



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

SIANDRO SALES SENA

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE OCTOATO DE COBALTO NAS
PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS NA RESINA DE POLIÉSTER
ISOFTÁLICO**

ANANINDEUA-PA

2025

SIANDRO SALES SENA

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE OCTOATO DE COBALTO NAS
PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS NA RESINA DE POLIÉSTER
ISOFTÁLICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia de
Materiais, da Universidade Federal do Pará
– Campus Ananindeua, como para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia de
Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa
Cunha

Co-Orientador: Vitor Hugo Auzier Lima

ANANINDEUA-PA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

S163i Sales Sena, Siandro.
INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE OCTOATO DE
COBALTO NAS PROPRIEDADES TÉRMICAS E
MECÂNICAS NE RESINA DE POLIÉSTER ISOFTÁLICO /
Siandro Sales Sena. — 2025.
65 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha
Coorientador(a): Prof. Dr. Vitor Hugo
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua,
Curso de Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2025.

1. Octoato de Cobalto. 2. Resina de Poliéster
isofáltico. 3. Comportamento térmico. 4. Propriedades
mecânicas. 5. Cura de polímeros. I. Título.

CDD 620.11

SIANDRO SALES SENA


**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE OCTOATO DE COBALTO NAS
PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS NA RESINA DE POLIÉSTER
ISOFTÁLICO**

Data da aprovação: 02/04/2025.


Conceito: EXCELENTE.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao corpo docente da faculdade de engenharia de materiais da Universidade Federal do Pará – Campus Ananindeua, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Bacharelado em Engenharia de Materiais


Examinado por:

Documento assinado digitalmente
 EDINALDO JOSE DE SOUSA CUNHA
Data: 27/05/2025 11:24:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Edinaldo José de Sousa Cunha
(FEMat/CANAN/UFPA – Orientador)

Documento assinado digitalmente
 VITOR HUGO AUZIER LIMA
Data: 26/05/2025 19:55:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Vitor Hugo Auzier Lima
(UEPA- Orientador)

Documento assinado digitalmente
 DEIBSON SILVA DA COSTA
Data: 26/05/2025 14:27:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Deibson da Silva Costa
(FEMat/CANAN/UFPA – Membro interno)

Documento assinado digitalmente
 MARCOS VINICIUS DA SILVA PAULA
Data: 27/05/2025 10:36:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Marcos Vinicius da Silva Paula
(FEMat/CANAN/UFPA – Membro interno)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar meus agradecimentos, acima de tudo, a Deus, por me conceder força e perseverança para superar os desafios dessa jornada. À minha mãe, pois sem ela nada na minha vida seria possível. No momento em que mais precisei, sem hesitar, quando enfrentei uma depressão durante o curso, ela largou tudo para cuidar de mim. À minha noiva, Ana Paula, que esteve comigo nas horas mais difíceis, ajudando-me não só durante a faculdade, mas em todas as áreas da minha vida. Agradeço também à Heliana, que considero minha segunda mãe e que não me deixou sozinho, deixando de lado as coisas mais importantes da vida dela para estar ao meu lado. Não poderia deixar de agradecer ao meu pai, que me ajudou imensamente, especialmente na minha infância.

Sou profundamente grato aos amigos que foram verdadeiros pilares na minha caminhada. Rodolfo e Eryck, que não mediram esforços para me ajudar a continuar a faculdade, mesmo quando as circunstâncias pareciam impossíveis. Daniel e Mathaus, cuja amizade foi e continua sendo um apoio essencial em minha vida. Além deles, sou grato a Victor, Eryck, Lucas e Castanhal, que caminharam comigo ao longo dessa trajetória.

Agradeço aos meus tios, em especial à Tia Carla (minha madrinha), à Tia Alexandrina (minha sogra) e ao Tio Júnior, que considero meu padrinho de coração, por todo apoio durante minha doença e o incentivo a voltar para a vida acadêmica. Aos meus avós, principalmente à minha Vó Nair, ao meu avô Colombiano e ao meu avô Juca, que infelizmente não estão mais entre nós.

Aos meus professores, em especial ao meu orientador Edinaldo José de Sousa Cunha, ao meu coorientador Vitor Hugo Auzier Lima e aos membros da banca Deibson e Marcos, por toda orientação, ensinamentos e contribuições fundamentais para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço às famílias Sena e Sales, que sempre estiveram ao meu lado.

RESUMO

A busca por materiais poliméricos de melhor desempenho e custo-benefício tem levado ao estudo da modificação de resinas poliésteres, amplamente usadas nas indústrias automotiva, naval e de construção civil. Entre os fatores que influenciam suas propriedades finais, o processo de cura desempenha um papel crucial, sendo regulado por catalisadores e aceleradores. Este estudo investiga a influência da variação da concentração de octoato de cobalto na produção de resina de poliéster isoftálico, focando no comportamento térmico e nas propriedades mecânicas. A concentração de octoato deve ser ajustada com cuidado, pois pode impactar a resistência, a contração volumétrica e a eficiência produtiva do material. Para isso, foram realizados experimentos que envolveram a produção de resinas de poliéster isoftálico com diferentes concentrações de octoato de cobalto (0,5%, 1,0% e 1,5%), bem como foram monitorados o tempo e a temperatura de cura, além da resistência mecânica dos materiais resultantes. E ainda, foram empreendidas análises estatísticas para avaliar a relação entre essas variáveis. Com base nas análises realizadas, observou-se que aumentar a quantidade de acelerador não se mostrou efetivo em acelerar o processo de cura de forma linear; foi, também, observado que uma temperatura mais elevada durante o processo de cura pode resultar em uma resistência mecânica superior deste material. Assim como foi revelado que concentrações mais elevadas de octoato resultaram em corpos de prova mais finos devido à contração volumétrica durante o processo de cura. E, ainda, percebeu-se que uma maior resistência mecânica foi alcançada com a menor concentração de octoato de cobalto (0,5%) em temperatura mais elevada, demonstrando que a otimização da concentração de octoato de cobalto pode resultar em materiais com melhor desempenho mecânico e menor custo de produção. Esta pesquisa destaca como a quantidade de octoato de cobalto afeta as propriedades térmicas e mecânicas das resinas de poliéster isoftálico, enfatizando a importância de equilibrar a concentração de acelerador, a temperatura de cura e as propriedades finais do material.

Palavras-chaves: Octato de Cobalto, Resina de Poliéster Isoftálico, Comportamento Térmico, Propriedades Mecânicas, Cura de Polímeros.

ABSTRACT

The pursuit of polymeric materials with enhanced performance and cost-effectiveness has driven research into the modification of polyester resins, which are extensively utilized in the automotive, naval, and construction industries. Among the key factors influencing their final properties, the curing process plays a crucial role, being governed by catalysts and accelerators. This study examines the impact of varying cobalt octoate concentrations on the production of isophthalic polyester resin, with a particular focus on thermal behavior and mechanical properties. The precise adjustment of cobalt octoate concentration is essential, as it directly affects material strength, volumetric shrinkage, and overall production efficiency. To this end, experimental procedures were conducted involving the synthesis of isophthalic polyester resins with distinct cobalt octoate concentrations (0.5%, 1.0%, and 1.5%). The curing time and temperature were systematically monitored, alongside the mechanical strength of the resulting materials. Furthermore, statistical analyses were performed to evaluate the relationships between these variables. The findings indicate that increasing the accelerator concentration does not linearly enhance the curing process efficiency. Additionally, a higher curing temperature was observed to contribute to superior mechanical strength. Moreover, elevated cobalt octoate concentrations resulted in thinner test specimens due to volumetric shrinkage during the curing process. Furthermore, the highest mechanical strength was achieved at the lowest cobalt octoate concentration (0.5%) under elevated temperatures, highlighting that optimizing the cobalt octoate concentration can yield materials with improved mechanical performance and reduced production costs. This research underscores the critical influence of cobalt octoate concentration on the thermal and mechanical properties of isophthalic polyester resins, emphasizing the necessity of balancing accelerator concentration, curing temperature, and final material characteristics to achieve optimal performance.

Keywords: Cobalt Octoate, Isophthalic Polyester Resin, Thermal Behavior, Mechanical Properties, Polymer Curing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Polímero - Resina Isoftálica.....	19
Figura 2 - Estrutura Química de Formação de Poliéster.....	20
Figura 3 - Etapas de Cura de Resina Termofixa.....	21
Figura 4 - Aplicação de resina isoftálica.....	22
Figura 5 - Processo de cura do poliéster insaturado.....	26
Figura 6 - Construção de embarcações que tem o Gelcoat como elemento principal, que é produzida a base de resina de poliéster isoftálica insaturada.....	27
Figura 7 - Aplicação da resina isoftálica na indústria automotiva, naval, entre outras.....	37
Figura 8 - Materiais: a) Resina Poliéster isofitálica; b) desmoldante; c) acelerador de cobalto e d) iniciador peróxido de etil-meti cetona (MEK-P).....	40
Figura 9 - a) Prensa Hidráulica; b) Balança Analítica; c) Molde de aço; d) Máquina Universal de ensaios.....	42
Figura 10 - Mistura da resina poliéster isoftálico, catalisador e acelerador.....	43
Figura 11 - Análise Térmica do Pico Exotérmico da Reação de Polimerização.....	45
Figura 12 - Dimensões para os corpos de prova utilizados no ensaio de tração.....	46

Figura 13 - Corpos de prova utilizados no ensaio de tração de concentração.....46

Figura 14 - (a) Máquina Universal de Ensaio e (b) as garras que fazem os ensaios de tração.....47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre algumas resinas de poliéster insaturado.....	31
Tabela 2 - Resumo da análise de regressão para o comportamento linear (aproximado) da temperatura nos ensaios com diferentes níveis de octato de cobalto	51
Tabela 3 - Probabilidades de igualdade entre as inclinações de reta para as três equações de regressão relativas aos ensaios com diferentes níveis de octato de cobalto.	52
Tabela 4 - Comparação da espessura dos corpos de prova (em quintuplicata) conforme a concentração de octato de cobalto	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Temperatura dos Polímeros em Função do Tempo nas Diferentes Concentrações de Octato de Cobalto.	49
Gráfico 2 - Comparação da espessura dos corpos de prova (em quintuplicata) conforme a concentração de octato de cobalto em mm.....	54
Gráfico 3 - Relação entre resistência mecânica e concentração do acelerador octato de cobalto.	56
Gráfico 4 - Relação entre temperatura final e resistência mecânica máxima.....	58
Gráfico 5 - Relações entre resistência mecânica máxima; temperatura e concentrações do acelerador (0,5%, 1,0% e 1,5%) usados.....	59

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	15
1.1. INTRODUÇÃO.....	15
1.2. OBJETIVOS.....	17
1.2.1. Objetivo geral.....	17
1.2.2. Objetivos específicos.....	18
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
CAPÍTULO 2	19
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1. POLÍMERO.....	19
2.1.1. Definição.....	19
2.1.2. Polímero Poliéster.....	20
2.2. INTRODUÇÃO AO POLIÉSTER ISOFTÁLICO E ACELERADORES DE CURA	22
2.3. PROCESSO DE CURA DE RESINAS POLIÉSTER.....	23
2.3.1 Mecanismos de Cura em Resinas Poliéster.....	24
2.3.2 Etapas do Processo de Cura em Resinas Poliéster.....	25
2.3.3 Influência da Temperatura e do Tempo na Cura de Resinas Poliéster.....	27
2.3.4 Análise das Propriedades Resultantes.....	29
2.3.5 Formulação das Resinas Poliéster Isoftálicas e Aplicações do Agente Reticulante.....	29
2.4. A IMPORTÂNCIA DA QUANTIDADE DE ACELERADOR NA VELOCIDADE E EFICIÊNCIA DA REAÇÃO DE CURA.....	30
2.5. MUDANÇAS TÉRMICAS DA RESINA DURANTE O PROCESSO DE CURA.....	33
2.6. PREPARAÇÃO DE FORMULAÇÕES DE RESINA DE POLIÉSTER ISOFTÁLICO COM OCTOATO DE COBALTO.....	34
2.7. A IMPORTÂNCIA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS NAS APLICAÇÕES INDUSTRIAIS.....	35
2.8. A INFLUÊNCIA DE ACELERADORES NA POLIMERIZAÇÃO DE RESINAS POLIÉSTER E SEUS IMPACTOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	37

CAPÍTULO 3	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3. 1. MATERIAIS.....	40
3.1.1 Matriz de Poliéster Isoftálico.....	40
3.1.2 Equipamentos Utilizados.....	41
3. 2. MÉTODOS.....	42
3.2.1 Procedimento Experimental.....	42
3.2.1. Análise Térmica do Pico Exotérmico da Reação de Polimerização.....	43
3.2.2 Confeção dos Corpos de Prova para o ensaio de Tração.....	45
3.2.3. Ensaio Mecânicos de Tração.....	46
3.2.4. Fluxograma do Processo.....	47
3.2.5. Análise Estatística.....	48
CAPÍTULO 4	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1. Análise das Temperaturas no Ponto de Gel até o Pico Exotérmico do Polímero em Função do Tempo.....	49
4.2. Análises de Espessura do Corpo de Prova em Diferentes Concentrações de Octato de Cobalto.....	53
4.3. Testes de Resistência Mecânica em Corpos de Prova com Diferentes Concentrações de Octato de Cobalto.....	55
4.4. Testes de Resistência Mecânica e os Picos Exotérmicos do Polímero.....	57
4.5. Os Insights entre Resistência Mecânica, Temperatura e Octato de Cobalto.....	59
CAPÍTULO 5	61
5. CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIAS.....	63

CAPÍTULO 1

1.1. INTRODUÇÃO

A busca por materiais poliméricos com propriedades superiores e adaptáveis tem sido um dos principais pilares da engenharia química e da indústria de materiais compósitos. Segundo Melo *et al.* (2018), as resinas de poliéster isoftálico têm se destacado como uma escolha diversificada e amplamente utilizada devido às suas propriedades mecânicas, químicas e térmicas notáveis. A capacidade de modular essas características de acordo com as necessidades específicas de cada aplicação é uma área de pesquisa em constante evolução, e adição de catalisadores ou aceleradores, como o octoato de cobalto, oferece oportunidades intrigantes para alcançar essa customização precisa.

O presente trabalho propõe-se a explorar em detalhes a influência da variação na quantidade de acelerador de octoato de cobalto na resina de poliéster isoftálico. De acordo com Botelho *et al.* (2019), o octoato de cobalto, um composto que age como catalisador ou agente acelerador em diversas reações de polimerização, possui potencial para afetar significativamente conforme as propriedades finais da resina de poliéster isoftálico, visto que sua presença e quantidade podem influenciar o grau de polimerização, o tempo de cura e outras características cruciais do material resultante. Essa interação entre a concentração do acelerador e as propriedades finais da resina é um fator complexo, como destacado por Janices & Katime (2014) e Castro (2003), uma vez que modificações sutis na quantidade de octoato de cobalto podem resultar em alterações significativas na cinética da ocorrência de polimerização e nas propriedades mecânicas do material. Portanto, compreender de maneira abrangente essa influência é essencial para a formulação precisa de resinas de poliéster isofáticas com características desejadas para aplicações específicas.

O aprimoramento das propriedades das resinas poliéster isoftálicas é uma necessidade constante na indústria de compósitos, a fim de atender às demandas de setores tão variados como automotivo, construção civil e naval. Conforme mencionado por Janices & Katime (2014) e Castro (2003), a busca por resistência mecânica e estabilidade térmica impulsiona a exploração de diferentes formulações, incluindo a incorporação de catalisadores e aceleradores.

O octoato de cobalto, um dos aceleradores amplamente utilizados em reações de polimerização, oferece a vantagem de sua capacidade de promover uma polimerização mais eficiente e rápida das resinas poliéster isoftálicas. Entretanto, segundo Baggio (2021) e Castro (2003), a quantidade ideal de octoato de cobalto não é uma constante universal e deve ser cuidadosamente ajustada para atender aos requisitos específicos de cada aplicação. A otimização dessa concentração envolve considerações complexas, uma vez que um excesso de acelerador pode resultar em efeitos indesejados, como aumento da exotermia durante o evento, afetando as propriedades mecânicas e térmicas do material. Nesse contexto, a investigação experimental detalhada, conforme proposto neste estudo, assume um papel fundamental para elucidar as relações entre a quantidade de octoato de cobalto e as propriedades resultantes da resina de poliéster isoftálico, contribuindo para a compreensão e otimização desse processo de polimerização. Por isso, esta pesquisa teve como afã majoritário investigar de forma sistemática a influência da variação na quantidade de acelerador de octoato de cobalto na resina de poliéster isoftálico. Conforme destacado por Baggio (2021) e Janices & Katime (2014), para tanto, serão realizados estudos experimentais, nos quais diferentes formulações serão preparadas com variações precisas na concentração do acelerador. Os resultados obtidos foram analisados e correlacionados com as propriedades-chaves de resistência mecânica e tendência térmica da resina de poliéster isoftálico resultante. Visto que a resistência mecânica, segundo Janices & Katime (2014), é um indicador crucial do desempenho do material em aplicações práticas, influenciando diretamente sua manutenção e integridade estrutural. E a tendência térmica, conforme facilmente observado por Reis (2016), Janices & Katime (2014) e Castro (2003), está intimamente relacionada à estabilidade do material em diferentes condições de temperatura. A capacidade do polímero de suportar variações térmicas sem degradação significativa é um aspecto crítico na seleção de materiais para aplicações que envolvem exposição a temperaturas extremas. Ademais, a correlação entre a variação na concentração do acelerador e as propriedades térmicas contribuirá para uma forma de caracterização sobre a influência desse componente nas propriedades finais do material, oferecendo dados relevantes para a formulação otimizada de resinas poliéster isoftálicas para aplicações específicas futuras. Portanto, a análise integrada dessas propriedades, conforme padrão por Barbosa et al., (2018), permitirá uma compreensão mais

abrangente da influência da quantidade de acelerador de octoato de cobalto na resina de poliéster isoftálico, confiante para o avanço do conhecimento na área de engenharia química de materiais poliméricos.

A proposta de investigação é de grande confiança para a indústria de compósitos e para a engenharia de materiais, visto que, segundo Barbosa et al., (2018), Reis (2016) e Da Silva (2023), a compreensão aprofundada dos efeitos da quantidade de acelerador de octoato de cobalto pode permitir uma otimização de resinas poliéster isoftálicas. Tal conhecimento poderá resultar em materiais com propriedades personalizadas e melhor desempenho em uma ampla gama de aplicações industriais. Além disso, os resultados obtidos podem contribuir para uma compreensão mais abrangente dos mecanismos de polimerização envolvidos, enriquecendo o corpo de conhecimento na área da engenharia química e de materiais.

Para isso a presente pesquisa foi estruturada de modo que a seção seguinte apresentou uma revisão abrangente sobre resinas poliéster isoftálicas, catalisadores e aceleradores usados em processos de polimerização, com foco no octoato de cobalto. Posteriormente, foram detalhados os procedimentos experimentais adotados, incluindo a preparação das formulações, os métodos de caracterização utilizados e os protocolos de teste. Na sequência, os resultados foram apresentados e discutidos em relação aos objetivos propostos. Por fim, a seção de conclusão abordou as principais contribuições do estudo, suas restritas e possíveis direções para futuras pesquisas na área. Logo, de forma sintetizada, esta pesquisa buscou contribuir para um entendimento aprofundado dos efeitos da quantidade de acelerador de octoato de cobalto na resina de poliéster isoftálico, oferecendo insights valiosos para a otimização de materiais poliméricos de alta performance e reforçando o campo da engenharia química no desenvolvimento de materiais inovadores e customizados.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

- Investigar o comportamento térmico e as propriedades mecânicas em resinas de poliéster isoftálico produzidas com diferentes quantidades de Octato de Cobalto.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar as características de cura da resina de poliéster isoftálico contendo diferentes porcentagens de acelerador de cura Octato de Cobalto, analisando a influência da concentração do acelerador nas temperaturas do ponto de gel e do pico exotérmico durante o processo de cura.
- Realizar ensaios de resistência à tração nas amostras de poliéster isoftálico após o processo de cura, visando a determinação das propriedades mecânicas e comparar os resultados obtidos, identificando as influências das diferentes concentrações de acelerador de cura nas propriedades de resistência à tração.
- Correlacionar os dados obtidos nas análises térmicas e mecânicas, buscando identificar possíveis relações entre as mudanças nas características térmicas das resinas curadas e suas propriedades mecânicas, especialmente a resistência à tração.
- Analisar os resultados experimentais em comparação com a literatura existente, a fim de fornecer insights sobre os mecanismos de cura e as influências das variações na quantidade de acelerador de cura Octato de Cobalto nas resinas de poliéster isoftálico.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente capítulo desta pesquisa introduz a contextualização e os objetivos gerais e específicos desta pesquisa. No Capítulo 2, é efetuada uma análise bibliográfica dos tópicos examinados neste estudo, enquanto o Capítulo 3 explora as metodologias experimentais adotadas na elaboração, caracterização e avaliação das propriedades térmicas e mecânicas em resinas de poliéster isoftálico com a adição de Octato de Cobalto. O Capítulo 4 direciona o foco para a análise dos resultados obtidos por meio da metodologia experimental. Por fim, no Capítulo 5, são proferidas as considerações finais e sugestões futuras de aplicação desta pesquisa.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO DE LITERATURA

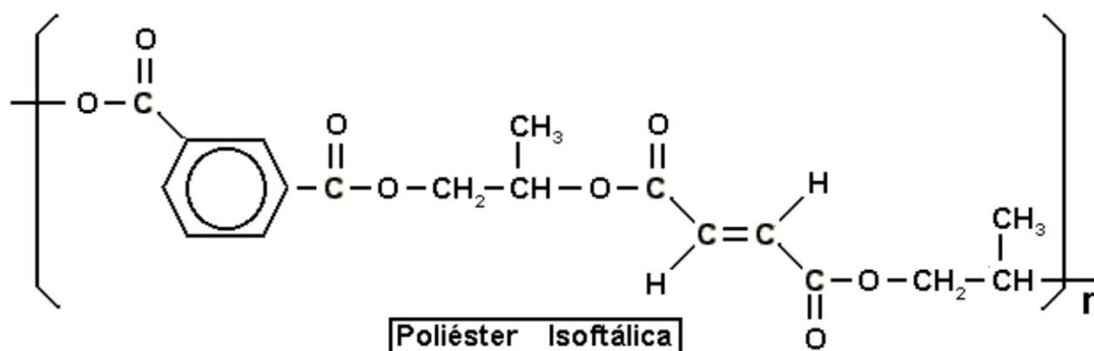
2.1. POLÍMERO

2.1.1. Definição

Polímero é um composto orgânico, frequentemente constituído por átomos de Carbono, ligado por um grande número de moléculas (macromoléculas), formadas a partir de várias unidades estruturais de repetição menores, cuja estrutura depende do monômero utilizado. A maioria desses materiais possui uma baixa massa específica (CALLISTER, 2020).

A reação química pelas quais essas pequenas moléculas se ligam é denominada polimerização, ou reação de cura. Esse processo irá promover uma estrutura tridimensional na molécula (RECHHOLD, 2018). Grau de polimerização, normalmente representado por n , é o número de monômeros presentes na cadeia polimérica (CANEVAROLO, 2006). Os polímeros podem surgir por reações químicas de adição ou condensação. Durante o processo de condensação, há pequenas eliminações de moléculas na reação, como as da água, por exemplo. Os polímeros formados pelo processo de adição são conhecidos como termoplásticos, possuindo, como principal característica, o fato de poderem ser reciclados facilmente (RECHHOLD, 2018). Na figura 1 tem-se o exemplo de um polímero, a resina isoftálica.

Figura 1: Polímero - Resina Isoftálica.



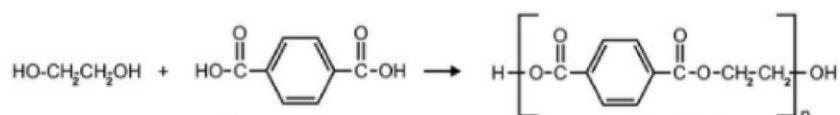
Fonte: Sialex, 2018. Disponível em: <http://www.silaex.com.br/poli%C3%A9ster.htm>

2.1.2. Polímero Poliéster

A resina poliéster é um polímero termorrígido muito utilizada por conta do seu baixo custo, sua estabilidade térmica e dimensional, sua resistência mecânica, entre muitas outras propriedades. Os poliésteres são bastante utilizados, tanto na indústria, quanto no meio acadêmico. A resina poliéster possui muitas vantagens quando comparada com outras resinas, como a sua capacidade de cura a temperatura ambiente, suas propriedades mecânicas, entre outras (COSTA et al., 2015; AZIZ et al., 2005).

Os poliésteres são chamados de polímeros termoplásticos, possuindo um baixo ponto de fusão, o qual pode sofrer o processo de termofusão e, inclusive, podem ser reciclados. Os polímeros poliésteres são formados quando ocorre a formação de vários grupos carboxílicos, bem como álcoois. Quando há na reação principal do ácido carboxílico (-COOH), agindo com álcoois (-OH), formando os polímeros ésteres (BUSS, 2021), assim como na figura 2.

Figura 2 - Estrutura química de formação de poliéster.

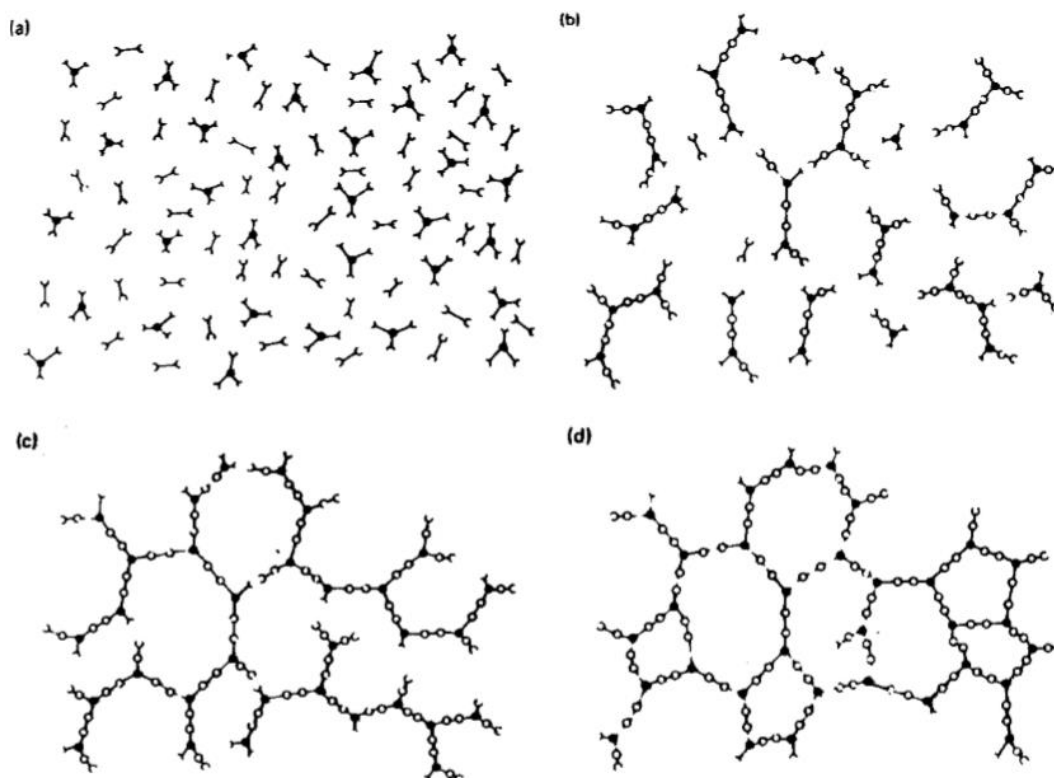


Fonte: BUSS, 2021.

Segundo Moreira (2008), as resinas poliésteres mais usadas são as ortoftálicas, as isoftálicas e as tereftálicas. As resinas isoftálicas são adquiridas de poliésteres de alta massa molecular. Essa resina possui uma maior resistência mecânica e química, a qual absorve melhor os impactos e são mais resistentes à água. Podem ser utilizadas em aplicações náuticas, em tanques, em tubulação em geral, etc. (PEREIRA, 2016; SILAEX, 2015).

Segundo Rubio (2002), a reação de cura ou solidificação de resinas líquidas termofixas é iniciada por meio do fornecimento de alguma forma de energia, como o calor, a luz, o potencial elétrico, entre outros. A figura 3, na página a seguir, mostra o processo de cura de uma resina termofixa:

Figura 3: Etapas de cura de resina termofixa. (a) crescimento das cadeias lineares do prepolímero; b) momento prévio ao ponto gel; c) ponto de gelificação; d) estrutura polimérica altamente reticulada.



Fonte: Rubio, 2002.

Quando um prepolímero é exposto ao calor, suas cadeias lineares começam a crescer e se ramificar ao mesmo tempo (Figura 3a), momento esse anterior ao ponto de gel (Figura 3b). Ao decorrer da reação, a massa molecular aumenta de uma forma muito acelerada e se produz um entrecruzamento completo, que é o ponto de gelificação (Figura 3c). A gelificação é a geração de uma rede infinita de moléculas do polímero reticulado, marcando a transição entre a fase líquida e a fase de gel. Na polimerização de radicais livres a gelificação ocorre no começo da reação de cura em um baixo grau de transformação e uma consequente formação de partículas micro gel. Após o ponto de gelificação, há um aumento na reticulação, formando um sólido solúvel, sem a possibilidade de fusão, constituído de uma rede tridimensional infinita (REIS, 2016).

2.2. INTRODUÇÃO AO POLIÉSTER ISOFTÁLICO E ACELERADORES DE CURA

A busca por materiais poliméricos de alto desempenho e adaptabilidade tem impulsionado o avanço contínuo da engenharia de materiais. Nesse contexto, as resinas de poliéster isoftálico emergem como uma classe proeminente de materiais poliméricos devido às suas propriedades excepcionais e à capacidade de serem adaptadas para atender a diversas aplicações industriais. Segundo Covissi & Sanchez (2018), essas resinas, pertencentes à família dos poliésteres insaturados, ganham destaque devido à sua excelente resistência química, propriedades mecânicas robustas e estabilidade térmica notável.

O poliéster isoftálico é sintetizado a partir de reações de policondensação entre ácidos isoftálicos e glicóis insaturados, resultando em uma estrutura polimérica altamente reticulada. Conforme explanado por Pereira *et al.* (2021), Covissi & Sanchez (2018) e Pereira (2016), a sua estrutura tridimensional característica proporciona a resistência necessária para enfrentar ambientes corrosivos, tornando-o uma escolha frequente em aplicações que demandam durabilidade, como revestimentos resistentes à corrosão, peças para ambientes agressivos e componentes para a indústria automotiva. A figura 4 mostra a aplicação da resina na indústria.

Figura 4: Aplicação de resina isoftálica.



Fonte: Sercel Solução em fibras, 2018. **Disponível em:** <http://www.sercel.com.br/blog/resina-poliester.html>.

Um aspecto chave que influencia as propriedades e o desempenho das resinas de poliéster isoftálico é o processo de cura. A cura é uma etapa crítica no

desenvolvimento dessas resinas, na qual ocorrem reações químicas entre grupos insaturados, levando à formação de ligações cruzadas e à reticulação da matriz polimérica. De acordo com estudos de Ramírez-Palma *et al.* (2017), nesse contexto, os aceleradores de cura desempenham um papel vital ao agir como catalisadores das reações de polimerização, acelerando o processo de cura e influenciando diretamente as propriedades finais do material resultante.

Os aceleradores de cura têm a capacidade de modificar a cinética das reações de polimerização, influenciando a velocidade de formação das ligações cruzadas. Conforme destacado por Baggio (2021), dentre esses aceleradores, o octoato de cobalto ganha destaque devido à sua eficácia e aplicabilidade em resinas poliéster isoftálicas. O octoato de cobalto, um sal de cobalto carboxilato, age como um agente acelerador nas reações de cura, promovendo a formação mais rápida e eficiente de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas. Segundo Janices & Katime (2014), sua presença influencia a taxa de reação, a exotermia da reação e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas, térmicas e químicas do material resultante.

Além disso, a seleção apropriada do acelerador de cura e sua quantidade são fatores críticos para otimizar as propriedades finais das resinas de poliéster isoftálico. Como destacado por Reis (2016), Janices & Katime (2014) e Castro (2003), o equilíbrio entre a velocidade de cura, o desenvolvimento das propriedades e a estabilidade do processo deve ser cuidadosamente considerado para garantir que o material final atenda aos requisitos específicos da aplicação pretendida. Nesse sentido, compreender a interação entre o poliéster isoftálico e o acelerador de cura é crucial para a formulação precisa de materiais poliméricos com desempenho confiável e previsível.

O próximo tópico abordará de forma mais detalhada o processo de cura e as reações de polimerização nas resinas de poliéster isoftálico, proporcionando uma compreensão mais profunda sobre a influência dos aceleradores de cura, em particular o octoato de cobalto.

2.3. PROCESSO DE CURA DE RESINAS POLIÉSTER

O processo de cura de resinas poliéster é uma etapa fundamental na transformação desses materiais de sua forma inicial para um estado sólido e

resistente, dotado das propriedades desejadas para sua aplicação final. A cura envolve reações químicas que ocorrem entre as moléculas dos monômeros presentes na resina, resultando na formação de ligações cruzadas e na reticulação da estrutura polimérica. A compreensão das nuances desse processo é crucial para otimizar as propriedades do material e atingir o desempenho desejado (JANICES & KATIME, 2014; CASTRO, 2003).

2.3.1 Mecanismos de Cura em Resinas Poliéster

A cura de resinas poliéster é um processo fundamental para a transformação de matérias-primas líquidas em materiais sólidos e duráveis, com propriedades mecânicas e térmicas adequadas para aplicações diversas. Esse processo envolve reações químicas que levam à formação de ligações covalentes entre os componentes da resina. No contexto da cura de resinas de poliéster insaturado, como o poliéster isoftálico abordado neste estudo, os mecanismos de cura são mediados por grupos insaturados, como os grupos vinílicos, que reagem em reações de adição.

Conforme destacado por Pereira (2016), a cura de resinas poliéster é frequentemente realizada por meio de reações de policondensação. Nesse processo, grupos funcionais reativos presentes nos monômeros da resina reagem entre si, promovendo a formação de ligações covalentes e a construção da rede polimérica tridimensional. Essa estrutura reticulada confere às resinas poliéster suas características desejadas de resistência, durabilidade e estabilidade térmica.

No entanto, em resinas de poliéster insaturado, como o poliéster isoftálico, os mecanismos de cura são distintos. Como observado por Rubio (2002), os grupos insaturados, como os grupos vinílicos, são passíveis de reações de adição. Nesse processo, os grupos insaturados presentes nas moléculas de monômero reagem entre si, promovendo a ligação cruzada sem a formação de subprodutos. Essas reações de adição são catalisadas pela presença de um agente de reticulação, frequentemente um peróxido orgânico.

Conforme estudos de Buss (2021) e Castro (2003), o peróxido orgânico atua como um iniciador das reações de adição, gerando radicais livres que iniciam as reações de polimerização. Esses radicais livres reagem com os grupos insaturados, desencadeando a formação de ligações covalentes entre as moléculas de monômero.

A progressão dessas reações de adição resulta na construção da rede polimérica, com a formação de ligações cruzadas que conferem resistência e rigidez ao material.

Vale ressaltar que o processo de cura das resinas de poliéster insaturado é sensível a fatores como temperatura e tempo de cura, como apontado por De Azevedo (2019). A temperatura influencia a taxa de reação e a exotermia associada, enquanto o tempo de cura afeta a extensão das reações de adição e, conseqüentemente, a estrutura final do polímero curado.

Em síntese, os mecanismos de cura em resinas poliéster insaturado, como o poliéster isoftálico, envolvem reações de adição mediadas por grupos insaturados, como grupos vinílicos. Essas reações são catalisadas por peróxidos orgânicos, levando à formação de ligações covalentes e à construção da rede polimérica tridimensional. A compreensão desses mecanismos é fundamental para a investigação dos efeitos das diferentes porcentagens de octoato de cobalto na resina de poliéster isoftálico, como abordado neste estudo.

2.3.2 Etapas do Processo de Cura em Resinas Poliéster

O processo de cura de resinas poliéster é um conjunto de etapas que desempenham papéis cruciais na formação da estrutura polimérica final. Cada etapa contribui para a transformação das matérias-primas líquidas em um material sólido e durável, com características específicas de acordo com as aplicações desejadas. Neste tópico, serão abordadas as etapas fundamentais do processo de cura em resinas poliéster.

Conforme ressaltado por Da Silva (2023), a primeira etapa do processo de cura envolve a mistura dos componentes da resina. Inicialmente, a resina poliéster é combinada com os agentes de cura, incluindo o agente reticulante, que frequentemente é um peróxido orgânico. Essa mistura é realizada com o objetivo de assegurar uma distribuição homogênea do agente reticulante na matriz da resina. A uniformidade na distribuição é essencial para garantir a eficácia das reações de cura em toda a extensão da resina.

A etapa subsequente é a aplicação da resina preparada. De acordo com estudos de De Azevedo (2019), a resina é aplicada sobre a superfície ou no interior do molde, dependendo da geometria da peça a ser produzida. Essa etapa é crítica

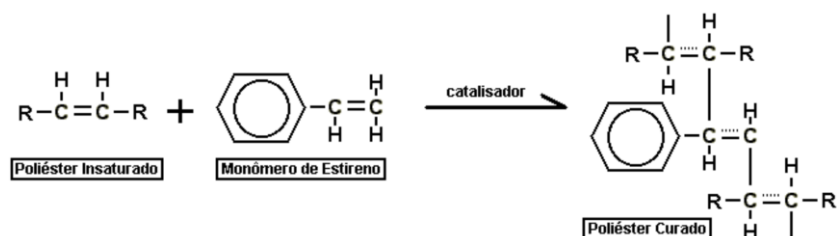
para garantir que a resina alcance todas as áreas desejadas e preencha completamente o molde. A distribuição uniforme da resina é essencial para evitar a formação de vazios e garantir a integridade estrutural do produto final.

Após a aplicação da resina, inicia-se a etapa de cura propriamente dita. Como observado por Janices & Katime (2014) e Castro (2003), essa etapa envolve a ativação do agente reticulante, geralmente um peróxido orgânico, que atua como catalisador das reações de polimerização. O agente reticulante gera radicais livres que iniciam as reações de adição entre os grupos insaturados presentes na resina. Essas reações de adição levam à formação de ligações cruzadas, resultando na construção da rede polimérica tridimensional.

É importante mencionar que a temperatura e o tempo de cura desempenham um papel fundamental nessa etapa. Como discutido por Almeida (2020) e Reis (2016), a temperatura influencia a taxa de reação das reações de adição, enquanto o tempo de cura determina a extensão das reações e a estrutura final do polímero curado. A combinação adequada desses parâmetros é crucial para obter materiais com as propriedades desejadas.

Por fim, a última etapa do processo de cura é a pós-cura ou estágio de envelhecimento. Segundo relatos de Reis (2016), essa etapa envolve a exposição do material curado a temperaturas moderadas por um período adicional. Isso permite que as reações de cura continuem a ocorrer, resultando em uma rede polimérica mais densa e interconectada. A pós-cura contribui para a melhoria das propriedades mecânicas e térmicas do material final. A Figura 5 mostra o processo de cura do poliéster insaturado.

Figura 5: Processo de cura do poliéster insaturado



Fonte: Silaex, 2018. **Disponível em:** <http://www.silaex.com.br/poli%C3%A9ster.htm>.

Em síntese, o processo de cura de resinas poliéster é composto por diversas etapas interligadas. Desde a mistura dos componentes de cura até a pós-cura, cada

etapa desempenha um papel fundamental na formação da estrutura polimérica final. A compreensão detalhada dessas etapas é essencial para o desenvolvimento de materiais com propriedades específicas para aplicações industriais diversas, como na industrial naval. A figura 6 mostra a aplicação do uso de resina poliéster.

Figura 6: Construção de embarcações que tem o Gelcoat como elemento principal, que é produzida a base de resina de poliéster isoftálica insaturada.



Fonte: Manual de construções de Barcos, 2022. **Disponível em:** <https://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/formulacao-do-gelcoat/>.

2.3.3 Influência da Temperatura e do Tempo na Cura de Resinas Poliéster

A temperatura e o tempo são variáveis de extrema importância no processo de cura de resinas poliéster, desempenhando papéis cruciais na determinação das propriedades finais do material polimérico. A influência desses parâmetros é essencial

para compreender como as reações químicas evoluem durante a formação de ligações cruzadas e como isso impacta as características mecânicas e térmicas do material curado.

Conforme observado por Pereira et al. (2021) e Castro (2003), a temperatura é um fator que exerce controle direto sobre a taxa de reação das moléculas reativas presentes nas resinas poliéster. O aumento da temperatura promove uma maior energia cinética das moléculas, acelerando as reações químicas envolvidas na formação das ligações cruzadas. Isso resulta em uma maior velocidade de polimerização e, conseqüentemente, em um tempo de cura reduzido.

A aceleração do processo de cura devido ao aumento da temperatura pode ter impactos significativos nas propriedades mecânicas do material final. Conforme apontado por diversos estudos, incluindo Pereira et al. (2021) e Barbosa *et al.* (2018), a formação de ligações cruzadas mais rápidas resulta em uma rede polimérica mais densa e interconectada. Isso pode levar a um aumento na resistência mecânica, na rigidez e na tenacidade do material, tornando-o mais adequado para aplicações que requerem essas características.

No entanto, é importante ressaltar que a escolha da temperatura de cura deve ser feita com cautela, considerando a temperatura máxima suportada pelo polímero. Como destacado por De Azevedo (2019) e Reis (2016), temperaturas excessivamente altas podem levar à degradação térmica do material, resultando em perda de propriedades e comprometimento da integridade estrutural. Portanto, é fundamental encontrar um equilíbrio entre a aceleração do processo de cura e a preservação das características do material.

Além da temperatura, o tempo de cura também desempenha um papel significativo na formação das propriedades do material curado. Conforme indicado por Almeida (2020) e Barbosa *et al.* (2018), o tempo de cura influencia a extensão das reações químicas e a quantidade de ligações cruzadas formadas. Um tempo de cura mais longo permite que mais reações ocorram, levando a uma rede polimérica mais densa e estruturada.

No entanto, um tempo de cura excessivamente longo pode resultar em supercura, o que pode afetar negativamente as propriedades mecânicas e térmicas do material. Conforme abordado por Almeida (2020), Barbosa *et al.* (2018), e Reis (2016), a supercura pode levar a uma rede polimérica excessivamente rígida,

reduzindo a tenacidade e a flexibilidade do material. Portanto, a otimização do tempo de cura é crucial para garantir que as propriedades desejadas sejam alcançadas.

Em resumo, a temperatura e o tempo são variáveis essenciais no processo de cura de resinas poliéster. A temperatura influencia a velocidade de reação e a formação de ligações cruzadas, afetando diretamente as propriedades mecânicas do material final. O tempo de cura, por sua vez, determina a extensão das reações químicas e a estrutura da rede polimérica. A seleção adequada desses parâmetros é crucial para obter materiais curados com as propriedades desejadas, levando em consideração os limites de temperatura suportados e evitando a ocorrência de supercura.

2.3.4 Análise das Propriedades Resultantes

A evolução das propriedades durante o processo de cura é complexa e pode ser avaliada através de diversas técnicas de análise térmica, mecânica e morfológica. A análise térmica, como a análise diferencial de varredura (DSC), é frequentemente utilizada para monitorar a evolução das reações de cura através da detecção de eventos endotérmicos ou exotérmicos associados às reações químicas envolvidas. Essas análises térmicas permitem identificar a temperatura de transição vítrea, o ponto de gel e o pico exotérmico, entre outros parâmetros, oferecendo insights sobre as mudanças estruturais e químicas em andamento.

No que diz respeito à análise mecânica, a cura das resinas poliéster é frequentemente avaliada por meio de ensaios de tração e flexão. Conforme discutido por De Azevedo (2019) e Castro (2003), esses ensaios permitem quantificar a evolução das propriedades mecânicas ao longo do processo de cura, incluindo a resistência à tração, a tenacidade e a rigidez. Observa-se que, à medida que a cura progride, ocorre uma melhoria gradual nas propriedades mecânicas, uma vez que as ligações cruzadas conferem maior coesão à matriz polimérica.

2.3.5 Formulação das Resinas Poliéster Isoftálicas e Aplicações do Agente Reticulante

A formulação das resinas poliéster isoftálicas e a seleção do agente reticulante, como o peróxido orgânico, são determinantes para o desempenho final do material. Janices & Katime (2014) e Castro (2003) destacam a importância de se ajustar a quantidade de agente reticulante de acordo com as características desejadas do produto final. Uma formulação adequada não apenas influencia as propriedades mecânicas, mas também pode afetar a resistência química, a estabilidade térmica e a durabilidade do material em diferentes ambientes. Didaticamente, uma esta descrição do processo de cura das resinas poliéster é de suma importância para o entendimento das transformações químicas e físicas que ocorrem durante a formação da matriz polimérica. A evolução das propriedades mecânicas e térmicas é resultado da complexa rede de ligações cruzadas que se desenvolve durante a cura. A seguir será abordada a influência dos aceleradores de cura, focando especificamente no octoato de cobalto, nas reações de polimerização e no desenvolvimento das propriedades das resinas poliéster isoftálicas.

2.4 A IMPORTÂNCIA DA QUANTIDADE DE ACELERADOR NA VELOCIDADE E EFICIÊNCIA DA REAÇÃO DE CURA

A influência da quantidade de acelerador de cura nas reações de polimerização de resinas poliéster é um aspecto de relevância ímpar no desenvolvimento de materiais com propriedades desejadas para aplicações específicas. A quantidade precisa de acelerador exerce um impacto considerável na velocidade e na eficiência das reações de cura, sendo vital compreender como essa variável afeta o processo de polimerização.

Conforme apontado por Baggio (2021) e Janices & Katime (2014), a velocidade da reação de cura é diretamente proporcional à quantidade de acelerador presente na resina. A presença do acelerador, como o octoato de cobalto, age como catalisador ao diminuir a energia de ativação das reações químicas, tornando-as mais favoráveis a ocorrer. Dessa forma, um aumento na concentração do acelerador resulta em um maior número de colisões efetivas entre as moléculas reagentes, acelerando a formação de ligações cruzadas e a reticulação da matriz polimérica.

Outro ponto relevante é a eficiência da reação de cura em relação à quantidade de acelerador. Janices & Katime (2014) ressaltam que, além da velocidade, a eficiência da reação também é influenciada pela concentração do acelerador. Um

balanço cuidadoso deve ser alcançado, pois o aumento excessivo da quantidade de acelerador pode levar à formação prematura de ligações cruzadas, prejudicando a fluidez da resina durante o processo de moldagem. Por outro lado, uma concentração insuficiente de acelerador pode resultar em uma reação de cura lenta e incompleta, comprometendo as propriedades finais do material.

Segundo Baggio (2021), Brandão, et al., (2019) e Janices & Katime (2014), a escolha da quantidade ideal de acelerador deve ser orientada pelas propriedades específicas desejadas para a aplicação final do material. Em aplicações que requerem um tempo de cura rápido, como a produção em série de peças, uma concentração maior de acelerador pode ser necessária para garantir a produtividade. Por outro lado, em situações em que é essencial controlar o tempo de processamento, uma menor concentração de acelerador pode ser preferível para evitar a cura prematura da resina.

É importante ressaltar que a quantidade de acelerador também está intrinsecamente ligada às características do sistema de cura como um todo. Conforme discutido por Reis (2016) e Castro (2003), as características do agente reticulante, as condições de temperatura e os tempos de cura podem interagir com a quantidade de acelerador, influenciando a cinética das reações de polimerização. Portanto, um estudo abrangente deve ser conduzido para determinar a quantidade de acelerador ótima que resulte no equilíbrio desejado entre velocidade e eficiência da cura.

O entendimento da relação entre a quantidade de acelerador e a velocidade de cura é essencial para controlar de maneira precisa o processo de polimerização. Conforme exposto por Baggio (2021), Janices & Katime (2014) e Castro (2003), a influência direta do acelerador na taxa de reação permite ajustar o tempo necessário para que a resina atinja um estado sólido e rígido. Essa capacidade de manipular a velocidade de cura é particularmente valiosa em ambientes industriais, onde a produção eficiente e a padronização das propriedades são fundamentais. A Tabela 1 mostra um comparativo entre algumas resinas de poliéster insaturado:

Tabela 2: Comparativo entre algumas resinas de poliéster insaturado.

TIPOS	COMENTÁRIOS
Ortoftálica	Resina mais comum de menor custo para usos básicos não nobres

Tereteftálica	Possui resistências físicas pouco superiores a ortoftálica porém baixa resistência a UV
Isoftálica	Melhores características mecânicas, químicas e térmicas que as anteriores
Isoftálica c / NPG	O NPG melhora a resistência a hidrólise
Bisfenólica	Possui melhores características químicas e térmicas

Fonte: Adaptado de Sialex, 2018. **Disponível em:** <http://www.silaex.com.br/poli%C3%A9ster.htm>.

Essa Tabela justifica a escolha da resina isoftálica por ter melhores características mecânicas. A quantidade de acelerador também desempenha um papel crucial na obtenção de propriedades mecânicas desejadas do material curado. De acordo com estudos Baggio (2021) e Reis (2016), o aumento da concentração de acelerador pode levar a uma maior densidade de ligações cruzadas na matriz polimérica, resultando em uma estrutura mais coesa e resistente. Isso se reflete diretamente nas propriedades mecânicas, como a resistência à tração, a dureza e a tenacidade, que são influenciadas pela presença e pela distribuição das ligações intermoleculares.

Entretanto, a relação entre a quantidade de acelerador e as propriedades mecânicas não é linear. De Azevedo (2019) e Castro (2003) observaram que, em concentrações excessivamente altas de acelerador, pode ocorrer uma aglomeração prematura das cadeias poliméricas, levando a uma estrutura mais rígida e frágil. Portanto, é crucial encontrar um equilíbrio, no qual a quantidade de acelerador seja suficiente para promover uma cura eficaz, mas não a ponto de comprometer a flexibilidade e a tenacidade do material.

Vale ressaltar que a quantidade de acelerador de cura também pode influenciar as propriedades térmicas do material polimérico resultante. Como discutido por De Azevedo (2019) e Reis (2016), uma maior quantidade de acelerador pode resultar em um aumento da exotermia da reação de cura, o que por sua vez afeta a dissipação de calor durante o processo. Isso pode influenciar a tendência térmica do material, afetando suas propriedades de estabilidade térmica e resistência a altas temperaturas.

Em síntese, a quantidade de acelerador de cura desempenha um papel multifacetado na velocidade e na eficiência das reações de polimerização de resinas poliéster. A concentração ótima de acelerador deve ser determinada com base nas propriedades desejadas para a aplicação final do material, considerando fatores como velocidade de cura, resistência mecânica, tenacidade e estabilidade térmica. O próximo tópico irá explorar os efeitos da concentração do octoato de cobalto, um acelerador amplamente utilizado, nas propriedades das resinas de poliéster isoftálico.

2.5. MUDANÇAS TÉRMICAS DA RESINA DURANTE O PROCESSO DE CURA

A análise das mudanças térmicas que ocorrem durante o processo de cura das resinas poliéster é de suma importância para compreender a evolução das reações químicas e as transformações estruturais que ocorrem na matriz polimérica. O estudo das mudanças térmicas fornece insights valiosos sobre a cinética e a natureza das reações de cura, bem como as propriedades finais do material resultante.

Conforme mencionado por Reis (2016), Janices & Katime (2014) e Castro (2003), a análise térmica diferencial (DSC) é uma técnica amplamente utilizada para investigar as mudanças térmicas associadas à cura das resinas poliéster. O DSC registra os fluxos de calor envolvidos nas reações de cura, permitindo a identificação de eventos exotérmicos ou endotérmicos que indicam a ocorrência de reações químicas. Durante o processo de cura, são observados picos exotérmicos que correspondem à formação de ligações cruzadas e à reticulação da estrutura polimérica.

A interpretação dos resultados do DSC é essencial para determinar as temperaturas de transição vítrea, o ponto de gel e o pico exotérmico da reação de cura. De acordo com estudos de Reis (2016), a temperatura de transição vítrea representa a temperatura na qual a resina começa a se tornar mais rígida e perde sua capacidade de fluxo. O ponto de gel é o momento em que a resina transita do estado líquido para o estado gel, marcando o início da formação da estrutura tridimensional. O pico exotérmico, por sua vez, é indicativo da liberação de calor durante as reações de polimerização.

Reis (2016), Janices & Katime (2014) e Castro (2003) enfatizam que a análise das mudanças térmicas permite avaliar a cinética das reações de cura. A área sob o pico exotérmico no DSC está relacionada à quantidade de calor liberado durante a

reação de cura, proporcionando informações sobre a entalpia das reações. Além disso, a taxa de crescimento e a altura do pico podem indicar a velocidade das reações químicas, oferecendo insights sobre o desenvolvimento da cura ao longo do tempo.

A relação entre as mudanças térmicas e as propriedades finais do material é evidenciada pela análise correlacional entre os resultados do DSC e as propriedades mecânicas. Como ressaltado por Reis (2016) e Castro (2003), a presença de um pico exotérmico mais intenso e a temperaturas mais elevadas pode indicar uma maior densidade de ligações cruzadas na estrutura polimérica. Isso pode resultar em uma matriz mais rígida e coesa, contribuindo para o aumento da resistência mecânica do material final.

Em resumo, a análise das mudanças térmicas durante o processo de cura das resinas poliéster oferece uma visão abrangente das reações químicas, da cinética de cura e do desenvolvimento das propriedades finais do material. A técnica do DSC é uma ferramenta essencial para caracterizar as transformações térmicas que ocorrem durante a cura, fornecendo informações valiosas para o controle e otimização do processo de polimerização.

2.6. PREPARAÇÃO DE FORMULAÇÕES DE RESINA DE POLIÉSTER ISOFTÁLICO COM OCTOATO DE COBALTO

A preparação das diferentes formulações de resina de poliéster isoftálico com variações na concentração do octoato de cobalto é uma etapa crucial para o estudo da influência desse acelerador nas propriedades de cura e nas características finais do material polimérico. A variação controlada da concentração do octoato de cobalto permite avaliar de maneira sistemática a relação entre a quantidade de acelerador e as mudanças nas propriedades da resina curada.

Conforme descrito por Barbosa *et al.* (2018), a preparação das formulações envolve a mistura precisa dos componentes da resina poliéster isoftálico, incluindo o monômero, o agente reticulante, os aditivos e, neste caso, o octoato de cobalto. A concentração do octoato de cobalto é variada em diferentes proporções, como 0,5%, 1,0% e 1,5% em relação ao peso total da resina. A variação dessas concentrações permite explorar uma faixa abrangente de quantidades de acelerador e seus efeitos nas propriedades resultantes.

A sequência da preparação das formulações começa com a pesagem precisa dos componentes. Conforme observado por Almeida (2020) e De Azevedo (2019), a precisão na pesagem é fundamental para garantir que as proporções das formulações sejam mantidas consistentes. Os componentes são então misturados utilizando equipamentos de agitação adequados para promover a homogeneização da resina. Durante a mistura, o octoato de cobalto é adicionado em diferentes quantidades para obter as concentrações desejadas.

Após a mistura, a resina é submetida a um processo de desgaseificação. A desgaseificação é um passo importante para remover bolhas de ar e outros gases dissolvidos que podem interferir nas reações de cura. Conforme relatado por Reis (2016), a presença de bolhas de ar pode prejudicar a formação de ligações cruzadas uniformes e comprometer as propriedades finais do material curado. Portanto, um processo de desgaseificação eficiente é essencial para garantir resultados confiáveis.

A etapa subsequente envolve o processo de moldagem das formulações preparadas. Pereira *et al.* (2021) e Almeida (2020) enfatizam a importância de técnicas de moldagem adequadas para garantir a obtenção de corpos de prova homogêneos e representativos. A resina é despejada em moldes adequados e, em seguida, submetida ao processo de cura, que é monitorado quanto à temperatura e ao tempo. Durante a cura, ocorrem as reações de formação de ligações cruzadas e reticulação da resina, influenciadas pelas diferentes concentrações de octoato de cobalto. Isto posto, a preparação das diferentes formulações de resina de poliéster isoftálico com variações de concentração do octoato de cobalto é uma etapa complexa que requer precisão e controle. Essas formulações servem como base para o estudo da influência do acelerador nas propriedades e comportamento do material polimérico final.

2.7. A IMPORTÂNCIA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS NAS APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

As propriedades mecânicas desempenham um papel central nas aplicações industriais de materiais poliméricos, incluindo as resinas de poliéster isoftálico. A capacidade de um material resistir a cargas, deformações e esforços é determinante para o seu desempenho e durabilidade em diferentes ambientes e condições de uso. A compreensão das propriedades mecânicas é crucial para a seleção e o

desenvolvimento de materiais que atendam aos requisitos específicos de cada aplicação.

Conforme observado por De Azevedo (2019), a resistência à tração é uma das propriedades mecânicas mais relevantes em aplicações industriais. A resistência à tração mede a capacidade do material de suportar cargas de tração sem se romper. Em ambientes onde as peças são submetidas a forças de tração, como estruturas de suporte ou componentes de máquinas, a resistência à tração é fundamental para evitar falhas catastróficas. Materiais com alta resistência à tração são preferíveis em aplicações onde a integridade estrutural é vital.

Além da resistência à tração, a tenacidade é outra propriedade mecânica de destaque em aplicações industriais. Como destacado por De Azevedo (2019) e Castro (2003), a tenacidade avalia a capacidade do material de absorver energia durante a deformação antes da ruptura. Materiais tenazes são mais capazes de absorver impactos e deformações súbitas, reduzindo o risco de fraturas repentinas. Isso é especialmente importante em aplicações onde a carga é aplicada de forma dinâmica, como componentes sujeitos a vibrações ou impactos.

A rigidez é outra propriedade mecânica que desempenha um papel significativo nas aplicações industriais. Conforme discutido por Reis (2016) e Castro (2003), a rigidez, também conhecida como módulo de elasticidade, mede a capacidade do material de resistir à deformação elástica. Materiais mais rígidos são preferíveis em situações onde a deformação deve ser minimizada, como em componentes que requerem precisão dimensional ou em estruturas que devem manter sua forma original sob carga.

Além disso, a resistência ao impacto é uma propriedade chave em aplicações sujeitas a cargas súbitas e repetidas. De acordo com estudos De Azevedo (2019) e Reis (2016), a resistência ao impacto avalia a capacidade do material de absorver energia durante a aplicação de uma carga súbita. Materiais com alta resistência ao impacto são desejáveis em aplicações que envolvem quedas, batidas ou colisões, onde a capacidade de absorver energia e evitar rupturas é crucial.

A escolha das propriedades mecânicas adequadas depende do contexto específico de cada aplicação industrial. Baggio (2021) e Reis (2016) enfatizam a importância de considerar fatores como carga, ambiente de uso, temperatura e duração da exposição ao selecionar um material. Uma abordagem criteriosa na

seleção das propriedades mecânicas é fundamental para garantir a segurança, o desempenho e a longevidade das aplicações industriais dos materiais poliméricos.

A figura 7 mostra algumas aplicações industriais da resina de poliéster insaturado, as quais desempenham um papel crucial nos setores industrial e automotivo, sendo amplamente empregadas na produção de itens como gelcoats, pastas e enchimentos de reparo. Esses produtos têm sua base no Poliéster Insaturado Reforçado, ao qual são subsequentemente adicionados aditivos e cargas por meio de um processo de agitação simples.

Figura 7: Aplicação da resina isoftálica na indústria automotiva, naval, entre outras.



Fonte: Materias Primas Especializadas, 2023. **Disponível em:** Sistemas basados em resinas poliéster - Parte 1 - Qpros.

2.8. A INFLUÊNCIA DE ACELERADORES NA POLIMERIZAÇÃO DE RESINAS POLIÉSTER E SEUS IMPACTOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

A influência dos aceleradores na polimerização de resinas poliéster tem sido objeto de estudo em diversas pesquisas científicas, buscando compreender os mecanismos subjacentes às reações químicas e os efeitos resultantes nas propriedades mecânicas dos materiais poliméricos. Através da revisão desses estudos, é possível obter insights valiosos sobre como a variação na concentração de aceleradores, como o octoato de cobalto, afeta as propriedades mecânicas das resinas poliéster.

De acordo com a pesquisa de Botelho *et al.* (2019) e Melo *et al.* (2018), a introdução de aceleradores de cura, como o octoato de cobalto, tem o objetivo de acelerar as reações de polimerização das resinas poliéster, resultando em tempos de cura reduzidos. Isso é particularmente relevante em aplicações industriais onde a eficiência de produção é crucial. No entanto, a concentração do acelerador exerce um papel significativo nesse processo, uma vez que pode influenciar tanto a velocidade de reação quanto as propriedades finais do material curado.

Estudos como o de Baggio (2021) e Castro (2003) destacam que a concentração de acelerador de cura pode afetar diretamente a taxa de formação de ligações cruzadas na matriz polimérica. A formação dessas ligações é um fator determinante na resistência mecânica do material. Conseqüentemente, a variação na quantidade de acelerador pode resultar em materiais com diferentes graus de resistência, com implicações diretas nas aplicações finais.

Além disso, Almeida (2020) ressalta a relação entre a quantidade de acelerador e a tendência térmica das resinas curadas. A exotermia das reações de cura é influenciada pela quantidade de acelerador presente. Em concentrações mais elevadas, um aumento na exotermia pode ocorrer, o que, por sua vez, pode influenciar nas propriedades térmicas e de estabilidade do material. Isso destaca a importância de um controle cuidadoso da concentração do acelerador para garantir que as propriedades desejadas sejam alcançadas.

Alguns estudos exploraram ainda a influência da concentração de acelerador nas propriedades mecânicas específicas das resinas poliéster. De Azevedo (2019) e Castro (2003) observaram que a variação da quantidade de octoato de cobalto pode impactar diretamente a tenacidade do material curado. Em concentrações ótimas, um equilíbrio entre resistência e tenacidade pode ser alcançado, resultando em materiais que atendam a uma variedade de requisitos de aplicação.

Logo, um levantamento de pesquisas prévias enfatizou a complexa relação entre a concentração de acelerador na polimerização de resinas poliéster e suas conseqüências nas propriedades mecânicas. A concentração de acelerador não só influencia a velocidade de cura, mas também tem um impacto direto na resistência, na tenacidade, na rigidez e nas propriedades térmicas do material final. Esses estudos fornecem uma base sólida para a investigação das variações de concentração de

octoato de cobalto nas resinas de poliéster isoftálico e seus efeitos nas propriedades mecânicas, conforme abordado neste trabalho.

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3. 1. MATERIAIS

Na etapa de fabricação os materiais utilizados foram: resina poliéster isofitálica, acelerador de cobalto, catalisador MEK-P e desmoldante.

3.1.1 Matriz de Poliéster Isoftálico

Para a produção dos corpos de prova, optou-se pela utilização da resina de poliéster isoftálico da marca Centerglass. Essa resina se diferencia por não conter aceleradores em sua composição e exibir uma notável resistência química. A densidade informada pelos fabricantes é de $1,15 \text{ g/cm}^3$ (AZEVEDO, 2019).

Em conjunto com a resina, incorporou-se um acelerador, denominado octoato de cobalto da marca Centerglass. Foram adotadas proporções de 0,5%, 1% e 1,5% (m/m). Adicionalmente, a resina foi misturada com um catalisador comercial à base de peróxido de metil-etil-cetona (MEK-P) da marca Centerglass, com uma proporção de 1% (m/m). Para facilitar a desmoldagem do material dos moldes, aplicou-se o desmoldante líquido Desmojet da marca Centerglass (AZEVEDO, 2019). A Figura 8 exibe os materiais utilizados para a confecção dos corpos de provas.

Figura 8 - Materiais: a) Resina Poliéster isofitálica; b) desmoldante; c) acelerador de cobalto e d) iniciador peróxido de etil-meti cetona (MEK-P).



(a)

(b)



(c)

(d)

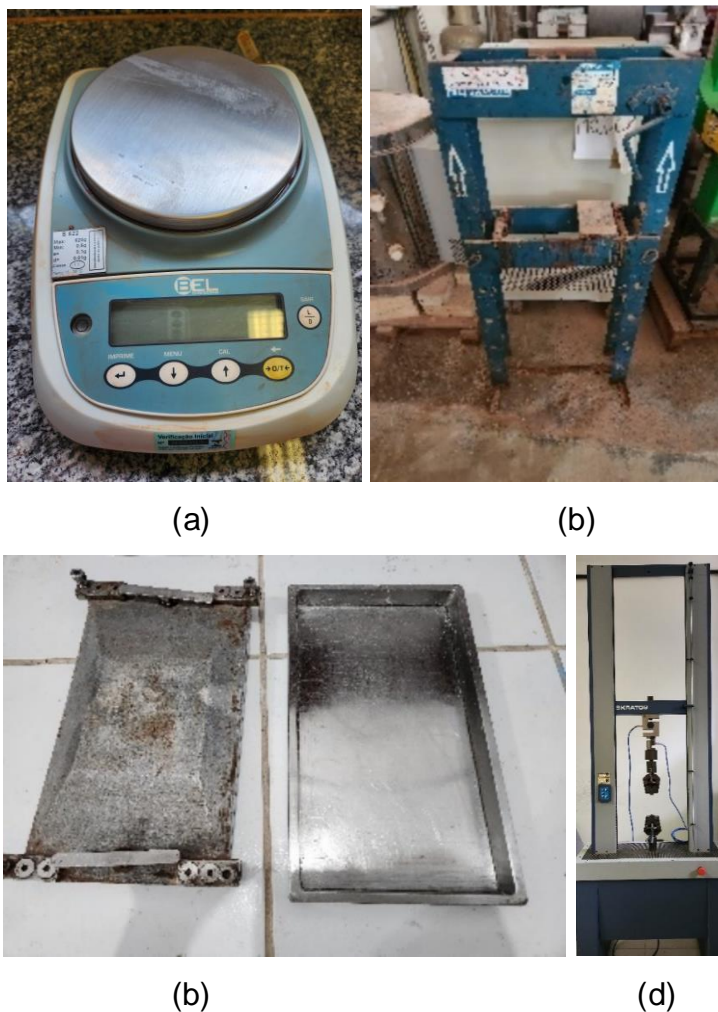
Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.2 Equipamentos Utilizados

No processo de manufatura dos corpos de provas, foram empregados os recursos disponíveis no Laboratório de Engenharia Química na Usina de Materiais e para os ensaios mecânicos utilizou-se os mecanismos disponíveis no Laboratório de Engenharia Mecânica, tudo situado nas instalações da Universidade Federal do Pará.

Dentre os equipamentos utilizados, merecem destaque os seguintes: a) balança, fabricada pela BEL Equipamentos Analíticos Ltda, modelo S622, utilizada para a medição precisa das quantidades de materiais; b) prensa hidráulica da marca Marcon, modelo MPH-10, com capacidade de até 10 toneladas, empregada em processos de compressão de compósitos; c) molde metálico retangular em aço inoxidável, com dimensões de 32,1 cm x 17,3 cm, utilizado na moldagem dos corpos de prova; d) máquina universal de ensaios de modelo KE 2000 kgf, da marca KRATOS, utilizada para fazer o ensaio mecânico. A Figura 9 exhibe os equipamentos utilizados para a confecção dos corpos de provas e para o ensaio mecânico.

Figura 9: a) Balança de precisão; b) Prensa Hidráulica; c) Molde de aço; d) Máquina Universal de Ensaios.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3. 2. MÉTODOS

3.2.1 Procedimento Experimental

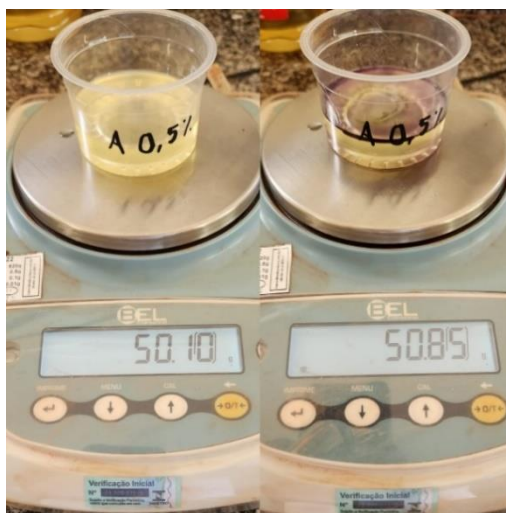
No processo de fabricação dos corpos de prova, a sequência de ações inicia-se com uma precisa mensuração da quantidade de octoato de cobalto e resina de poliéster isoftálico. Posteriormente, o acelerador de cobalto (0,5%, 1%, 1,5% m/m) é incorporado à resina, procede-se à adição do catalisador MEK peróxido (1% m/m) e por fim o uso do desmoldante. O último visa facilitar a remoção das placas após o processo de prensagem. A composição resultante da mistura foi então cuidadosamente vertida em um molde, que já se encontra nivelado. Espera-se, então, até que o ponto de gelificação ocorra, o que geralmente se dá entre 10 e 15 minutos. Depois desse intervalo de tempo, o material, produzido em cinco replicatas para cada

grupo, foi retirado, medido e armazenado para o processo de cura final, que pode durar até 24 horas (AZEVEDO, 2019).

3.2.1. Análise Térmica do Pico Exotérmico da Reação de Polimerização

Nesta fase do experimento, seguindo a norma ASTM D2471, foram preparados três conjuntos analisados em triplicata, as combinações entre resinas de poliéster isoftálico e octoato de cobalto, fundamentais no processo de fabricação (0,5%; 1%; 1,5% m/m), foram pesadas em uma balança Analítica da Marte Científica, modelo AD3300, de acordo com o procedimento experimental anteriormente mencionado e previamente estabelecido. De forma didática pode-se dizer que o octoato de cobalto (0,5%; 1%; 1,5% m/m) foi adicionado, proporcionalmente para cada grupo, em 50 g de resina de poliéster isoftálico em um recipiente de polipropileno de 100 ml, foi, então, homogeneizado, por 60 segundos logo após se acrescentar o MEK-P, a 1% (m/m). A figura 10 expõe a mistura entre a resina poliéster isoftálico, catalisador e acelerador.

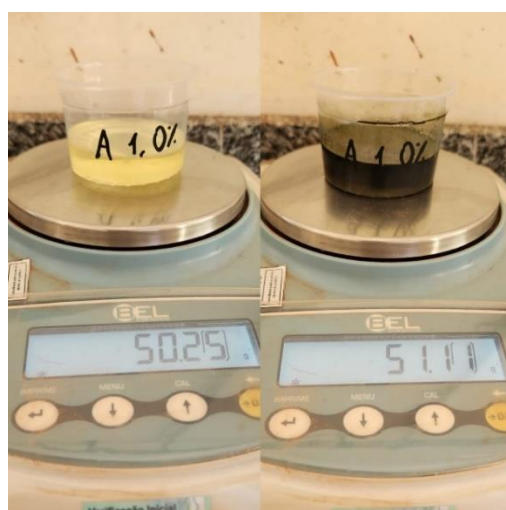
Figura 10: Mistura da resina poliéster isoftálico, catalisador e acelerador em a) 0,5; b) 1,0 e c) 1,5% apenas com resina e com adição de catalisador e acelerador.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após isso, um termômetro digital da marca DigitalThermometer foi introduzido na mistura com o auxílio de um suporte universal e uma garra pinça para bureta, e a temperatura foi registrada, 2 vezes a cada minuto do processo, do ponto de gel até o pico exotérmico do polímero em função do tempo que cada grupo levou para polimerizar. Sendo a temperatura máxima atingida determinada como temperatura de pico exotérmico. Sobressaltando que não houve aquecimento externo, mas, sim, foram mensuradas temperaturas registradas referentes à reação exotérmica do material durante a polimerização. Após a estabilização da temperatura, o sistema foi removido e foi reiniciado um novo processo para a próxima triplicata analisada.

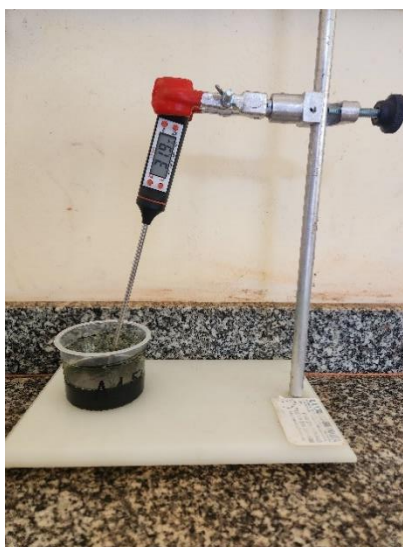
Posteriormente, foram fabricados corpos de provas para a realização dos ensaios de tração (REIS, 2016). A figura 11 exibe como foi feita a análise térmica.

Figura 11: Análise Térmica do Pico Exotérmico da Reação de Polimerização de a) 0,5; b) 1,0 e c) 1,5 %.



(a)

(b)



(c)

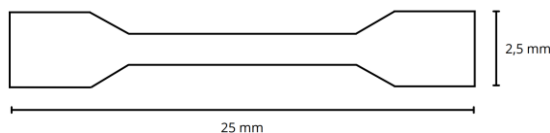
Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2.2 Confeção dos Corpos de Prova para o ensaio de tração

As amostras (corpos de prova) designadas para os testes de tração foram precisamente recortadas de acordo com as diretrizes das normas ASTM D3039 (2000). As dimensões selecionadas foram de 25 mm x 2,5 mm, com a adição de quatro

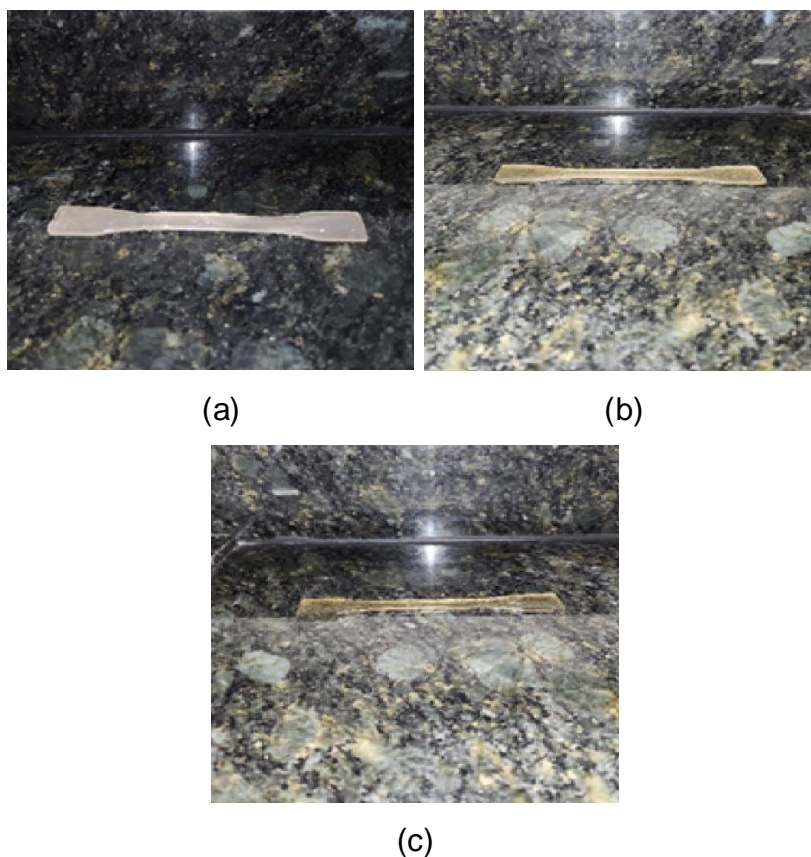
abas de Duratex nas extremidades. A Figura 12 apresenta as dimensões para os corpos de prova para o ensaio de tração e a Figura 13 mostra os corpos de provas para o ensaio de tração.

Figura 12: Dimensões para os corpos de prova utilizados no ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 13: Corpos de prova utilizados no ensaio de tração de concentração de (a) 0,5%; (b) 1,0% e (c) 1,5%.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2.3. Ensaio Mecânico de Tração

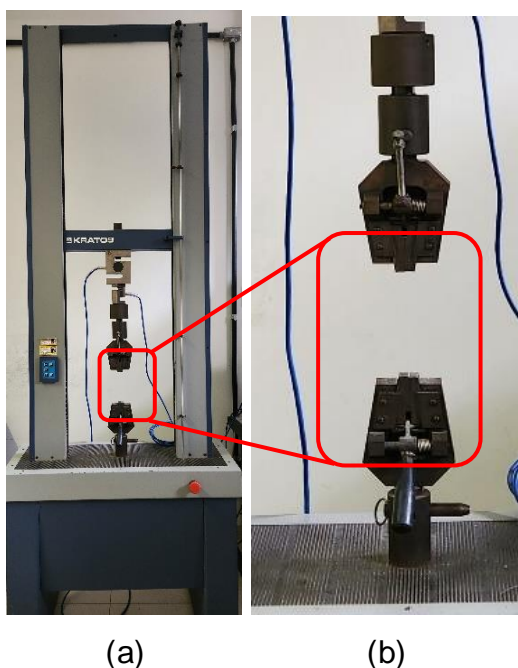
Nestas análises específicas, os corpos de prova passaram por um processo de tração até alcançar sua completa ruptura, cumprindo rigorosamente as diretrizes estabelecidas pela norma ASTM D 3039, amplamente reconhecida por sua relevância

na validação de ensaios e resultados, viabilizando comparações com base em pesquisas previamente publicados (DA SILVA, 2023).

Os corpos de prova foram devidamente fixados em uma máquina de ensaios universais, com fixações em suas extremidades. Esta máquina tracionou de modo constante na direção axial do corpo de prova até que a ruptura completa fosse efetuada. Por todo o procedimento, tanto a carga aplicada quanto o alongamento foram paralelamente registrados pelo próprio equipamento (CALLISTER, 2020).

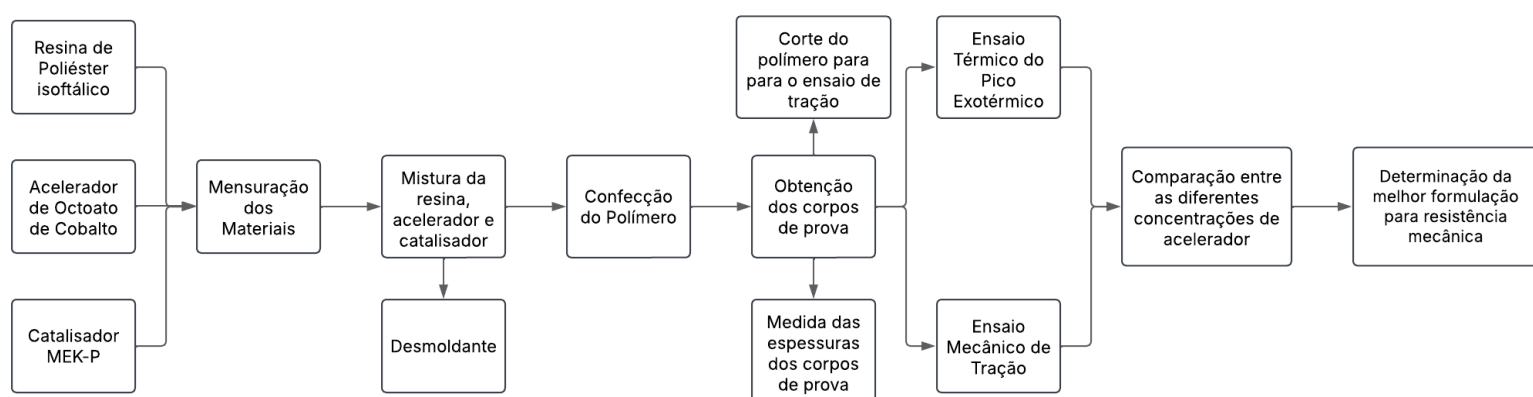
O ensaio foi efetuado estritamente em conformidade com as diretrizes prescritas pela norma ASTM D 3039. O equipamento empregado para esse fim foi o KE 2000 kgf, da marca KRATOS, o qual incidiu uma carga de 5 kN, em uma velocidade constante de 2 mm/min (DA SILVA, 2023). A figura 14 exibe a Máquina Universal de Ensaios.

Figura 14: (a) Máquina Universal de Ensaios e a (b) as garras que fazem os ensaios de tração.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2.4. Fluxograma do Processo



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2.5. Análise Estatística

Os dados foram organizados no programa Microsoft Excel 2010. Os gráficos e tabelas foram construídos com as ferramentas disponíveis nos programas Microsoft Word e GraphPad Prism versão 8.4.3. Todos os testes foram executados com o auxílio do software GraphPad Prism versão 8.4.3. As variáveis quantitativas foram descritas por mínimo, máximo, média e desvio padrão. Para comparar uma variável numérica entre mais de dois grupos, foi usada a ANOVA, sendo que o resultado significativo foi detalhado por múltiplas comparações entre grupos tomados dois a dois, com ajuste do p-valor. A correlação de Pearson foi usada para avaliar a relação linear entre duas variáveis quantitativas. A análise de regressão foi usada para avaliar a tendência linear (aproximada) da temperatura em relação aos tempos. Os resultados com $p \leq 0,05$ (bilateral) foram considerados estatisticamente significativos (LINHARES & OLIVEIRA, 2022).

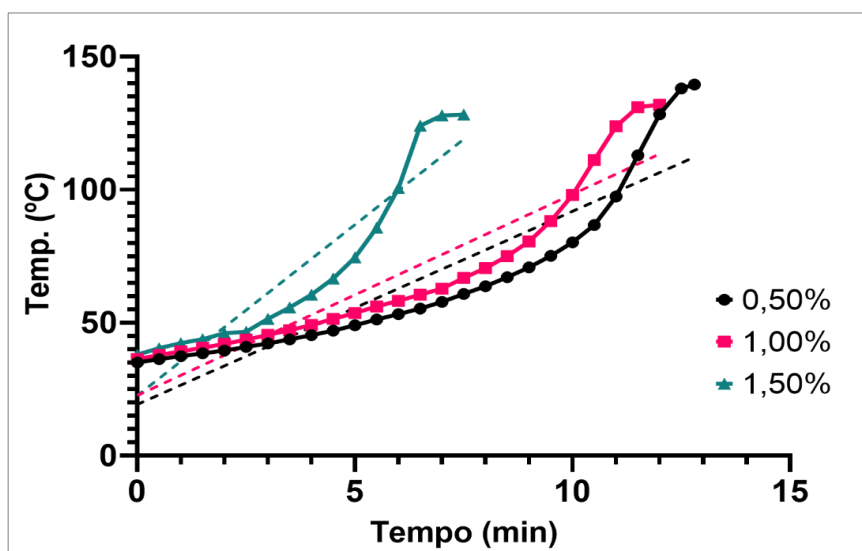
CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise das Temperaturas no Ponto de Gel até o Pico Exotérmico do Polímero em Função do Tempo

O Gráfico 1 exhibe graficamente a temperatura do polímero em função do tempo nas três concentrações de octato de cobalto (0,5%, 1,0% e 1,5%). Para a concentração de 0,5% (PI05), o pico Exotérmico ocorreu aos 138 °C em 12,5 minutos (a partir deste momento, pouco a temperatura variou), enquanto para a concentração de 1,0%, este ponto ocorreu mais cedo, aos 131°C e 11,5 minutos, e na concentração de 1,5%, ocorreu aos 124 °C e 6,5 minutos, quase metade do tempo verificado na concentração de 1,0%. As linhas tracejadas indicam a aproximação linear das três concentrações, obtida por equações de regressão, permitindo ter uma ideia geral da inclinação destas retas. Observa-se claramente uma maior inclinação da aproximação linear de temperatura na concentração de 0,5%. Em resumo, uma maior concentração de octato de cobalto resultou em menor tempo em que a temperatura máxima é alcançada.

Gráfico 1 - Temperatura dos Polímeros em Função do Tempo nas Diferentes Concentrações de Octato de Cobalto.



(---) As linhas tracejadas indicam a aproximação linear via equação de regressão.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O poliéster é acompanhado de reações de polimerização e mudanças reológicas, as quais mudam drasticamente as propriedades finais do compósito. O processo de cura está associado diretamente pela geração de calor. A polimerização descontrolada pode causar grande variação térmica, e conseqüentemente, causar defeitos microscópicos na estrutura da rede na fase matriz e defeitos macroscópicos, como bolhas (REIS, 2016). Esses resultados enfatizam a importância do controle preciso das condições de cura, especialmente em processos industriais nos quais a qualidade e a integridade do material final são fundamentais, além disso, a observação de que a formulação PI05 atingiu temperaturas de pico exotérmico mais elevadas, sugerindo a necessidade de pesquisas mais aprofundadas sobre as relações entre a quantidade de acelerador de octato de cobalto, a taxa de reação e as propriedades finais do polímero curado, em especial as que tangem as suas propriedades mecânicas e térmicas (BAGGIO, 2021; REIS, 2016).

Ao que tange a análise das inclinações das retas de aproximação linear nas três concentrações, obtidas por meio de equações de regressão, é particularmente esclarecedora. Nota-se claramente que a concentração de 0,5% de octato de cobalto apresentou a maior inclinação na aproximação linear da temperatura em função do tempo. Isso sugere que a presença de uma maior quantidade de octato de cobalto acelera significativamente o processo de cura das resinas de poliéster isoftálico. E essa observação está em concordância com as conclusões de estudos anteriores, como os de De Azevedo (2019) e Da Silva (2023), que destacam o papel acelerador desempenhado pelo octato de cobalto em reações de polimerização. A presença do octato de cobalto como catalisador favorece a formação de ligações covalentes de maneira mais rápida e eficiente, levando a um aumento na taxa de cura das resinas.

No entanto, vale ressaltar que, embora uma maior concentração de octato de cobalto resulte em tempos de cura mais curtos, é necessário equilibrar essa aceleração com a necessidade de controlar a reação de polimerização. O aumento descontrolado da concentração de octato de cobalto pode acelerar a reação de forma excessiva, levando a variações térmicas abruptas que, como observado nas referências de Reis (2016), Janices & Katime (2014) e Castro (2003), podem resultar em defeitos microscópicos e macroscópicos na estrutura da matriz polimérica. Portanto, a otimização da concentração de octato de cobalto nas resinas de poliéster isoftálico deve levar em consideração não apenas a eficiência do processo de cura,

mas também a qualidade e a integridade das propriedades mecânicas do material final. A busca por um equilíbrio adequado entre esses fatores é essencial para aplicações industriais bem-sucedidas.

A Tabela 2 resume as três equações de regressão obtidas como aproximação linear da tendência da temperatura no decorrer do tempo. A inclinação da reta indica como a variável temperatura se altera conforme prossegue o tempo. Quanto maior a inclinação, mais um determinado avanço no tempo resulta em alteração da temperatura. Observa-se que, de fato a inclinação da reta para a concentração de 0,5% foi maior, de 12,85 unidades. O p-valor indica se esta inclinação difere significativamente de zero, sendo ele altamente significativo ($p < 0,001$) nos três casos.

Tabela 3 - Resumo da análise de regressão para o comportamento linear (aproximado) da temperatura nos ensaios com diferentes níveis de Octato de Cobalto.

Regressão Linear	Modelo 0,50%	Modelo 1,00%	Modelo 1,50%
Inclinação da reta	7,26	7,57	12,85
P-valor	<0,001	<0,001	<0,001
AICc	144,6	125,3	84,8

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A análise dos resultados obtidos na Tabela 1 revela informações importantes sobre a influência da concentração de octato de cobalto na temperatura durante o processo de cura da resina de poliéster isoftálico. A regressão linear foi uma abordagem adequada para avaliar a tendência da temperatura com o passar do tempo e, conseqüentemente, a eficácia do acelerador de cobalto nesse processo. Observe-se que a orientação da reta para a concentração de 0,5% de octato de cobalto foi maior, registrando 12,85 unidades. Esse valor indica que a temperatura aumenta de forma mais acentuada à medida que o tempo avança nessa concentração. Essa descoberta sugere que uma maior quantidade de octato de cobalto acelera significativamente o processo de cura da resina.

Esse resultado está em consonância com os achados de estudos anteriores de Barbosa *et al.* (2018) e Janices & Katime (2014), que destacaram a influência positiva do octato de cobalto na velocidade de polimerização das resinas de poliéster. Além

disso, o p-valor altamente significativo ($p < 0,001$) em todos os casos reforça a validade estatística dessas diferenças nas inclinações das retas. Isso indica que a especificação da reta para a concentração de 0,5% difere significativamente de zero, com um alto grau de estatística. Paralelamente, o AICc, um sorteio de informação de Akaike corrigido, também foi calculado para avaliar a qualidade do ajuste das regressões aos dados experimentais. Observe-se que o modelo com a concentração de 1,50% de octato de cobalto apresentou o menor valor de AICc (84,8), indicando um bom ajuste desse modelo aos dados. Isso indica que, embora a especificação da reta para essa concentração seja a maior, o modelo em si é o mais adequado para descrever a tendência observada. Com isso, através desta análise, os resultados demonstram que a concentração de octato de cobalto influencia de forma significativa a temperatura durante o processo de cura da resina de poliéster isoftálico. Isto posto, a concentração de 0,5% mostrou-se particularmente eficaz em acelerar o processo de cura, conforme indicado pela maior especificação da reta. No entanto, o modelo com a concentração de 1,50% apresentou o melhor ajuste aos dados, apresentando uma interação complexa entre a concentração do acelerador e a temperatura durante o processo de cura.

Em seguida, foram obtidas as probabilidades de que cada duas inclinações da reta sejam iguais, com base no critério de informação de Akaike corrigido (AICc) (Tabela 2). A probabilidade de que as inclinações da reta sejam iguais para a concentração de 0,5% versus 1,00% foi de cerca de 76%, logo, assume-se que elas são iguais estatisticamente. Ao contrário, as probabilidades das inclinações 0,5% e 1,50%; e, 1,0% e 1,5% serem iguais são baixas, então assume-se que, estatisticamente, a inclinação da reta para a concentração de 0,5% foi estatisticamente maior.

Tabela 4 - Probabilidades de igualdade entre as inclinações de reta para as três equações de regressão relativas aos ensaios com diferentes níveis de octato de cobalto.

Inclinações	Probabilidade de as Inclinações serem iguais
0,50% versus 1,00%	76,27%
0,50% versus 1,50%	0,61%
1,00% versus 1,50%	0,41%

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na análise e discussão das probabilidades de igualdade entre as inclinações das retas, conforme apresentada na Tabela 3, fornece insights adicionais sobre a influência da concentração de octato de cobalto em taxas de aumento de temperatura durante o processo de cura da resina de poliéster isoftálico. A probabilidade de que as inclinações das retas sejam iguais para uma concentração de 0,5% versus 1,00% foi de aproximadamente 76,27%. Isso indica que, estatisticamente, não há diferença significativa entre as inclinações das quantidades dessas duas concentrações. Esse resultado sugere que, em termos de taxas de aumento de temperatura, essas duas concentrações de octato de cobalto podem ser consideradas equivalentes.

Por outro lado, as probabilidades das inclinações para 0,5% e 1,50%, assim como 1,0% e 1,50%, são iguais são baixas, com valores de 0,61% e 0,41%, respectivamente. Isso sugere que, estatisticamente, a especificação da reta para a concentração de 0,5% é significativamente maior do que as inclinações observadas para as concentrações de 1,50% e 1,0%. Essa diferença nas inclinações das retas reflete a influência significativa da concentração de octato de cobalto na taxa de aumento de temperatura. Concentrações mais elevadas desse acelerador resultaram em taxas de aumento de temperatura mais baixas, o que está alinhado com os resultados da pesquisa de Reis (2016) e Janices & Katime (2014). Portanto, os resultados desta análise estatística reforçam a importância da concentração de octato de cobalto como um fator determinante na cinética de cura da resina de poliéster isoftálico. A escolha da concentração acordada desse acelerador pode ter um impacto significativo na taxa de aumento de temperatura durante o processo de cura, o que, por sua vez, afeta a eficácia da polimerização e as propriedades finais do material composto.

4.2. Análises de Espessura do Corpo de Prova em Diferentes Concentrações de Octato de Cobalto

Em seguida, foram analisadas as quintuplicatas da espessura do corpo de prova e comparadas entre os três tratamentos aplicados. Conforme se pode observar, na Tabela 4, a média da espessura foi de $3,17 \pm 0,17$ na concentração de 0,5%,

enquanto nas concentrações de 1,0% e 1,5% as médias foram similares ($2,38 \pm 0,45$ e $2,30 \pm 0,23$, respectivamente). A ANOVA foi significativa ($p=0,001$), indicando que pelo menos dois grupos diferem significativamente. A análise de comparações múltiplas (cada dois tratamentos comparados entre si), mostrou que “0,50%” foi significativamente superior a “1,00%” ($p=0,004$) e “0,50%” foi significativamente superior a “1,50%” ($p=0,002$).

Tabela 5 - Comparação da espessura dos corpos de prova (em quintuplicata) conforme a concentração de octato de cobalto em mm.

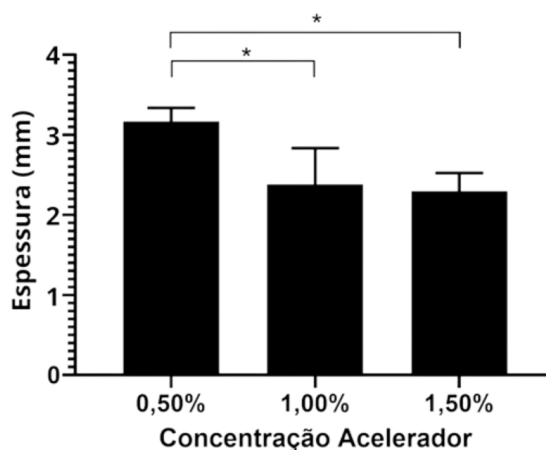
Variável	0,50% (n=5)	1,00% (n=5)	1,50% (n=5)	p-valor
Espessura				0,001
Mínimo	2,99	2,01	1,96	
Máximo	3,43	3,00	2,47	
Mediana	3,11	2,16	2,42	
Média \pm DP	$3,17 \pm 0,17$	$2,38 \pm 0,45$	$2,30 \pm 0,23$	

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Múltiplas comparações significativas: “0,50%” versus “1,00%” ($p=0,004$), “0,50%” versus “1,50%” ($p=0,002$). As variáveis numéricas são representadas como média \pm desvio padrão. Foi utilizado o teste ANOVA.

Em complemento o Gráfico 2, a seguir, exhibe esta comparação entre os três ensaios com níveis diferentes de octato de cobalto.

Gráfico 2 - Comparação da espessura dos corpos de prova (em quintuplicata) conforme a concentração de octato de cobalto.



O asterisco indica diferenças significativas entre os grupos.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

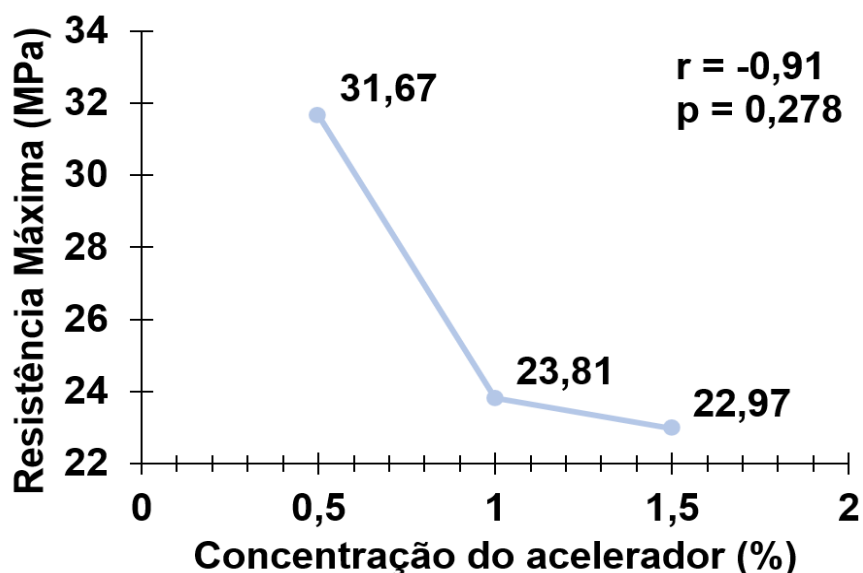
Os resultados da análise da espessura dos corpos de prova exibem informações relevantes sobre como a concentração de octato de cobalto afeta não apenas as propriedades térmicas, mas também as características físicas dos materiais poliméricos. A comparação entre as concentrações de 0,5%, 1,0% e 1,5% de octato de cobalto mostrou diferenças significativas na espessura dos corpos de prova, como indicado pela ANOVA.

As diferenças encontradas na variação da espessura média, nos 3 grupos (0,5%, 1,0% e 1,5%), analisadas pelas quintuplicatas dos corpos de prova, são um reflexo direto da concentração de octato de cobalto no processo de cura da resina de poliéster isoftálico. A análise estatística revelou que a diferença nas médias de espessura entre os grupos é estatisticamente significativa ($p=0,001$), indicando que pelo menos dois dos grupos mudaram significativamente em relação à espessura dos corpos de prova. Uma análise de comparações múltiplas revelou que esses resultados sugerem que uma maior concentração de octato de cobalto na resina de poliéster isoftálico está associada a uma diminuição na espessura dos corpos de prova. Sendo essa diminuição na espessura provavelmente atribuída a uma otimização da polimerização devido à presença de uma maior quantidade de acelerador. Essa circunstância pode resultar em uma maior contração volumétrica durante a cura, o que, por sua vez, leva à redução na espessura dos corpos de prova. Os resultados deste estudo ressaltam a importância de se considerar não apenas as propriedades mecânicas, mas também as características dimensionais ao projetar materiais poliméricos para aplicações específicas. Portanto, a análise da espessura dos corpos de prova fornece insights valiosos sobre como a concentração de octato de cobalto influencia não apenas as propriedades térmicas, mas também as características físicas dos compostos de resina de poliéster isoftálico.

4.3. Testes de Resistência Mecânica em Corpos de Prova com Diferentes Concentrações de Octato de Cobalto

Na mesma senda, pode se observar que o Gráfico 3 exibe a resistência máxima mecânica em função das concentrações de acelerador. A maior resistência ocorreu na concentração de 0,5% (31,7 MPa) e a menor ocorreu na concentração de 1,5% (22,97). O coeficiente de correlação foi de -0,91, ou seja, uma correlação fortemente negativa. Quanto mais próxima de -1, mais negativa foi a correlação, ou seja, quanto maior foi a concentração, menor foi a resistência máxima. O p-valor não significativo ($p=0,278$) indica que esta correlação, porém, não diferiu significativamente de zero.

Gráfico 3 - Relação entre resistência mecânica e concentração do acelerador octato de cobalto.



r: coeficiente de correlação de Pearson.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

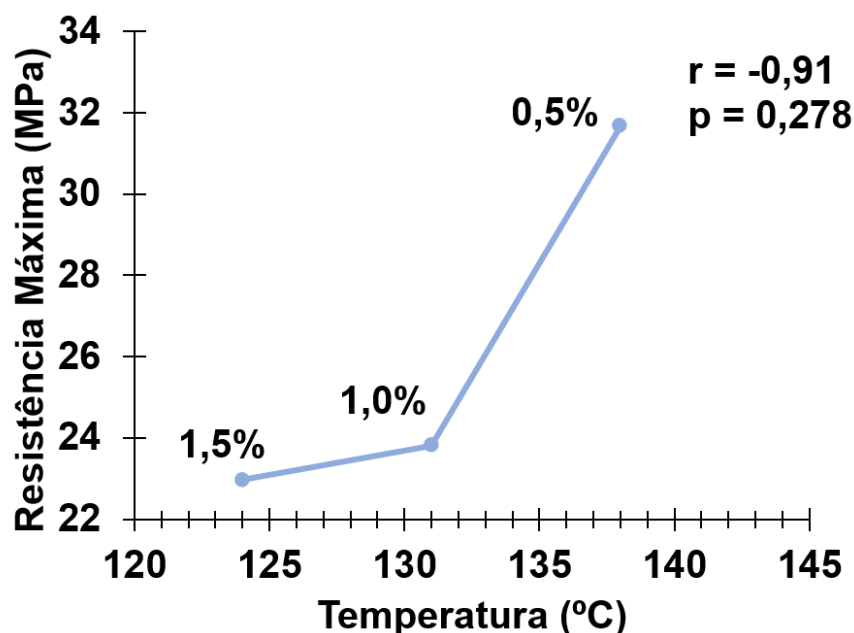
Ao analisar a resistência mecânica máxima em relação às concentrações de acelerador de octato de cobalto insights essenciais foram observados, principalmente sobre como a variação da quantidade de acelerador afeta as propriedades mecânicas das resinas de poliéster isoftálico, tal qual os achados de Janices & Katime (2014). Os resultados indicam que a concentração do acelerador exerceu uma influência significativa na resistência mecânica dos compostos. E se pode observar que a maior resistência mecânica foi alcançada com 31,7 MPa (0,5%), enquanto a menor resistência foi registrada com apenas 22,97 MPa (1,5%). Essa variação substancial na resistência mecânica demonstra claramente que a quantidade de acelerador desempenha um papel crucial na determinação das propriedades mecânicas do

material. O coeficiente de correlação (r) de $-0,91$ indicando uma correlação à medida que a concentração do acelerador aumenta, a resistência mecânica tende a diminuir. E, embora, o coeficiente de correlação (r) seja altamente negativo, o p -valor não atingiu a significância estatística ($p=0,278$). Esse achado pode ser atribuído ao número relativamente pequeno de pontos de dados utilizados na análise. No entanto, a forte tendência de correlação (r) negativa entre a concentração do acelerador e a resistência mecânica é evidente. Fazendo com que esta descoberta, ainda assim, seja fundamental para o desenvolvimento de compostos de resina de poliéster isoftálico com propriedades mecânicas específicas. Pois controlando a concentração do acelerador de octato de cobalto, durante o processo de fabricação, seja uma estratégia viável e eficaz para ajustar as características mecânicas do material final. Isso pode ser especialmente importante em aplicações, nas quais a resistência mecânica é uma consideração crítica.

4.4. Testes de Resistência Mecânica e os Picos Exotérmicos do Polímero

O Gráfico 4 exibe a resistência máxima mecânica em função da temperatura. A maior resistência ocorreu na concentração de $0,5\%$ ($31,67$ Mpa) e 138°C , enquanto na concentração de $1,0\%$ a resistência foi $23,81$ MPa em 131°C e na concentração de $1,5\%$ a resistência máxima foi $22,97$ Mpa e a temperatura foi 124°C . O coeficiente de correlação foi de $0,97$, ou seja, uma correlação fortemente positiva. Quanto mais próxima de 1 , mais positiva é a correlação, ou seja, quanto maior foi a resistência máxima, maior também foi a temperatura. O p -valor não significativo ($p=0,152$) indica que esta correlação, porém, não diferiu significativamente de zero.

Gráfico 4 - Relação entre temperatura final e resistência mecânica máxima.



r: coeficiente de correlação de Pearson.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ao se analisar a relação entre a resistência mecânica máxima e a temperatura final se observam percepções significativas sobre como a variação da concentração do acelerador de octato de cobalto afeta a estabilidade térmica e as propriedades mecânicas das resinas de poliéster isoftálico. Os resultados indicam que a concentração de acelerador influenciou a resistência máxima mecânica, e as variações substanciais nos resultados da resistência mecânica em relação à temperatura final demonstraram claramente a influência da quantidade de acelerador na estabilidade térmica e nas propriedades mecânicas do composto.

O coeficiente de correlação (0,97) apontou para uma especificação especialmente positiva entre a temperatura final e a resistência máxima mecânica. Significando que, à medida que a temperatura final aumentou, a resistência mecânica também tendeu a aumentar. Embora este coeficiente seja altamente positivo, o p-valor não atingiu a significância estatística ($p=0,152$). Essa não significância estatística pode ser atribuída ao número relativamente pequeno de pontos de dados utilizados na análise. No entanto, a forte tendência de correlação positiva entre a temperatura final e a resistência mecânica é evidente.

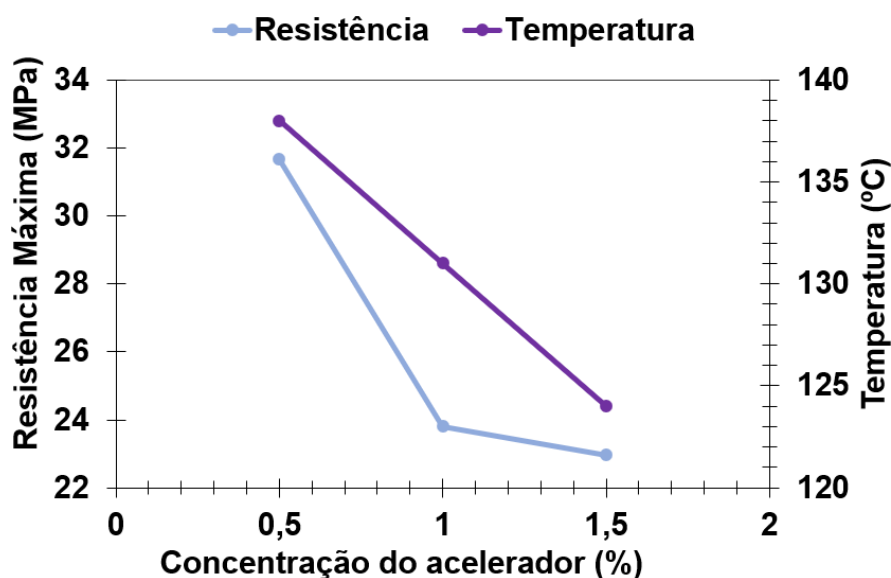
Isto posto, esses resultados têm implicações importantes no processo de fabricação de compostos de resina de poliéster isoftálico. A variação da concentração do acelerador pode ser usada estrategicamente para ajustar as propriedades

mecânicas e a estabilidade térmica do material, dependendo das necessidades específicas de uma aplicação.

4.5. Os Insights entre Resistência Mecânica, Temperatura e Octato de Cobalto

O Gráfico 5 revelou a relação concomitante entre todos os atributos mais proeminentes analisados nesta pesquisa: resistência máxima mecânica, temperatura e concentrações do acelerador (0,5%, 1,0% e 1,5%). Sugerindo que a maior resistência mecânica foi alcançada quando se associou a menor contração de octato de cobalto (0,5%) ao poliéster e se obteve a maior temperatura mensurada. Paralelamente, a 138°C, o grupo de menor concentração de octato de cobalto (0,5%), atingiu o maior pico exotérmico. O que se infere que, para se atingir o melhor custo-benefício, ao que tange a resistência mecânica e análise dos picos exotérmicos, deve se usar a menor concentração de octato de cobalto (0,5%). Dedução indicada pelas correlações analisadas nos outros gráficos anteriores do experimento.

Gráfico 5 - Relações entre resistência mecânica máxima; temperatura e concentrações do acelerador (0,5%, 1,0% e 1,5%) usados.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os dados deste gráfico, apresentado nesta pesquisa, desvelou uma relação intrigante e altamente relevante entre os parâmetros majoritários analisados nesta

pesquisa. Esses resultados são fundamentais para a compreensão dos efeitos da variação do octato de cobalto na resina de poliéster isoftálico. Evidenciando que existe uma correlação substancial entre a resistência mecânica e a temperatura, e sugerindo que a temperatura desempenha um papel crítico na obtenção de resistência mecânica superior no material. Sendo importante notar que essa associação entre temperatura e resistência mecânica pode ser explicada pelos processos de cura e polimerização da resina, que são influenciados pela temperatura. Nesse sentido, outros estudos, como o de Reis (2016), Janices & Katime (2014) e Castro (2003), destacaram a importância da temperatura no processo de cura de resinas de poliéster. Além disso, se observou que o grupo com menor concentração de octato de cobalto (0,5%) atingiu o maior pico exotérmico (138°C). Sendo esse pico exotérmico associado às reações de cura da resina e à liberação de calor durante esse processo. Esse achado corrobora a noção de que a temperatura elevada pode acelerar as reações químicas de cura, resultando em uma maior resistência mecânica. Esta observação está em consonância com o estudo de Janices & Katime (2014) e Castro (2003), que demonstrou como o aumento da temperatura pode acelerar a reação de cura em resinas de poliéster. Ademais, a utilização da menor concentração de octato de cobalto (0,5%) proporcionou um equilíbrio adequado entre a taxa de cura, resistência mecânica e exotermicidade, resultando em um material com desempenho superior. Isto posto, esta pesquisa não apenas lança luz sobre a influência do acelerador de octato de cobalto nas propriedades da resina de poliéster isoftálico, mas também fornece informações valiosas para a otimização do processo de fabricação desses materiais, visando a maximização da resistência mecânica e a minimização dos custos associados. As descobertas aqui apresentadas são fundamentais para o avanço da engenharia de materiais poliméricos e podem encontrar aplicação em diversas indústrias, desde a automobilística até a aeroespacial. Portanto, esta pesquisa contribui significativamente para o desenvolvimento de materiais mais eficientes e econômicos, alinhando-se com as demandas da indústria moderna por inovação e sustentabilidade.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa investigou a influência da variação da quantidade de octato de cobalto na resina de poliéster isoftálico, abordando tanto o comportamento térmico quanto as propriedades mecânicas desses materiais e com base nas análises realizadas e nos resultados obtidos, pode-se chegar algumas conclusões relevantes. Primeiramente, a concentração de octato de cobalto mostrou ter um impacto significativo na cinética de cura da resina de poliéster isoftálico, já que aumento da quantidade de acelerador indicada pelo fabricante não se mostrou efetiva. Na qual se observou que uma maior concentração acelerava o processo de cura, reduzindo o tempo necessário para atingir a temperatura máxima. No entanto, essa aceleração precisa ser cuidadosamente equilibrada, uma vez que concentrações excessivamente altas podem levar a variações térmicas abruptas e, conseqüentemente, a defeitos microscópicos e macroscópicos na matriz polimérica, e conseqüentes menor resistência a tração. Em relação à temperatura de cura, observou-se uma correlação positiva significativa entre a temperatura final e a resistência mecânica. Isso sugere que uma temperatura mais elevada durante o processo de cura pode resultar em uma resistência mecânica superior no material final. No entanto, é importante notar que essa associação precisa ser gerenciada com cuidado, considerando as implicações para a estabilidade térmica e o custo do processo. Já a análise estatística revelou que a concentração de octato de cobalto também afetou a espessura dos corpos de prova, com concentrações mais elevadas resultando em corpos de prova mais finos. Isso pode ser explicado pela contração volumétrica que ocorre durante o processo de cura com concentrações mais altas do acelerador. Ademais, a correlação, entre a resistência mecânica, a temperatura e a concentração do acelerador, foi demonstrada, ao exibir uma maior resistência mecânica alcançada com a menor concentração de octato de cobalto (0,5%) e a temperatura mais elevada. Isso sugere que a otimização da concentração de octato de cobalto pode resultar em materiais com melhor desempenho mecânico e menor custo de produção. Logo, esta pesquisa oferece aprendizados valiosos sobre como a quantidade de octato de cobalto afeta as propriedades térmicas e mecânicas das resinas de poliéster isoftálico. Essas

descobertas têm implicações significativas no desenvolvimento de materiais poliméricos mais eficientes e econômicos, com aplicações potenciais em várias indústrias. Além disso, destacam a importância de um equilíbrio preciso entre a concentração de acelerador, a temperatura de cura e as propriedades finais do material, para atender às demandas da indústria moderna por inovação e sustentabilidade. Portanto, este estudo contribui substancialmente para o avanço da engenharia de materiais poliméricos e oferece uma base sólida para futuras pesquisas nessa área.

REFERÊNCIAS

1. AZIZ, S. H. et al. Modified polyester resins for natural fibre composites. *Composites Science and Technology*, Barking, v. 65, n. 3-4, p. 525-535, 2005.
2. Callister, William D., 1940 – *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. 10 ed. Rio de Janeiro, 2020.
3. CANEVAROLO Jr, S.V. *Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. 2. ed. rev. e amp. São Paulo: Artliber Editora, 100p., 2006.
4. COSTA, D. S. et al. Laminados de matriz polimérica e fibras de bambu contínuas e alinhadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2015, São Paulo. Anais... São Paulo: Blucher, 2015.
5. MOREIRA, W. *Compósitos I: materiais, processos, aplicações, desempenhos e tendências*. São Paulo: ABMACO, 2008.
6. SILAEX. *Poliéster insaturado*. 2015. Disponível em: <<http://www.silaex.com.br/poli%C3%A9ster.htm>>. Acesso em: 24 dez. 2018.
7. RUBIO, M. V. A. *Formulación y curado de resinas fenol-formaldehído tipo resol con substitución parcial del fenol por lignosulfonatos modificados*. Tese de doutoramento, Universidade Complutense de Madrid, Espanha, 2002.
8. REIS, L. R. *Obtenção e caracterização de compósitos de resina poliéster insaturada moldados pelo processo de infusão*. Dissertação (mestrado profissional). Programa de pós-graduação em engenharia de materiais. Universidade Federal de Itujabá, Itujabá, 2016.
9. RECHHOLD. *RESIN - Manufacturer in Brazil*. Tire. Disponível em: <http://www.rechhold.com> Acesso em: 18 oct. 2018.
10. BUSS, A. H. *Reciclagem de pneus em fim de vida visando a fácil transferência de tecnologia*. Pós-graduação em engenharia de produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.
11. DA SILVA, W.R. *Influência da Adição de Resíduo de Calcário em um Compósito de Matriz Polimérica Isoftálica: Obtenção e Caracterização*. Trabalho de

Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará. 2023.

12. ALMEIDA, L.R. Reaproveitamento do Resíduo de Minério de Ferro em Compósitos de Matriz Polimérica. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Materiais. Ananindeua, da Universidade Federal do Pará. 2020.

13. AZEVEDO, A.C. Influência da incorporação de argila e tecidos de fibra de juta (*Corchorus capsularis*) nas propriedades mecânicas e de inflamabilidade de compósitos poliméricos. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Materiais, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua. 2019.

14. BARBOSA, K. S. L., MENDES, B. H. A., SANTOS, A. J. G., COSTA, D. S., SOUZA, J. A. S. Compósitos de matriz poliéster isoftálico com carga de resíduo industrial e reforço de fibras naturais curtas. Em 73º Congresso Anual da ABM Week. São Paulo, SP, Brasil. 2018.

15. REIS, L. R. Obtenção e caracterização de compósitos de resina poliéster insaturada moldados pelo processo de infusão. Dissertação (mestrado profissional). Programa de pós-graduação em engenharia de materiais. Universidade Federal de Itujabá, Itujabá, 2016.

16. CALLISTER JR., W. D; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 10ª Ed., Rio de Janeiro: LTC, 2020.

17. LINHARES, J.A; OLIVEIRA, T.L. Análise da Vitamina B12 e do Zinco em Pacientes Submetidos à Cirurgia Bariátrica em um Hospital Privado em Belém do Pará. Trabalho de Conclusão de Curso em Medicina. Centro Universitário do Estado do Pará. Belém, PA. 2022.

18. MELO, E.C.R; CAMILLO, M.O.; MARADINI, G.S.; DIAS JÚNIOR, A.F.; CARREIRA, L.G. BIOCOPÓLÍMEROS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CELULOSE. Dissertação (Engenharia Química). Universidade Federal do Espírito Santo, 2018.

19. BOTELHO, J. A. B., VICENTE, A. A., SANTOS, D., NARDOTO, E., & BEZERRA, F. G. Uso de diferentes catalisadores na síntese de poliuretanos para espumas flexíveis. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, DOI: 10.4322/2176-1523.20191482. 2019.

20. CASTRO, A.J. Resina poliéster: caracterização e estudo das condições de cura e propriedades mecânicas. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Química da Universidade Federal de Santa Catarina. Bacharelado em Química. Florianópolis. 2003.
21. JANICES, B. A., & KATIME, I. Propiedades físicas y mecánicas de sistemas bicomponentes. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 15(6), 376-401. 2014.
22. BAGGIO, A. Estudo da Viabilidade do Emprego de Microesferas de Vidro em Compósitos de Resina Poliéster Insaturada com Base em Suas Propriedades Mecânicas, Físicas e Considerações Econômicas. Tese de Doutorado em Engenharia. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista. 2021.
23. COVISSI, C.R.A.; SANCHEZ, E.M.S. Compósitos de resina de poliéster insaturado, reforçados com fibras derivadas de politereftalato de etileno. DOI: 10.20396/revpibic262018315. *Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP*, 2018.
24. PEREIRA, WARLEY AUGUSTO; CERON, IGOR; SILVA, MATHEUS SOUZA E; FREITAS, MARCOS PAULO CHAVES DE; SILVA, EDSON ROBERTO DA; COSTA, FABÍOLA MEDEIROS DA. Development of polymeric composites reinforced with buriti leaf fiber. *Revista Matéria*, v. 26, n. 1, 2021.
25. PEREIRA, T.G.T. Compósitos produzidos com resina poliéster e fibras de eucalipto tratadas termicamente. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais) - Universidade Federal de Lavras, 2016.
26. RAMÍREZ-PALMA, G.; ALCO CER-MÁRQUEZ, L.F.; ALCÁNTAR-GONZÁLEZ, F.S.; TURATI-RAMÍREZ DE ARELLANO, P.; CRUZ-GÓMEZ, M.J. Resinas poliéster insaturadas a partir de PET de desecho glicolizado: síntesis y caracterización. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 16, núm. 3, pp. 1003-1010. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Distrito Federal, México. 2017.
27. BRANDÃO, L.F.A.; AZEVEDO, A.C.; COELHO, H.C.M.; ROSÁRIO, E.C.; SANTOS, A.J.G.; COSTA, D.S. Capítulo 3 - Compósitos com fibras curtas (sisal e algodão): correlação das dimensões e proporções das fibras nas propriedades mecânicas. In *Engenharia no Século XXI – Volume 3*. Belo Horizonte: Poisson. 2019.