3.4 Ensaio de calor úmido com tensão (CUT)

Este ensaio visa avaliar a performance do capacitor com a umidade, as amostras foram submetidos a condição de 40°C e 93% de umidade relativa energizados 1600V (DC) por 1000 horas, isto equivale a 42 dias imbuída em uma câmara climática, que mantém umidade e temperatura controlada, Tenney, modelo Benchmaster 4 (Figura 17). O teste foi realizado conforme norma IEC 60384-14:2013 utilizando 25 peças, 7 peças das amostras B e C e 4 da amostra sem resíduo.

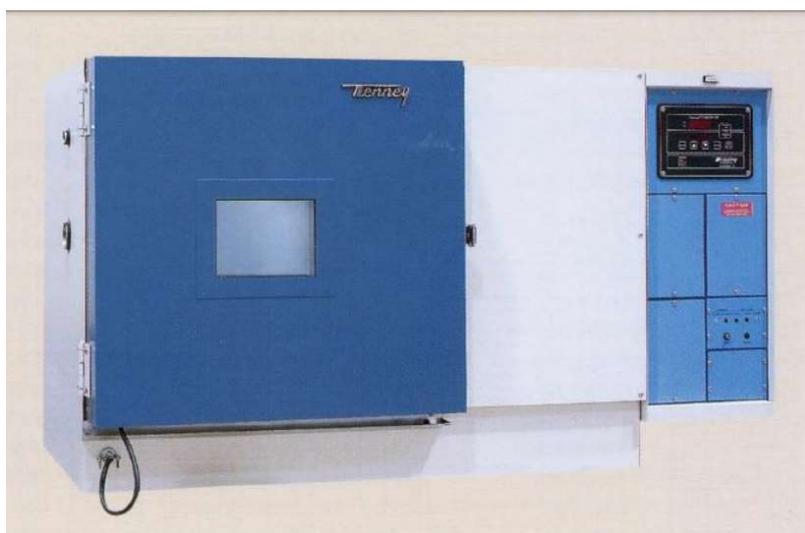


Figura 17: Câmara climática para ensaio de calor úmido.

#### 4.3.5 Ensaio de ciclagem térmica (ECT)

Este ensaio visa avaliar a performance do capacitor com a variação térmica, as amostras foram submetidas a condição de ciclagem térmica em uma câmara climática Thermotron, modelo ATSS-80-6-6 (Figura 18), a temperaturas de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $85^{\circ}\text{C}$  em 5 ciclos de 30 min em cada temperatura, conforme o procedimento da norma IEC 60384-14:2013 utilizando-se 7 amostras de cada amostra A, B e C e 4 amostras da amostra branco.

Esta câmara climática possui duas câmaras, a inferior possui temperatura negativa e outra fica na temperatura positiva, ambas estabilizadas. Os capacitores são dispostos em um elevador interno que ao completar o tempo previsto eleva ou abaixa-os realizando de forma cíclica.



Figura 18: Câmara climática para ensaio de ciclagem térmica.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma vantagem de utilizar o resíduo de resina epóxi, aplicada em capacitores, é trazer um benefício chamado de economia circular, além de não gerar e espalhar Bisfenol A no sistema na fase líquida – componente considerado cancerígeno e perigoso ao meio ambiente.

A utilização da economia circular visa reduzir o desperdício ao mínimo e aumentar o reaproveitamento e reciclagem dos materiais [14]. Dessa forma, após a cura do resíduo e inserção no encapsulamento de capacitores foram submetidos a testes elétricos específicos.

Os capacitores passaram por análise visual, tempo de vida útil do capacitor, calor com umidade e ciclagem térmica para verificar o desempenho destes capacitores frente a inserção de resíduo pós-industrial.

### 5.1 Análise visual

Os principais fatores de perda de performance em capacitores são os vazios gerados pelo mau encapsulamento, impurezas, partículas e irregularidades químicas [15]. Desta forma, foi verificado a presença de bolhas de todas as peças e também a aparência da própria resina moída na superfície do capacitor.

Primeiramente, nenhuma amostra apresentou bolhas aparentes na superfície do capacitor. As amostras B e C, que apresentam maior granulometria, obtiveram resíduos de resina expostos na superfície, conforme Figura 19. Esta falha se deve ao mau espalhamento do pó no momento do preenchimento. A amostra B apresentou 2 capacitores de 21 com este problema, já a amostra C apresentou 4 de 21. As demais amostras não tiveram corpos estranhos na superfície.

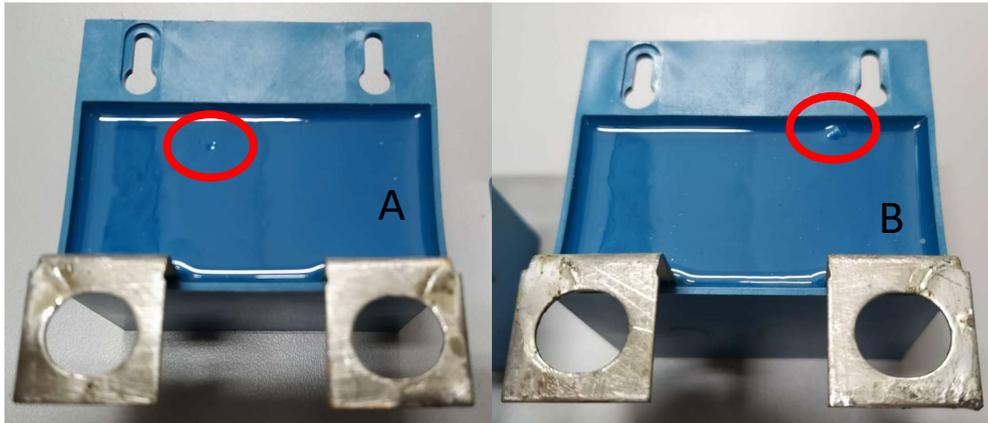


Figura 19: (A) Resíduo em pó aparente na amostra B e (B) Resíduo em pó aparente na amostra C.

## 5.2 Capacitância

Todas as amostras após serem montadas passaram por medições elétricas iniciais para verificação de capacitância, conforme Tabela 3. Todas as amostras tiveram valores próximos ao valor nominal 2000 nF e dentro da tolerância prevista no capacitor –  $\pm 5\%$  de sua capacitância nominal

**Tabela 3:** Medições de capacitância após preenchimento das amostras.

N° Peças	Amostra A - Resina >1mm		Amostra B - Resina < 2 e > 1mm		Amostra C - Resina > 2mm		Amostra Referência	
	1 kHz Cap (nF)	dC/Cn (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Cn (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Cn (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Cn (%)
1	1986,08	-0,70%	1997,32	-0,13%	1994,06	-0,30%	1981,42	-0,93%
2	1995,34	-0,23%	2000,02	0,00%	1997,46	-0,13%	1983,02	-0,85%
3	1989,88	-0,51%	1991,14	-0,44%	1995,28	-0,24%	1984,04	-0,80%
4	1987,28	-0,64%	1987,60	-0,62%	1996,16	-0,19%	1993,90	-0,31%
5	1984,24	-0,79%	1984,58	-0,77%	1982,42	-0,88%	1984,60	-0,77%
6	1984,94	-0,75%	1999,10	-0,04%	1987,26	-0,64%	1994,14	-0,29%
7	1996,82	-0,16%	1994,00	-0,30%	1990,62	-0,47%	1996,80	-0,16%
8	1992,70	-0,36%	1994,10	-0,29%	1990,54	-0,47%	1994,20	-0,29%
9	1996,84	-0,16%	1994,02	-0,30%	1988,98	-0,55%	1995,44	-0,23%
10	1991,76	-0,41%	1985,62	-0,72%	1994,62	-0,27%	1990,34	-0,48%
11	1990,90	-0,46%	1991,10	-0,45%	1993,62	-0,32%	2000,14	0,01%
12	1992,34	-0,38%	1995,62	-0,22%	1989,32	-0,53%	1985,34	-0,73%
13	1995,56	-0,22%	1990,46	-0,48%	1992,36	-0,38%		
14	1989,64	-0,52%	1995,46	-0,23%	1986,16	-0,69%		
15	1996,34	-0,18%	1991,62	-0,42%	1989,36	-0,53%		
16	1991,84	-0,41%	2000,76	0,04%	1983,78	-0,81%		
17	1999,58	-0,02%	1993,68	-0,32%	1986,40	-0,68%		
18	1990,14	-0,49%	1982,36	-0,88%	1990,24	-0,49%		
19	2001,22	0,06%	1993,82	-0,31%	1989,20	-0,54%		
20	1987,40	-0,63%	1985,02	-0,75%	1981,90	-0,91%		
21	1990,90	-0,46%	1984,76	-0,76%	1990,84	-0,46%		
Máx.:	2001,22	0,06%	2000,76	0,04%	1997,46	-0,13%	2000,14	0,01%
Méd.:	1991,99	-0,40%	1992,01	-0,40%	1990,03	-0,50%	1990,28	-0,49%
Mín.:	1984,24	-0,79%	1982,36	-0,88%	1981,90	-0,91%	1981,42	-0,93%

### 5.3 Confiabilidade (Vida útil do capacitor)

A variação média para os capacitores encapsulados com resíduo de resina e amostra sem resíduo estão demonstrados na Figura 20, baseados na tabela 4.

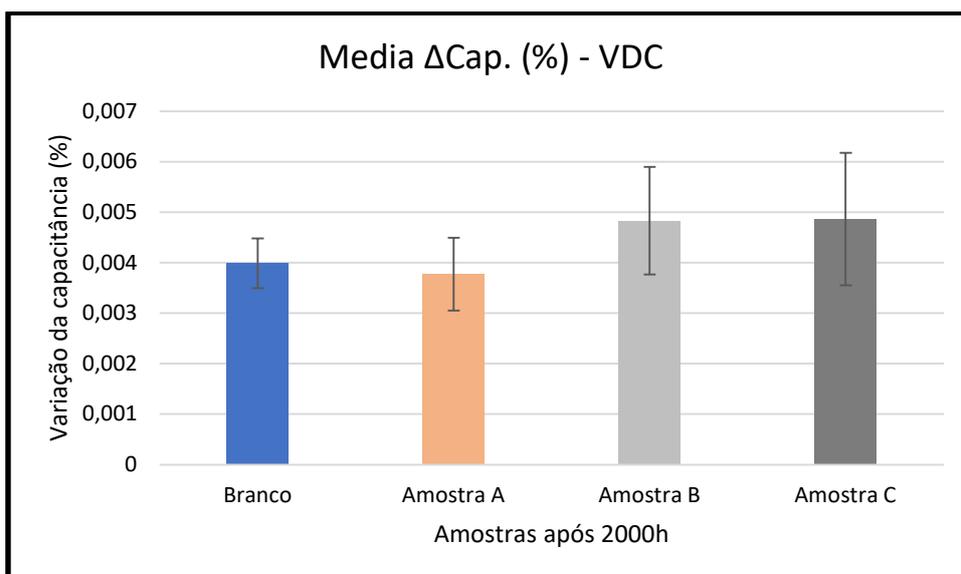


Figura 20: Resultado da variação média de capacitância das amostras no ensaio de vida.

**Tabela 4:** Medição antes, medição intermediária e medição final em 2000 horas de ensaio.

Medição inicial - Versão A Resina em pó			Medição após 1000 horas - Versão A Resina em pó		Medição final após 2000 horas - Versão A Resina em pó	
N° Peças	1 kHz Cap (nF)	dC/Cn (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Ci (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Ci (%)
1	1996,34	-0,18%	2003,08	0,34%	2003,48	0,36%
2	1991,84	-0,41%	1998,48	0,33%	1998,66	0,34%
3	1999,58	-0,02%	2006,86	0,36%	2007,00	0,37%
4	1990,14	-0,49%	1999,48	0,47%	2000,40	0,52%
5	2001,22	0,06%	2007,06	0,29%	2007,00	0,29%
6	1987,40	-0,63%	1994,28	0,35%	1994,28	0,35%
7	1990,90	-0,46%	1999,18	0,42%	1999,26	0,42%
Medição inicial - Versão B Resina em 1mm			Medição após 1000 horas - Versão B Resina em 1mm		Medição final após 2000 horas - Versão B Resina em 1mm	
N° Peças	1 kHz Cap (nF)	dC/Cn (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Ci (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Ci (%)
8	1991,62	-0,42%	2000,84	0,46%	2000,98	0,47%
9	2000,76	0,04%	2008,68	0,40%	2008,68	0,40%
10	1993,68	-0,32%	2001,10	0,37%	2001,98	0,42%
11	1982,36	-0,88%	1993,82	0,58%	1994,44	0,61%
12	1993,82	-0,31%	2005,60	0,59%	2006,30	0,63%
13	1985,02	-0,75%	1994,62	0,48%	1995,28	0,52%
14	1984,76	-0,76%	1991,34	0,33%	1991,66	0,35%

Medição inicial - Versão C Resina em 2mm			Medição após 1000 horas - Versão C Resina em 2mm		Medição final após 2000 horas - Versão C Resina em 2mm	
N° Peças	1 kHz Cap (nF)	dC/Cn (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Ci (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Ci (%)
15	1989,36	-0,53%	1996,90	0,38%	1997,40	0,40%
16	1983,78	-0,81%	1993,06	0,47%	1993,32	0,48%
17	1986,40	-0,68%	1995,10	0,44%	1994,94	0,43%
18	1990,24	-0,49%	1998,38	0,41%	1998,52	0,42%
19	1989,20	-0,54%	2004,08	0,75%	2004,50	0,77%
20	1981,90	-0,91%	1989,88	0,40%	1989,78	0,40%
21	1990,84	-0,46%	2000,82	0,50%	2000,96	0,51%
Medição inicial - Branco			Medição após 1000 horas - Branco		Medição final após 2000 horas - Branco	
N° Peças	1 kHz Cap (nF)	dC/Cn (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Ci (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Ci (%)
22	1995,44	-0,23%	2005,02	0,48%	2004,82	0,47%
23	1990,34	-0,48%	1998,46	0,41%	1998,18	0,39%
24	2000,14	0,01%	2007,52	0,37%	2007,32	0,36%
25	1985,34	-0,73%	1992,80	0,38%	1992,76	0,37%

Este é o ensaio mais rigoroso que os capacitores são aplicados, pois a tensão utilizada é 1,25 vezes seu valor nominal, inclusive com aplicação de temperatura. Este ensaio degrada a resina epóxi e a perda de capacitância está inerente a corrosão do filme metalizado e a degradação do filme dielétrico [16].

A perda de capacitância também está relacionada com o tempo de exposição a qual o capacitor está submetido, seja por umidade ou por corrosão [17]. Porém, os resultados demonstram ganho de capacitância, o que poderia ser contraditório.

O capacitor Snubber, conforme Figura 8, ele possui uma bobina grande que é prensada antes de ser encapsulada. Com aplicação de tensão elétrica constante e temperatura, esta bobina tende a ser contraída, devido ao aquecimento das moléculas do filme dielétrico e conseqüentemente, encolhimento da bobina. Esta contração, diminui a distância das placas paralelas e com isso existe um ganho de capacitância, conforme Equação 2. Apesar da corrosão do filme, ganho de umidade, o fato de diminuir a distância entre as placas faz com que a variação de capacitância seja positiva.

Como a diferença de variação de capacitância entre amostras é praticamente nula, é verificado que a utilização de resina epóxi como carga, independentemente do tamanho, não surte efeito na performance do capacitor.

Apesar do ganho de capacitância todas as amostras aprovaram, pois o limite de aprovação é  $\pm 5\%$  de sua capacitância nominal.

#### 5.4 Calor úmido com tensão (CUT)

A variação média para os capacitores encapsulados com resíduo de resina e amostra branco estão demonstrados na Figura 21, baseados nos valores da Tabela 5.

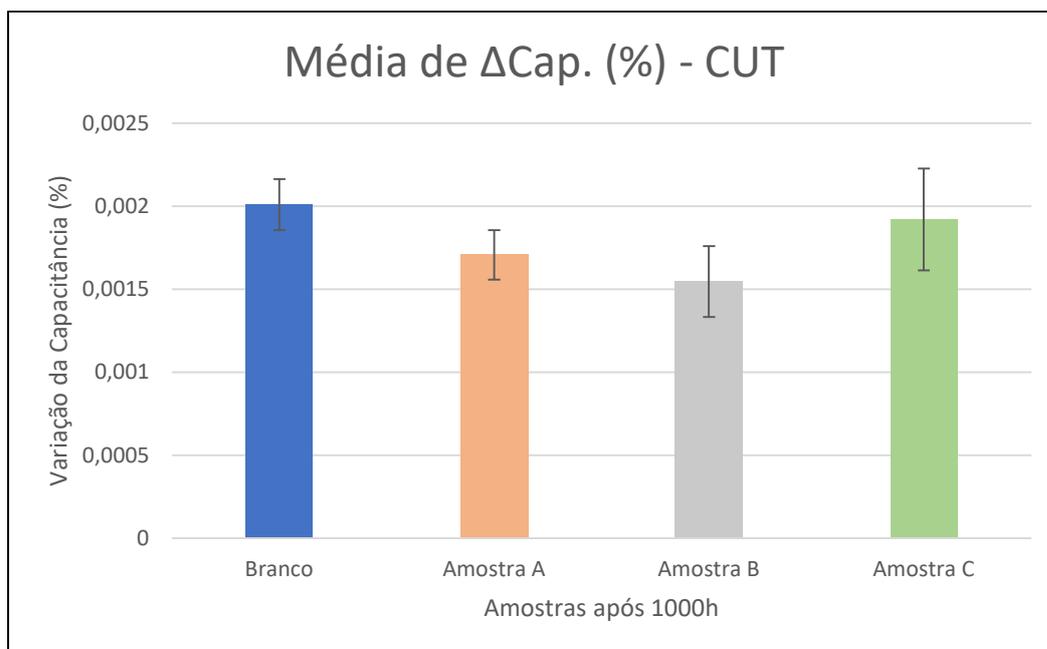


Figura 21: Resultado da variação média de capacitância das amostras no ensaio de calor úmido com tensão.

**Tabela 5:** Medições antes e após o ensaio de calor úmido por 1000 horas.

Medição inicial - Versão A Resina em pó			Medição após 1000 horas - Versão A Resina em pó	
Inicial			1000h	
N° Peças	1 kHz Cap (nF)	dC/Cn (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Ci (%)
1	1992,70	-0,36%	1996,04	0,17%
2	1996,84	-0,16%	2000,30	0,17%
3	1991,76	-0,41%	1995,58	0,19%
4	1990,90	-0,46%	1994,58	0,18%
5	1992,34	-0,38%	1995,40	0,15%
6	1995,56	-0,22%	1998,58	0,15%
7	1989,64	-0,52%	1993,08	0,17%
Medição inicial - Versão B Resina em 1mm			Medição após 1000 horas - Versão B Resina em 1mm	
N° Peças	1 kHz Cap (nF)	dC/Cn (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Ci (%)
8	1994,10	-0,29%	1996,64	0,13%
9	1994,02	-0,30%	1997,08	0,15%
10	1985,62	-0,72%	1989,44	0,19%
11	1991,10	-0,45%	1993,78	0,13%
12	1995,62	-0,22%	1998,62	0,15%
13	1990,46	-0,48%	1993,60	0,16%
14	1995,46	-0,23%	1998,78	0,17%
Medição inicial - Versão C Resina em 2mm			Medição após 1000 horas - Versão C Resina em 2mm	
N° Peças	1 kHz Cap (nF)	dC/Cn (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Ci (%)
15	1990,54	-0,47%	1993,60	0,15%
16	1988,98	-0,55%	1992,02	0,15%
17	1994,62	-0,27%	1998,64	0,20%
18	1993,62	-0,32%	1997,20	0,18%
19	1989,32	-0,53%	1993,90	0,23%
20	1992,36	-0,38%	1996,50	0,21%
21	1986,16	-0,69%	1990,50	0,22%
Medição inicial - Branco			Medição após 1000 horas - Branco	
N° Peças	1 kHz Cap (nF)	dC/Cn (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Ci (%)
22	1984,60	-0,77%	1988,28	0,19%
23	1994,14	-0,29%	1997,94	0,19%
24	1996,80	-0,16%	2001,00	0,21%
25	1994,20	-0,29%	1998,54	0,22%

É possível observar na Figura 21, que a variação de capacitância aumenta em todas as amostras. Este aumento de capacitância, também, está associado a diminuição da distância entre placas paralelas. Teoricamente, este ensaio visa degradar o filme dielétrico, juntamente com a corrosão do filme metalizado. Nestas amostras, o filme dielétrico trata-se de um polímero de polipropileno, com característica apolar e apresenta menor higroscopicidade, em comparação com o filme de PET, por causa da baixa absorção dielétrica do PP, conforme mostrada na Tabela 1. [5]

A resina epóxi também é influenciada pela questão da umidade, pois com o aumento de umidade no sistema, a mobilidade das cadeias da resina epóxi, também aumenta, quando ela está na fase líquida, não curada. Neste caso durante o aquecimento e ao longo do tempo as interações moleculares - principalmente ligações de hidrogênio com cadeias polares da resina epóxi - fazem com que as ligações sejam enfraquecidas e as cadeias de epóxi sejam ligeiramente separadas [18].

Apesar do processo de reticulação (cura) da resina epóxi, a inserção de cargas da mesma resina, na escala milimétrica, dificulta a entrada de umidade, visto que uma barreira é criada para inibir a passagem de água. Isto acontece, porque no estado vítreo as cadeias moleculares apresentam apenas movimentos e vibrações locais. Como resultado, as barreiras energéticas dentro da estrutura são mais fortes, e é possível considerar que a entrada de umidade é controlada [18]. Se a resina epóxi estivesse em um estado borrachoso aumentaria ainda mais a entrada de umidade, dessa forma a resina precisa estar plenamente curada para melhor performance do capacitor.

Todas as amostras foram aprovadas por estarem dentro do limite de  $\pm 5\%$  de sua capacitância nominal.

## 5.5 Ciclagem térmica (CTE)

A variação média para os capacitores encapsulados com resíduo de resina e amostra branco estão demonstrados na Figura 22, baseado na Tabela 6.

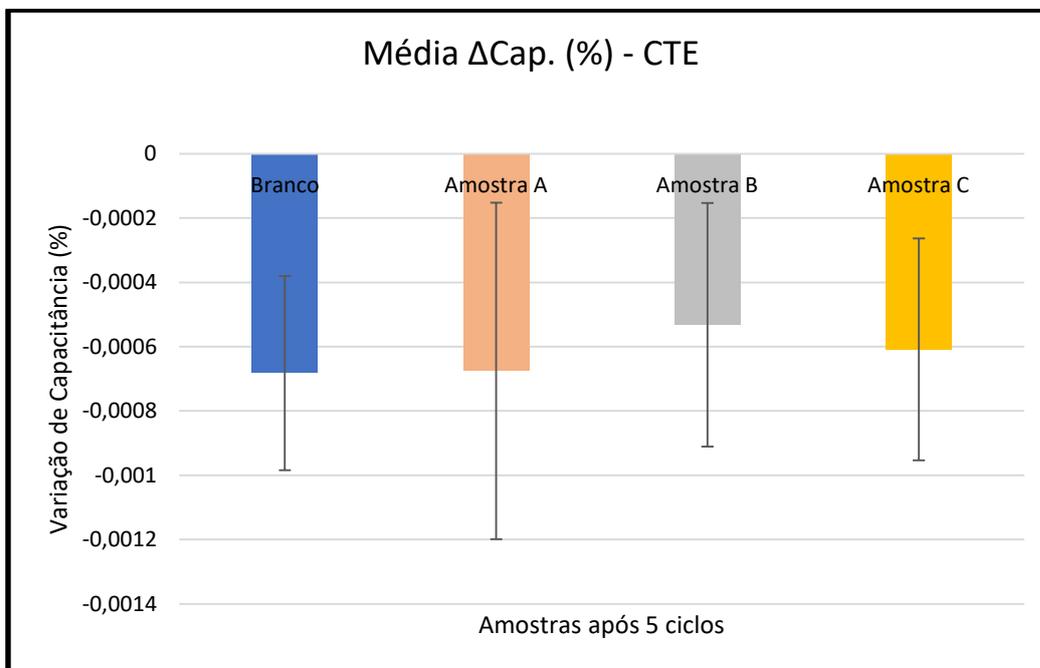


Figura 22: Resultado da variação média de capacitância das amostras no ensaio de ciclagem térmica.

**Tabela 6:** são mostrados todos os valores de variação de capacitância.

Medição inicial – Branco			Medição após 5 ciclos – Branco	
N° Peças	1 kHz Cap (nF)	dC/Cn (%)	1 kHz Cap (nF)	dC/Ci (%)
22	1981,42	-0,93%	1979,44	-0,10%
23	1983,02	-0,85%	1982,46	-0,03%
24	1984,04	-0,80%	1982,74	-0,07%
25	1993,90	-0,31%	1992,32	-0,08%
Medição inicial - Versão A Resina em pó			Medição após 5 ciclos - Versão A Resina em pó	
1	1986,08	-0,70%	1985,84	-0,01%
2	1995,34	-0,23%	1993,98	-0,07%
3	1989,88	-0,51%	1986,94	-0,15%
4	1987,28	-0,64%	1985,18	-0,11%
5	1984,24	-0,79%	1983,80	-0,02%
6	1984,94	-0,75%	1982,98	-0,10%
7	1996,82	-0,16%	1996,46	-0,02%

Medição inicial - Versão B Resina em 1mm			Medição após 5 ciclos - Versão B Resina em 1mm	
8	1997,32	-0,13%	1996,24	-0,05%
9	2000,02	0,00%	1998,62	-0,07%
10	1991,14	-0,44%	1988,78	-0,12%
11	1987,60	-0,62%	1987,56	0,00%
12	1984,58	-0,77%	1984,14	-0,02%
13	1999,10	-0,04%	1997,74	-0,07%
14	1994,00	-0,30%	1993,26	-0,04%
Medição inicial - Versão C Resina em 2mm			Medição após 5 ciclos - Versão C Resina em 2mm	
15	1994,06	-0,30%	1992,24	-0,09%
16	1997,46	-0,13%	1995,28	-0,11%
17	1995,28	-0,24%	1994,58	-0,04%
18	1996,16	-0,19%	1995,38	-0,04%
19	1982,42	-0,88%	1981,18	-0,06%
20	1987,26	-0,64%	1985,72	-0,08%
21	1990,62	-0,47%	1990,40	-0,01%

Na Figura 22, podemos observar que todas as amostras apresentaram perda de capacitância com os 5 ciclos submetidos, neste caso, a influência da contração da bobina não afetou, visto que o capacitor aquecia e resfriava. Como a variação de capacitância é mínima entre as amostras, independe a adição de resíduo na performance do capacitor, pois não surte efeito na capacitância das amostras.

Vale ressaltar que neste ensaio é importante a análise visual, visto que a resina epóxi pode trincar e diminuir a performance do capacitor, devido a facilidade de entrada de umidade e possível corrosão no filme metalizado. Dessa forma, foi avaliado as trincas inerentes ao capacitor após o ensaio.

Todas as amostras apresentaram trincas, conforme Figura 23, devido a influência de outros materiais, pois a variação de temperatura tende a gerar tensões residuais pela incompatibilidade de coeficientes de expansão térmica entre a resina epóxi e os terminais, camada de metalização por spray ou outro metal que esteja envolvido no encapsulamento.

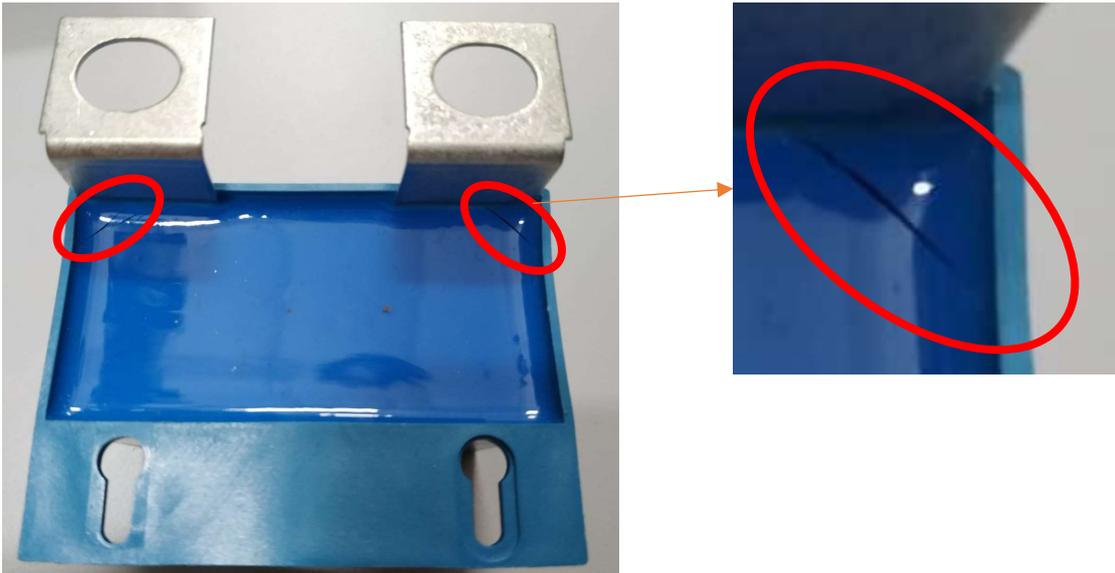


Figura 23: Trinca no capacitor após ensaio de ciclagem térmica da amostra B.

De imediato, é possível notar que os terminais estanhados aparentes da Figura 23 influenciam negativamente na ciclagem térmica, pois a rachadura aparente na amostra B mostrada na Figura 23 demonstra a presença de tensão residual gerada no centro do terminal até a extremidade da caneca. Dessa forma, o resíduo e a resina não são os fatores principais pelas trincas neste ensaio.

Apesar das trincas observadas as peças não tiveram perda de performance por capacitância e todas as amostras foram aprovadas.

## 6. CONCLUSÕES

Neste estudo foi avaliado a adição de resíduo pós-industrial de resina epóxi em diferentes granulometrias usadas em capacitores como carga em nova resina epóxi virgem e com os resultados chegaram-se as seguintes conclusões:

- Na análise visual, foi possível verificar que a utilização de resíduo de resina epóxi com granulometrias superiores a 1 e 2 milímetros (Amostras B e C), apresentaram saliências na superfície do capacitor, considerado falha.
- Com relação a medições elétricas, todas as amostras apresentaram valores dentro do especificado e a inclusão de resina com carga em todas as amostras não surtiram efeito significativo.
- Com base no ensaio de confiabilidade (ensaio de vida) as amostras de ambas as versões estão aprovadas, pois a inserção de carga no encapsulamento não surte efeito significativo na performance do capacitor. Porém, é nítido um ganho mínimo de capacitância quando o grão é maior que 1mm (Amostras B e C).
- No ensaio de calor úmido com tensão, as amostras novamente não tiveram efeito significativo na performance do capacitor. Porém, a com grão acima de 2mm (Amostra C) também apresenta ligeira variação de capacitância.
- Já no ensaio de ciclagem térmica, as amostras não tiveram efeito significativo na performance do capacitor. A inserção de resíduo teve um comportamento indiferente no aumento das trincas inerentes ao ensaio, o que é uma vantagem.
- Finalmente conclui-se que a escolha de granulometria seria a amostra A que contem resíduo de granulometria menor que 1mm, pois diminuiria o consumo de resina virgem e também não causaria problemas visuais, como bolhas e corpos estranhos na superfície. Apesar das outras amostras apresentarem resultados melhores de variação, a amostra A foi escolhido pelo fato de não deixar marcas superficiais no capacitor.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Variar a proporção de resina moída para encapsulamento do capacitor;
- Avaliar o uso de resina moída em outros em capacitores com bobinas menores;
- Avaliar o uso de resina moída em contato com diferentes resinas.
- Avaliar o uso de resina moída em capacitores de filme de PET, como material dielétrico.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lei 12305/2010, 'Política Nacional de Resíduos Sólidos', Governo Federal, Brasília, 2010;
- [2] Projeto da Almaco com dois laboratórios do IPT propõe soluções para reaproveitamento de materiais. IPT, 2013. Disponível em: <[https://www.ipt.br/centros\\_tecnologicos/CT-OBRAS/cases/5-reciclagem\\_de\\_compositos.htm](https://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CT-OBRAS/cases/5-reciclagem_de_compositos.htm)> Acesso em: 10/07/2021.
- [3] Hanaoka, T., Arao, Y., Kayaki, Y., Kuwata, S., & Kubouchi, M. (2021). **Analysis of nitric acid decomposition of epoxy resin network structures for chemical recycling.** Polymer Degradation and Stability, 186. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109537>
- [4] V. Goodship; **Introduction to Plastics Recycling**; Smithers Rapra Tech. Ltd., 2ª Edição, 2007, Shawbury, Reino Unido.
- [5] Valentine, N., Azarian, M. H., & Pecht, M. (2019). **Metallized film capacitors used for EMI filtering: A reliability review.** In Microelectronics Reliability (Vol. 92, pp. 123–135). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.11.003>
- [6] ARDEBILI, Haleh. **Encapsulation Technologies for Electronic Applications.** 2ª ed. Elsevier, 2018.
- [7] COELHO, Pedro. Resina Epóxi – **História, Processo de Produção, Propriedades e Usos.** Engquimicasantosp, 2012. Disponível em: <<https://www.engquimicasantosp.com.br/2018/08/resina-epoxi-historia-processo-producao-usos.html>>. Acesso em: 12/08/2021
- [8] Huntsman. Sistemas de Resina Epóxi. **Manual de manuseio seguro**, 2010. Disponível em: <[https://www.maxepoxi.com.br/pdf/guia\\_de\\_manuseio\\_seguro\\_2011.pdf](https://www.maxepoxi.com.br/pdf/guia_de_manuseio_seguro_2011.pdf)>. Acesso em 15/08/2021
- [9] SHEHAB, Z.N., JAMIL, N.R. & ARIS, A.Z. **Occurrence, environmental implications and risk assessment of Bisphenol A in association with colloidal particles in an urban tropical river in Malaysia.** Sci Rep 10, 20360 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77454-8>

- [10] de Abreu, M. M. S. P., Shigue, C. Y., de Oliveira, P. C., Robin, A. L. M., Baldan, C. A., & Filho, E. R. **Determinação dos estágios de gelificação e de vitrificação na cura de um sistema epóxi-amina por análises dielétrica e dinâmico-mecânica.** CBPOL, 2007.
- [11] De, D., Kersting, F., Marinucci, G., & Wiebeck, H. **Reciclagem de compósitos carbono/epóxi: uso de reciclagem química associada a outros métodos.** 20º CBECIMAT, 2012.
- [12] SOUZA, Eliseu. **Estudo para fabricação de refletores automobilísticos utilizando um material compósito termofixo e um material termoplástico.** 2010.
- [13] GABRIEL, Adjanara. **Caracterização e reciclagem da carcaça polimérica de monitores de tubos de raios catódicos pós-consumo.** PPGE3M, 2012.
- [14] News European Parliament - **Circular economy: definition, importance and benefits.** Disponível em: <<https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>> Acesso em 26/11/2021.
- [15] DUARTE, Luiz. **Degradação dos capacitores de potência sobre influência dos componentes harmônicos.** PPGEE-021, 2000.
- [16] GODEC, M.; Mandrino, Dj.; Gaberscek, M.; **Investigation of performance degradation in metallized film capacitors.** Applied Surface Science, v. 273, p. 465- 471, 2013.
- [17] ZAAGE, K.; WALTER, H.; FRÉMONT, H.; **Moisture diffusion in Printed Circuit Boards: Measurements and Finite-Element-Simulations.,** Microelectronics Reliability, p. 1663-1667, 2005.
- [18] WALTER, H.; **Study on the Effect of Moisture and Elevated Temperature on the Fracture Properties of Visco Elastic Polymers,** 2009.