

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DE PROCESSO PRODUTIVO DE ALTA CADÊNCIA APLICÁVEL PARA O SETOR AUTOMOTIVO (MOLDAGEM POR Prensagem A QUENTE) EMPREGANDO MATERIAL DO TIPO PREPREG (SOLVALITE™730)

TECHNICAL-ECONOMIC FEASIBILITY STUDY OF HIGH VOLUME PRODUCTION PROCESS APPLIED TO THE AUTOMOTIVE SECTOR (HOT PRESSING MOLDING) USING PREPREG MATERIAL (SOLVALITE™730)

Liece Rodrigues Junior* E-mail: liece5@hotmail.com

Kleber Lanigra Guimarães* E-mail: kleberlg@ipt.br

*Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo, SP, Brasil.

Resumo: Diferente da indústria aeronáutica, a aplicação de compósitos poliméricos na indústria automotiva exige elevados níveis de produtividade. Neste trabalho foram estudados os fatores temperatura de cura, tempo de ciclo e grau de cura do material prepreg Solvalite 730. Posteriormente estes parâmetros foram utilizados como variáveis de entrada para simular a viabilidade técnico-econômica no processo de manufatura de alta cadência e, como resposta, mediu-se os potenciais benefícios da utilização deles na definição de um processo de manufatura aplicável na indústria automotiva. Fez-se uso da técnica de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) para avaliar os parâmetros de cura do material. O menor tempo encontrado foi de 45,1 s a uma temperatura de 175°C com potencial de redução de custo de energia produtiva de até 50% e uma produtividade de até 332.020 peças por ano. O melhor resultado foi obtido com temperaturas de 150°C e 160°C, tempos de ciclos que variaram entre 202,8 s e 101,8 s com uma capacidade produtiva de 74.100 a 147.000 peças por ano. O custo da matéria-prima foi dominante na composição dos custos do componente. A despesa com manutenção foi diretamente proporcional ao aumento da produtividade bem como a depreciação dos equipamentos em função da taxa de produção.

Palavras-chave: Temperatura. Produtividade. Compósito polimérico. Termorrígido. Pré-impregnado. Custo.

Abstract: Different from the aeronautical industry, polymer composites application in the automotive industry requires high levels of productivity. In this work, was studied temperature factors, cycle time, and material cure degree of Solvalite 730. Subsequently, these parameters were used as an input variable to simulate the technical-economic feasibility in a high-speed manufacturing process and, in response, were measured the potential benefits of using them in a defined manufacturing process to be applied to the automotive industry. The Differential Scanning Calorimetry (DSC) technique was used to assess the material's curing parameters. The lowest time found was 45,1 s at a temperature of 175 °C with potential energy cost reduction of up to 50% and productivity up to 332.020 parts per year. The best result was found with temperatures from 150 °C to 160 °C, cycle times ranging from 202.8 s and 101.8 s with a production capacity of 74,000 to 147,000 pieces per year. The raw material cost was dominant in the components **cost composition. The maintenance expense was directly** proportional to the productivity increase as well as the equipment depreciation as a function of the production rate.

Keywords: Temperature. Productivity. Polymeric composite. Thermoset. Prepreg. Cost.

1 INTRODUÇÃO

A busca por redução na emissão dos gases poluentes originários dos veículos automotivos está se intensificando. A preocupação com os gases de efeito estufa (GEE) e os impactos destes gases no aquecimento global têm crescido exponencialmente. Desta forma, acordos a nível mundial são criados para promover ações de redução das emissões de GEE com o objetivo de mitigar o aumento da temperatura global (*Road Map Tecnológico Automotivo Brasileiro*, 2020)

Em 2018 no Brasil foi criada a lei 13.755, conhecida também como Programa Rota 2030. O objetivo principal foi de incentivar projetos de pesquisa e de desenvolvimento no setor de mobilidade e buscar a modernização a longo prazo por meio de incentivos fiscais. Desta forma, busca-se obter benefícios para a sociedade por meio da eficiência energética e da segurança dos veículos comercializados no país (ROTA 2030, 2020).

Outro programa já consolidado é o PROCONVE – Programa de Controle de Emissões Veiculares, que foi criado pelo CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, com o objetivo de reduzir e controlar a contaminação atmosférica e a emissão de ruídos por fontes móveis estabelecendo, assim, limites máximos de emissão bem como exigências tecnológicas para veículos automotores. Conforme a Tabela 1, o PROCONVE estipulou que até 2031 veículos leves de passageiros e veículos leves comerciais terão que atender o limite máximo de emissão de CO₂ de 30 mg/km (BRASIL, 2018).

Tabela 1 - Limites máximos de emissão de poluentes

PROCONVE				
Ano de implantação	FASE L7		FASE L8	
	Veículos Leves Passageiros (CO ₂ em mg/km)	Veículos Leves Comerciais (CO ₂ em mg/km)	Veículos Leves Passageiros (CO ₂ em mg/km)	Veículos Leves Comerciais (CO ₂ em mg/km)
2024	80	140		
2025	-	-	50	140
2027	-	-	40	110
2029	-	-	30	50
2031	-	-	30	30

Fonte: Adaptado de Brasil (2018).

Desta forma, a indústria automotiva enfrenta desafios como: melhorar a eficiência energética, reduzir os níveis de emissões dos veículos e aumentar a

segurança a custo reduzido. Diante destes desafios, os materiais compósitos poliméricos contribuem com fatores importantes como redução de massa com significativa melhora nas propriedades de aplicação.

Elmarakb (2014), em um estudo de caso em que se avaliou a aplicação de compósitos termoplásticos de estampagem rápida, demonstrou que um tempo de ciclo total de fabricação ideal para atender a altos níveis de produção seria de 60 segundos. Neste estudo também havia o objetivo de adaptar um processo de fabricação que pudesse ser facilmente aplicado à cadeia de suplementos da indústria automotiva, proporcionando economia principalmente nos investimentos de ferramentais. Desta forma, o processo de estampagem a quente foi selecionado, evidenciando que um processo atualmente utilizado para fabricação de peças em aço pode ser utilizado como base para desenvolvimento de peças em compósito.

Milberg (2018) evidenciou os benefícios na utilização de materiais compósitos ao descrever o conceito de uma bandeja de suspensão, que substituiu o conceito anterior fabricado em aço. Com este novo conceito foi possível obter uma redução de peso de 34% além de uma redução de 87% da quantidade de peças.

Inserido nesse contexto, o presente trabalho avaliou os efeitos da temperatura e da taxa de aquecimento na manufaturabilidade de peças fabricadas com materiais compósitos poliméricos. Tal estudo consistiu, de modo conciso, em analisar por meio da técnica de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), os parâmetros de cura da resina epóxi vinil éster *Advalite*TM constituinte do material *Prepeg Solvalite*TM 730 - 26% - EG 1200-300. Após a obtenção dos resultados desta análise, foi simulado um processo de manufatura com o objetivo de identificar e estimar os potenciais benefícios que esses dados podem trazer ao serem considerados para produção de alto volume. Aventou-se a hipótese de que a otimização desses parâmetros poderia resultar em um menor tempo de processamento, e em aumento de produtividade com consequente redução de custo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O material estudado foi o pré-impregnado *Solvalite*TM 730 EG 1200-300, o qual é constituído por 26% em volume da resina epóxi vinil éster *Adevalite*TM.

*Solvalite*TM é o nome da marca de um grupo de compósitos de cura rápida fornecidos pela empresa Solvay. A Figura 2 apresenta o material *Solvalite*TM 730.

Figura 2 - Material *prepreg* *Solvalite*TM 730 EG 1200-300



Fonte: Elaborado pelo autor.

O material *Solvalite*TM 730, foi disponibilizado no formato de fitas unidirecionais *prepreg* com fibras de vidro contínuas. De acordo com Solvay (2017), este produto foi desenvolvido especificamente para atender processos automatizados. Dependendo da temperatura de cura selecionada o tempo de ciclo pode ser de 60 segundos. O tempo de permanência do material dentro da ferramenta é fundamental para a qualidade do produto final. A otimização do processo é necessária e depende da peça e do ferramental. O fabricante sugere alguns parâmetros de processo conforme Tabela 2 e recomenda que a cura seja feita em temperaturas acima de 150° C.

Tabela 2 - Características de processamento do material *Solvalite*TM 730

Temperatura de cura	Tempo de aplicação da pressão baixa	Tempo de aplicação da pressão de alta	Tempo de ciclo total no ferramental
140°C	120 s	360 s	480 s
150 °C	60 s	120 s	180 s
160 °C	25 s	75 s	100 s
170° C	10 s	50 s	60 s

Fonte: adaptado de Solvay (2017).

Materiais compósitos de alto desempenho são aperfeiçoados constantemente e demandam alto nível de pesquisa e desenvolvimento, o que torna o acesso às informações restritas devido ao sigilo industrial.

2.2 Caracterização da cinética de cura

2.2.1 Análise termogravimétrica (TGA)

Uma amostra com 11,3 mg do *prepreg* foi analisada empregando-se a técnica de termogravimetria tendo sido utilizado o equipamento Mettler Toledo TGA/DSC 1, sob atmosfera dinâmica de N₂ (50 mL/min). O aquecimento foi de 10°C/min, de 25°C até 1.000°C, para garantir que toda a fase matriz tenha sido degradada, restando apenas a fase dispersa (fibra de vidro), cujo ponto de fusão ocorre a temperaturas superiores a 1.000°C.

2.2.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

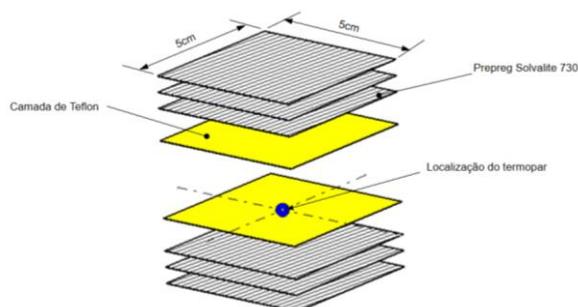
Os ensaios de DSC foram conduzidos para obter as curvas da cinética de cura do material em estudo. Os testes foram realizados no equipamento Mettler Toledo DSC 822e, com porta amostra de alumínio fechado (Al) sob atmosfera inerte de nitrogênio tendo sido estabelecida uma vazão de 50 mL/min. A média de massa total de cada amostra foi estabelecida em 8,0 mg. O processo experimental foi realizado em condições dinâmicas entre $T_{\text{inicial}} = 30^{\circ}\text{C}$ e a $T_{\text{final}} = 300^{\circ}\text{C}$, este intervalo de temperatura foi testado em taxas de aquecimento de 1, 2, 5, 10, 20, 50 e 100°C/min. Com base no modelo matemático da norma ASTM E698, os dados analíticos obtidos deste experimento foram utilizados para o cálculo das curvas da cinética de cura do material em condições isotérmicas nas temperaturas de 150, 155, 160, 165, 170 e 175°C.

2.3 Análise do tempo de obtenção da temperatura de processamento

A análise do tempo de aquecimento do material foi realizada com o objetivo de avaliar o tempo em função da temperatura de processamento do material. Os testes foram realizados em prensa hidráulica Modelo MA 098/A30 com sistema de aquecimento na base superior e inferior. Termopares *Chromel Alumel* tipo “K” modelo: APPA MT-520 foram instalados na região central de cada corpo de prova para monitorar a temperatura, entre o termopar e o material foi aplicado uma camada de manta teflon sem adesivo da marca *Socd* com espessura de 0,13 mm, para evitar danos ao termopar. Os corpos de provas foram produzidos em estrutura

sanduíche com formato quadrangular medindo 5 cm x 5 cm. Os números de camadas avaliados foram de 12, 6 e 2 em temperaturas de 150°C e 170°C. O desenho esquemático da montagem do corpo de prova com 6 camadas é apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Montagem esquemática do corpo de prova em estrutura sanduiche com 6 camadas de material *prepreg*



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4 Análise de custo de processo de produção seriada

Recursos para modelagem de custos são amplamente utilizados para antecipar os preços finais de produção, por meio de provas de conceito previamente produzidas durante a etapa de desenvolvimento, seguindo-se uma metodologia de projeto para manufatura ou *design* para fabricação. Os modelos baseados em *Design for Manufacturing* (DFM) visam simular o processo de fabricação, dividindo-o em várias etapas como, por exemplo, matéria prima, mão-de-obra e ferramentais.

Segundo Kirchain (2001), a modelagem de custo é muito complexa devido ao processo de vincular exaustivamente as consequências econômicas associadas a qualquer empreendimento. É importante ressaltar que uma limitação significativa à precisão dos resultados é o nível de informações de custos disponíveis para cada etapa do processo. Mudanças técnicas afetam diversos elementos do custo do produto, por este motivo é impraticável ou ineficiente modelar todo e qualquer impacto.

Turner e colaboradores (2008) apresentaram um estudo em que o objetivo era produzir uma peça em material compósito para substituir a atual produzida em aço com uma redução de peso de 40% e desempenho estrutural similar. A metodologia aplicada avaliou o processo por meio de uma análise de custo técnico,

que combinou os dados de produção do protótipo em compósito com as estimativas do processo da peça em aço.

Este modelo de custos foi usado neste trabalho como referência para avaliar quais benefícios que a otimização dos parâmetros de cura do material *Solvalite 730* pode gerar durante o processo. Entretanto, foi necessário fazer adaptações pois algumas informações não foram necessárias para o estudo. Os valores também foram estimados, pois a infinidade de fatores, peculiaridades entre mercado, indústrias e processos diversos dificultam o estabelecimento de valores definitivos.

O custo é composto por etapas que somadas irão compor o custo de um componente final. Primeiro foi analisado o valor da matéria-prima por peça produzida, o qual independe do número de peças por ano, que é calculado conforme a Equação (1).

$$M_P = P_m \cdot A \cdot P_e \quad (1)$$

Onde: M_P = matéria-prima (R\$/peça)

P_m = preço da matéria-prima em (R\$/m²);

A = Área total da peça (m²);

P_e = perda de material durante o processo (%);

O custo da mão de obra considerou as etapas do processo, o tempo de cada operação que constitui o processo e o salário base dos operadores conforme a Equação (2).

$$M_O = \sum_{n=1}^{N=\text{processos}} (T_{op} \cdot N_{op} \cdot T_c) \quad (2)$$

Onde: M_O = mão de obra (R\$/peça);

\sum = somatória de todos os processos e colaboradores (un.);

T_{op} = tempo de cada operação por operador (h);

N_{op} = quantidade necessária de operadores para cada etapa do processo (un.);

T_c = taxa colaborador, salário médio de cada operador (R\$/h);

O consumo de energia e o custo devem ser considerados para compor o custo final do setor de operação conforme a Equação (3).

$$CE_t = P \cdot C_u \cdot T_m \quad (3)$$

Onde: CE_t = consumo de energia total (R\$/peça);

P = potência do equipamento (kW);

C_u = custo por unidade (R\$/kWh);

T = tempo de cada operação por máquina (h);

Tendo-se o custo do equipamento dividido pela vida útil, calculada em horas, multiplicado pelo número de peças produzidas por hora, tem-se a depreciação estimada em função de cada peça, conforme a Equação (4).

$$D_p = \frac{C_e}{V_u \cdot P_{rod} \cdot T_p} \quad (4)$$

Onde: D_p = depreciação (R\$/peça);

C_e = custo do equipamento (R\$);

V_u = vida útil do equipamento (h);

P_{rod} = produtividade (peças/h);

T_p = taxa de produção (%);

Este estudo considerou os custos de manutenção em relação ao custo dos equipamentos, em função das premissas adotadas de uso intensivo, o que pode ser calculado conforme a Equação (5). O custo de manutenção por peça varia de acordo com a produtividade anual.

$$M_n = \frac{N_{um} \cdot C_e \cdot T_m}{P_a} \quad (5)$$

Onde: M_n = manutenção (R\$/peça);

N_{um} = número total de equipamentos (un.);

C_e = custo total de equipamentos (R\$);

T_m = taxa de manutenção (% a.a);

P_a = produtividade anual (peças/ano);

O custo do processo foi calculado com base nas informações geradas anteriormente utilizando a referência de Turner *et. al* (2008). O resultado se refere ao custo a ser incluído por peça produzida considerando as variantes do setor onde a peça é fabricada conforme a Equação (6).

$$CP_t = M_O + CE_t + D_P + M_n \quad (6)$$

Onde: CP_t = Custo total do processo (R\$/peça);

M_O = custo de mão de obra (R\$/Peça);

CE_t = custo de energia (R\$/peça);

D_P = depreciação (R\$/peça);

M_n = custos de manutenção (R\$/peça);

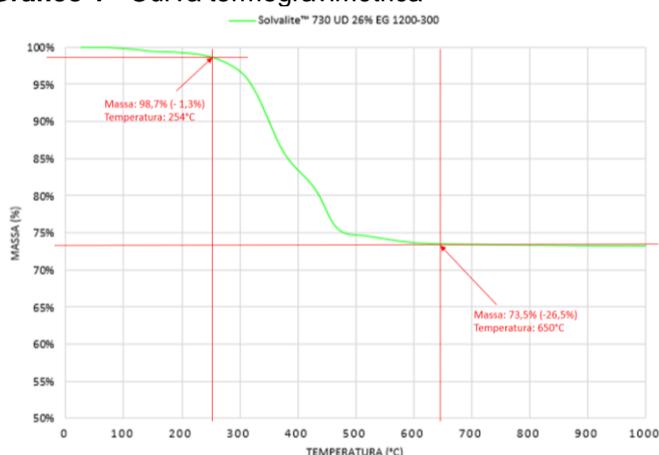
Ao definir os custos que devem ser incluídos no processo, este valor é aplicado em todas as etapas gerando um custo específico por operação. A partir disso o valor aplicado ao volume diário de peças e tempo total de cada operação gera o custo do processo completo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados da Termogravimetria (TGA)

A análise termogravimétrica mostrou que a perda acumulada foi de 1,3% (0,14 mg) durante um intervalo de temperatura de 25°C a 250°C. Isto representa a perda de algum conteúdo volátil do material, porém a integridade do material foi mantida, estabelecendo assim a faixa de temperatura para a realização dos experimentos. Entre as temperaturas de 250°C e 650°C verificou-se o processo de degradação do material polimérico (matriz) e então a perda de massa acumulada atingiu 26,5%. A partir de 650°C a dinâmica de perda de massa diminuiu sensivelmente (ocorrência do platô) e a perda de massa total acumulada atingiu 26,8% uma vez atingida a temperatura máxima de 1.000°C, o que representa o total em massa estimado de resina que constitui a amostra adicional às cinzas geradas pelo processo de decomposição térmica da matriz polimérica. O Gráfico 1, apresenta os resultados da análise de TGA do material.

Gráfico 1 - Curva termogravimétrica



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Aquisição de dados DTA / DSC

Medições para cada taxa de aquecimento foram realizadas com objetivo de identificar as temperaturas de início, pico e término da reação de cura da resina por meio do DSC, conforme ilustrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados das medições DSC em diferentes taxas de aquecimento

Taxa de Aquecimento (°C/min)	T _{início} (°C)	T _{pico} (°C)	T _{final} (°C)
1	98,8	121,2	176,6
2	101,6	127,2	174,4
5	111	134,6	196
10	118,5	141,3	208,2
20	122,7	147,5	210,7
50	129,2	160	227,5
100	146,7	173,3	240

Fonte: Elaborado pelo autor.

A realização de diferentes corridas no DSC empregando diferentes taxas de aquecimento viabilizou o tratamento matemático que habilitou a determinação de dados de conversão em modo isotérmico. De acordo com TA Instruments (2021), o algoritmo de análise do DSC é baseado na equação de Borchardt e Daniels, o qual permite realizar os cálculos de energia de ativação (E_a), fator pré-exponencial (Z), entalpia (dH/dt), ordem da reação (n), constante de velocidade (k).

A teoria de Borchardt e Daniels é complementada com a de Arrhenius, e desta forma a Equação (7) pode ser resolvida por uma regressão linear múltipla da

forma geral da equação: $z = a + bx + cy$ em que dois parâmetros ($d\alpha/dt$ e α) são determinados da reação exotérmica.

$$\ln \left[\frac{d\alpha}{dt} \right] = \ln(Z) - \frac{E_a}{R \cdot T} + n \cdot \ln[1 - d\alpha] \quad (7)$$

Os parâmetros cinéticos são os dados brutos da análise da reação. A curva da cinética de reação foi utilizada para definir os gráficos de conversão e iso-conversão. Desta forma os parâmetros cinéticos determinados experimentalmente para o processo de cura do material do material sob investigação no presente trabalho são apresentados abaixo:

$E_a = 152,48 \text{ kJ/mol}$ (Energia de ativação)

$n = 1$ (ordem da reação)

$k = 3,69 \text{ s}^{-1}$ (constante de velocidade)

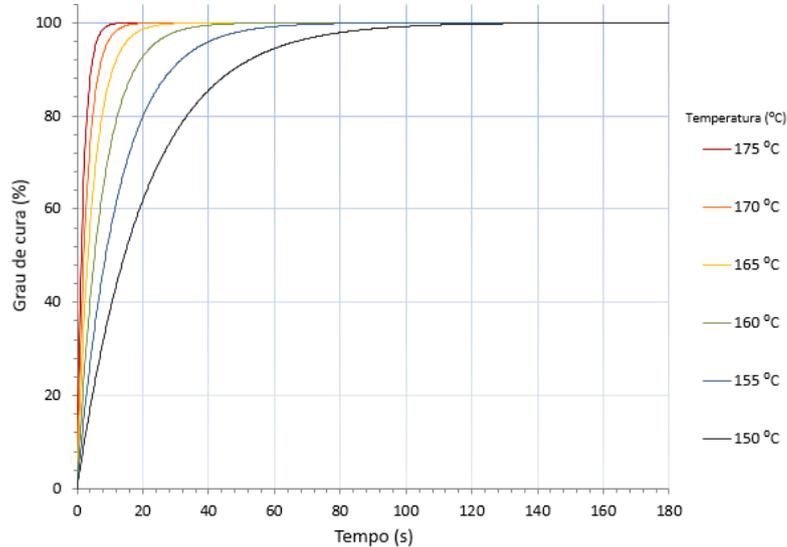
Duas curvas são obtidas da modelagem de Borchardt e Daniels, curvas de conversão e curvas de iso-conversão. Curvas de conversão fornecem a condição de tempo e grau de conversão para uma condição isotérmica específica, já a curva de Iso-conversão indica tempo e a temperatura para um grau de conversão específico.

Os resultados de conversão mostraram que o tempo que o material precisou para alcançar 100% de cura a 170°C é de 20,4 s. Ao reduzir em 5°C , ou seja, processar o material a 165°C observou-se um aumento do tempo em aproximadamente 50% (30,4 s).

Nas análises das curvas isotérmicas foi possível identificar a conclusão do processo de cura pela ocorrência de um platô da curva, que evidencia a desaceleração da cinética de cura do material à medida que o grau de cura avança. Fisicamente esse fenômeno pode ser justificado pela diminuição da mobilidade das cadeias poliméricas a medida que o grau de reticulação aumenta e, por consequência, a frequência de ligações cruzadas se intensificam. Bernath, Kärger e Henning (2016) atribuíram este efeito à temperatura de transição vítrea que aumenta mais rápido que a temperatura de cura e também pela redução dos grupamentos

epóxi livres o que desacelera a reação. Com base nos dados cinéticos, as curvas de conversão são apresentadas no Gráfico 2.

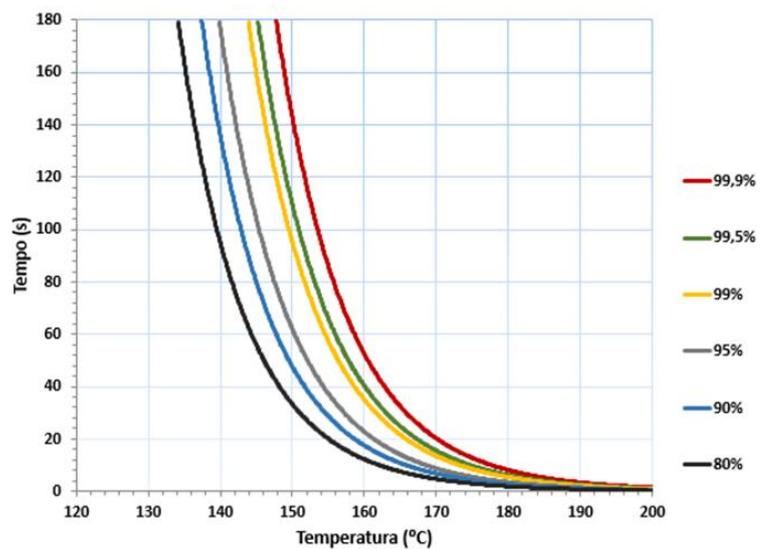
Gráfico 2 - Curvas de conversão



Fonte: Elaborado pelo autor.

As curvas de iso-conversão, são plotadas pelo tempo em função de temperatura e para cada uma das curvas representadas se tem diferentes níveis de conversão (grau de cura). O Gráfico 3 apresenta as curvas de iso-conversão.

Gráfico 3 - Curvas de iso-conversão



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Tempo de aquecimento da temperatura de processamento

O número de camadas afeta diretamente o tempo de aquecimento do material. Para a mesma temperatura de 150°C o tempo aumenta de 25 s para 120 s com uma quantidade de camadas 6x maior. Entretanto o aumento da temperatura também afeta o tempo de aquecimento e reduz o efeito do número de camadas, como pode ser observado na Tabela 4. A mesma relação entre 2 e 12 camadas á 170°C representa uma diferença de 30% do tempo entre elas.

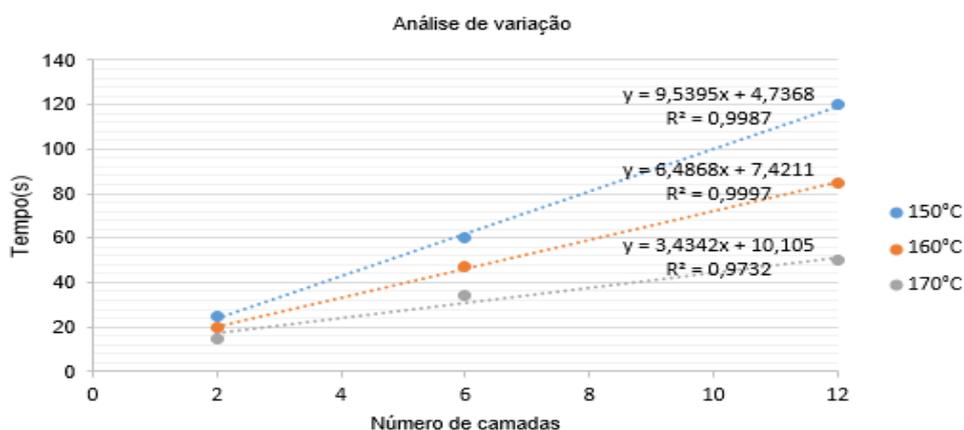
Tabela 4 - Resultados de medição do tempo de aquecimento do material para alcance da temperatura de processamento em função do número de camadas

Temperatura (°C)	Nº de camadas	Tempo (s)
150	2	25
	6	60
	12	120
170	2	15
	6	38
	12	50

Fonte: Elaborado pelo autor.

A linearidade conforme evidenciada no Gráfico 4, demonstrou uma relação existente entre as variáveis tempo e número de camadas que foi independente da temperatura de processamento considerada. Hipótese esta que foi válida ao menos entre os intervalos de temperatura estudados. O ajuste de uma função linear conforme evidenciado viabilizou a extrapolação de dados para a determinação do tempo estimado em função do número de camadas.

Gráfico 4 - Análise comparativa de variação do tempo em função do número de camadas para alcance da temperatura de processamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

A adoção de um valor médio para a condição de temperatura de 160° C foi uma condição assumida (premissa), mas não houve resultado experimental que comprovasse esta situação. Em se tratando de uma estimativa, o eventual erro embutido não foi significativo dada a finalidade de uso do resultado. Adotou-se como premissa a fixação do número de 6 camadas e a função linear entre tempo e temperatura foi aplicada para estimar o tempo conforme o programa de temperatura utilizado na análise de cura em DSC. O objetivo destes dados foi refinar o tempo de processamento do material, os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Tempo de aquecimento até alcance da temperatura de processamento

Temperatura (°C)	N° de camadas	Tempo (s)
150	6	60
155		54,5
160		49
165		43,5
170		38
175		32,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo de aquecimento até o alcance da temperatura de processamento foi adicionado ao tempo de cura dos resultados obtidos em DSC e desta forma se obteve o tempo total do ciclo de cura do material durante o processo de estampagem. A Tabela 6 apresenta o tempo de ciclo total considerando uma estrutura sanduíche de 6 camadas para cada temperatura.

Tabela 6 - Ciclo total de processamento do material com 6 camadas

Temperatura (°C)	Tempo de aquecimento (s)	Tempo de cura DSC (s)	Ciclo total (s)
150	60	142,8	202,8
155	54,5	86,4	140,9
160	49	52,8	101,8
165	43,5	32,4	75,9
170	38	20,4	58,4
175	32,5	12,6	45,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 7 apresenta o comparativo entre os tempos de ciclo especificados pelo fabricante do material e os tempos identificados nos testes. Observou-se que a variação entre os dados identificados no estudo e as informações especificadas pelo

fornecedor foi de 12% para temperatura de 150°C, já para as temperaturas de 160°C e 170°C a variação média foi de apenas 2%.

Tabela 7 - Comparativo entre tempos de ciclo

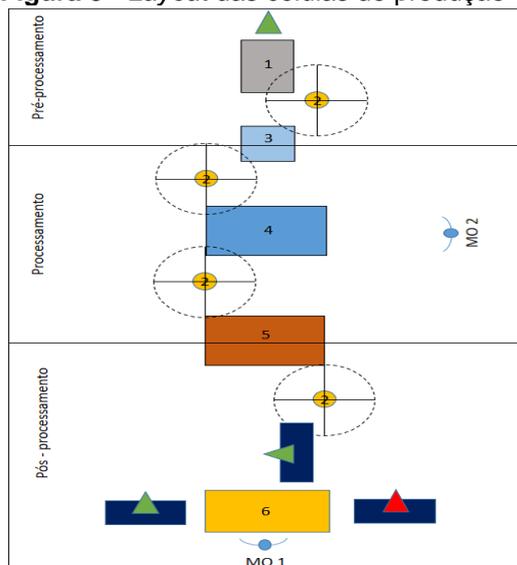
Temperatura	Tempo de ciclo (Sol/vay)	Tempo de ciclo Processo	Variação (%)
150°C	180 s	202,8 s	12,2
160°C	100 s	101,8 s	1,8
170°C	60 s	58,4 s	2,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Viabilidade técnica-econômica de produtividade

Para o estudo foi considerado um processo de fabricação automatizado devido ao alto volume de produção. O conjunto de células da linha de produção é composto por uma máquina de corte CNC (1), quatro robôs de manuseio do material (2), uma esteira de transporte (3), uma prensa hidráulica (4), uma máquina de corte a água (5), uma mesa com dispositivos de inspeção (6), áreas de estoque intermediário para ajuste do fluxo de produção representados por triângulos verdes, e o estoque de itens não-conformes pelo triângulo vermelho. Também foi considerada a intervenção de dois operadores (MO1, MO2), para realizar a inspeção dos itens produzidos e o monitoramento da célula, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Layout das células de produção



Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo de processamento durante a conformação da peça foi baseado na análise da cinética de cura, e esta foi a variável que foi utilizada para o estudo de produtividade. As demais operações foram estimadas para compreender o tempo de ciclo do processo completo. A Tabela 8 apresenta o tempo de cada operação e destaca a OP40 que é referente à cura do material a 150°C.

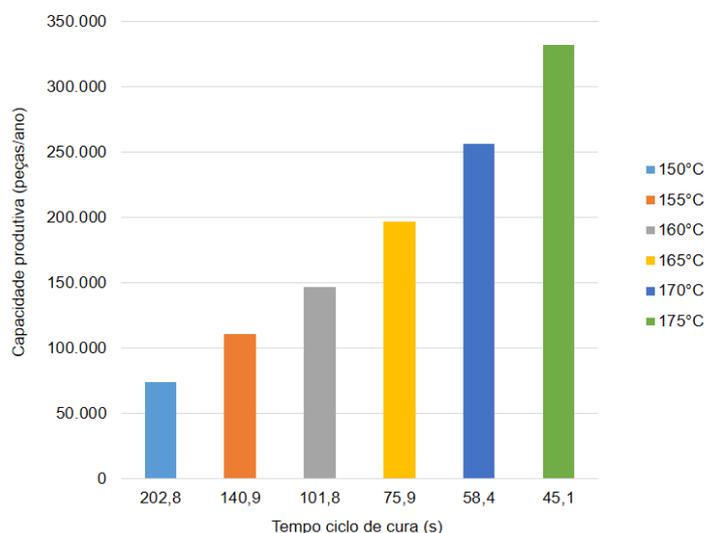
Tabela 8 - Tempo de ciclo por operação

OP	Etapas	Tempo ciclo (s)	Tempo ciclo (h)
10	Corte 6 camadas 780x320 (250mm/s)	30	0,008
20	Empilhamento camadas (robô)	20	0,006
30	Transferência laminado (robô)	6	0,002
40	Estampagem e cura (prensa hidráulica)	202,8	0,056
50	Transferência peça curada (Robô)	6	0,002
60	Corte a água (perímetro = 650mm)	80	0,022
70	Transferência peça (robô)	6	0,002
80	Inspeção final manual	120	0,033

Fonte: Elaborado pelo autor

A capacidade produtiva depende da variação do tempo de processamento do material na estampagem. Quanto maior o tempo de ciclo de cura do material, menor será o volume de produção, contudo a qualidade do produto final deve ser considerada pois, processos muito rápidos podem gerar vazios que resultariam em problemas na peça. Considerando 2 turnos de 8 h, o Gráfico 5 apresenta a capacidade produtiva anual em diferentes tempos de ciclo do material.

Gráfico 5 - Volume de produção anual em diferentes tempos de cura



Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo de análise de custos utilizou como base o estudo de Turner *et. al* (2008). O objetivo desta análise foi avaliar o custo do processo completo, que se inicia pelo cálculo de matéria-prima por peça com base na Equação 13. O preço do material *Solvalite 730* foi estimado em R\$ 190,92/m² (US\$ 41,05 /m²), também foi considerada uma peça com um *blank* retangular medindo 740 mm x 380 mm e espessura de 4,8 mm. Desta forma, tem-se uma peça com área total aproximada de 3,36 m² e uma perda de matéria-prima durante o processamento de 2%. O custo total da matéria-prima por peça foi de R\$ 654,32 conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Custos de matéria prima Solvalite 730

Material	Custo unitário	Área da peça(*)	Perda		Custo por peça
<i>Prepeg Termofixo Solvalite™ 730</i>	190,92 R\$/m ²	3,36 m ²	2%		R\$ 654,32

*considerando espessura 4,8mm = 6 camadas

Fonte: Elaborado pelo autor.

O custo da mão de obra incluiu todas as etapas do processo e os valores foram calculados de acordo com a Equação 14. A taxa operador considerou o salário médio de um técnico em polímeros de R\$ 14,16/h e aplicou-se um fator multiplicador adicional de 1,8 que representa encargos e benefícios. Conforme a Tabela 10, o valor de custo da mão de obra estimado por peça considerando tempo de ciclo de cura de 202,8 s foi de R\$ 3,33.

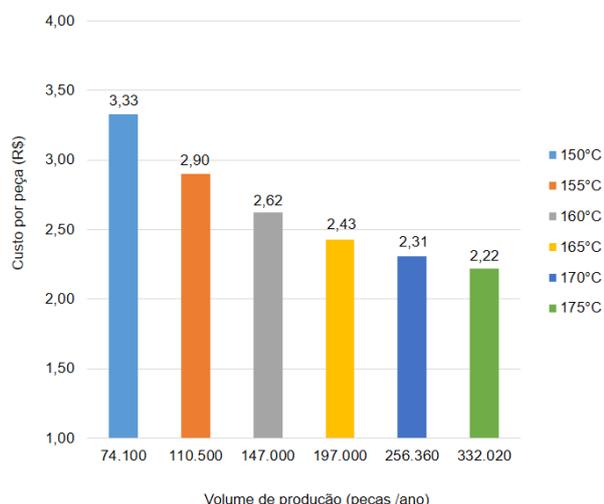
Tabela 10 - Custos de mão de obra por operações

OP	Etapas	Tempo ciclo (s)	Tempo ciclo (h)	Número de operadores	Taxa operador (R\$/h)	Custo MO
10	Corte 6 camadas 780x320 (250mm/s)	30	0,008	1	R\$ 14,16	R\$ 0,12
20	Empilhamento camadas (robô)	20	0,006	1	R\$ 14,16	R\$ 0,08
30	Transferência laminado (robô)	6	0,002	1	R\$ 14,16	R\$ 0,02
40	Estampagem e cura (prensa hidráulica)	202,8	0,056	1	R\$ 14,16	R\$ 0,80
50	Transferência peça curada (robô)	6	0,002	1	R\$ 14,16	R\$ 0,02
60	Corte a água (perímetro 650mm)	80	0,022	1	R\$ 14,16	R\$ 0,31
70	Transferência peça (robô)	6	0,002	1	R\$ 14,16	R\$ 0,02
80	Inspeção final (manual)	120	0,033	1	R\$ 14,16	R\$ 0,47
Custo Total						R\$ 3,33

Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo de ciclo foi fator determinante para definição do valor da mão de obra por peça. O Gráfico 6 apresenta os custos da mão de obra por peça para diferentes volumes de produção.

Gráfico 6 - Custos de mão de obra por peça em função da produtividade



Fonte: Elaborado pelo autor.

O custo de energia foi calculado com base na Equação 3 e considerou o valor de 0,62 R\$/kWh. Para cada equipamento foi estipulada uma média de consumo estimada em dados de fabricantes. O tempo de ciclo e a produtividade impactam diretamente no consumo de energia, e o custo de energia por unidade de peça para tempo de ciclo de 202,8s é apresentado na Tabela 11.

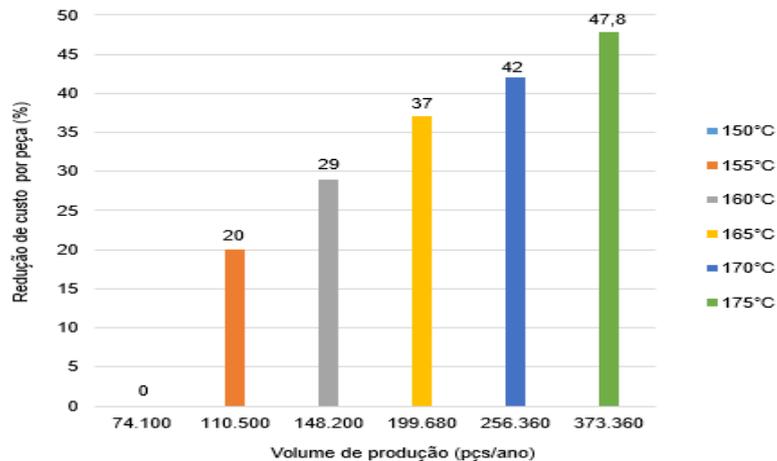
Tabela 11 - Cálculo consumo de energia por unidade de peça

Equipamento	Tempo Ciclo (s)	Tempo Ciclo (h)	Energia (kW)	Consumo por ciclo (kW/h)
Máquina de Corte CNC (velocidade corte 0,25m/s)	30	0,008	20	0,17
Prensa Hidráulica Duplo Ciclo (250Ton)	202,8	0,0563	16	0,63
Máquina de corte água (velocidade corte 12m/min)	80	0,02	20	0,44
Robô Modelo Envelope 1600mm Cap. 6kg	10	0,003	0,67	0,002
Robô Modelo Envelope 1600mm Cap. 6kg	6	0,002	0,67	0,001
Robô Modelo Envelope 1600mm Cap. 6kg	6	0,002	0,67	0,001
Robô Modelo Envelope 1600mm Cap. 6kg	6	0,002	0,67	0,001
Custo de energia p/ peça produzida (fator R\$ 0,62/kWh)				R\$ 0,94

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para cada temperatura o consumo de energia varia devido ao tempo de cura durante o processo de estampagem. O potencial de redução encontrado no custo de energia por peça a cada temperatura em relação a 150°C foi de aproximadamente 50%. O Gráfico 7 apresenta a variação deste custo em função do volume anual.

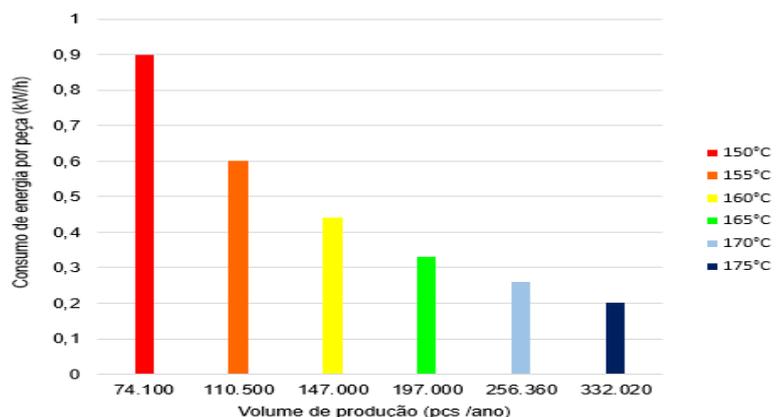
Gráfico 7 - Potencial de redução de custo de energia por peça em função do volume



Fonte: Elaborado pelo autor.

O consumo de energia durante o processo de cura do material dentro do ferramental de estampagem também se reduziu significativamente. Ao comparar com o tempo de ciclo de 45,1 s em temperatura de 175°C que consome 0,20 kW/h, este valor corresponde a aproximadamente 22% do consumo usado para processamento em temperatura de 150°C, que é de 0,9 kW/h. O Gráfico 8 apresenta o comparativo de consumo de energia por peça produzida para diferentes níveis de temperatura.

Gráfico 8 - Consumo de energia durante processo de cura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o cálculo da depreciação com base na Equação 4 adotou-se para este estudo a premissa de “capacidade de amortização”, ou seja: o custo da depreciação será diluído ante a capacidade efetiva de produção ao longo de sua vida útil (10 anos). Para cada equipamento foram adicionados 5% valores residuais, 10% equipamentos auxiliares e 15% despesas com instalação. A lista de equipamentos e valores estimados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Lista de equipamentos

Item	Equipamento	Valor
1	Máquina de Corte CNC (velocidade corte 0,25 m/s)	R\$ 500.000,00
2	Prensa Hidráulica Duplo Ciclo (250 Ton)	R\$ 1.100.000,00
3	Máquina de corte água (velocidade corte 12 m/min)	R\$ 500.000,00
4	Esteira transportadora automatizada	R\$ 100.000,00
5	Robô Modelo Envelope 1600 mm Cap. 6 kg	R\$ 370.000,00
6	Robô Modelo Envelope 1600 mm Cap. 6 kg	R\$ 370.000,00
7	Robô Modelo Envelope 1600 mm Cap. 6 kg	R\$ 370.000,00
8	Robô Modelo Envelope 1600 mm Cap. 6 kg	R\$ 370.000,00
9	Mesa com Dispositivo de Inspeção	R\$ 15.000,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

O custo do equipamento dividido em função de sua vida útil foi calculado em horas a partir da premissa de 2 turnos diários de 8 horas em um ano comercial de 260 dias e efetividade de 80% (taxa de produção), multiplicado pelo número de peças produzidas por hora, obtendo-se a depreciação estimada em função de cada peça. O cálculo de vida útil dos equipamentos é apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Cálculo de vida útil dos equipamentos

Fator	Índice
Carga horária diária (h)	16
Dias úteis /ano	260
Total carga horária anual (h)	4.160
Tempo (anos)	10
Vida útil do equipamento (h)	41.600

Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor de vida útil do equipamento foi multiplicado pela quantidade de peças produzidas por hora e pela taxa de produção estimada. A Tabela 14 apresenta os valores encontrados neste cálculo, que foi utilizado como fator de depreciação dos equipamentos.

Tabela 14 - Valores para cálculo de depreciação

Variável	Índice
Máximo de peças/hora	17
Taxa de Produção 80%	0,8
Vida útil do equipamento (h)	41600
Fator depreciação	565760

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para se obter o custo de depreciação por peça, foi calculada a divisão do fator depreciativo pelo valor de cada equipamento, desta forma a soma desta variável compõe a depreciação total do processo diluído por peça. A Tabela 15 apresenta um valor de depreciação calculado usando uma média de produção de 17 pç/h e tempo de ciclo de cura de 202,8 s.

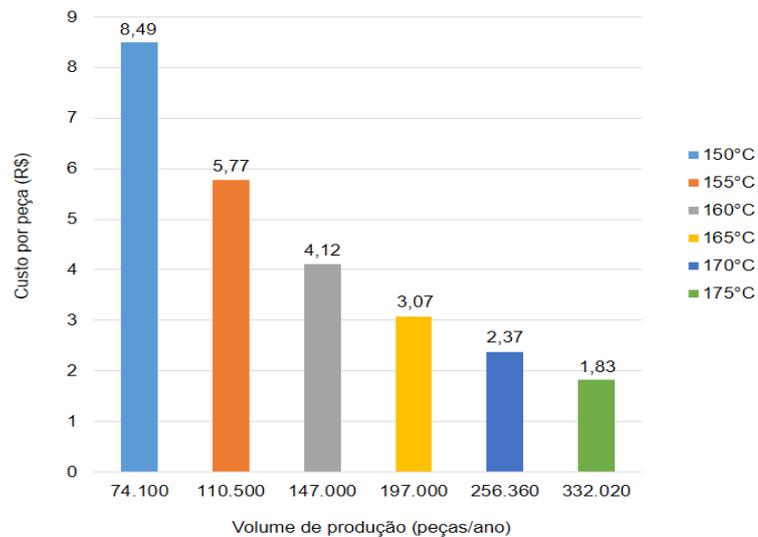
Tabela 15 - Custo depreciativo de equipamento a ser aplicado por peça

Equipamento	Preço (x1000)	Valores residuais (5%)	Equipamentos auxiliares (10%)	Instalação (15%)	Custo total investimento (x1000)	Fator depreciativo p/peça
Máquina de corte CNC (velocidade corte 0,25 m/s)	R\$ 500	R\$ 25.000,00	R\$ 50.000,00	R\$ 75.000,00	R\$ 650	R\$ 1,15
Prensa hidráulica duplo ciclo (250Ton)	R\$ 100	R\$ 55.000,00	R\$ 110.000,00	R\$ 165.000,00	R\$ 1.430	R\$ 2,53
Máquina de corte água (velocidade corte 12 m/min)	R\$ 500	R\$ 25.000,00	R\$ 50.000,00	R\$ 75.000,00	R\$ 650	R\$ 1,15
Esteira transportadora automatizada	R\$ 100	R\$ 5.000,00	R\$ 10.000,00	R\$ 15.000,00	R\$ 130	R\$ 0,23
Robô modelo envelope 1600 mm Cap. 6 kg	R\$ 370	R\$ 18.500,00	R\$ 37.000,00	R\$ 55.500,00	R\$ 481	R\$ 0,85
Robô modelo envelope 1600 mm Cap. 6 kg	R\$ 370	R\$ 18.500,00	R\$ 37.000,00	R\$ 55.500,00	R\$ 481	R\$ 0,85
Robô modelo envelope 1600 mm Cap. 6 kg	R\$ 370	R\$ 18.500,00	R\$ 37.000,00	R\$ 55.500,00	R\$ 481	R\$ 0,85
Robô modelo envelope 1600 mm Cap. 6 kg	R\$ 370	R\$ 18.500,00	R\$ 37.000,00	R\$ 55.500,00	R\$ 481	R\$ 0,85
Mesa com dispositivo de inspeção	R\$ 15	R\$ 750,00	R\$ 1.500,00	R\$ 2.250,00	R\$ 19,5	R\$ 0,03
					Total:	R\$ 8,49

Fonte: Elaborado pelo autor.

A produtividade diária influencia no tempo de vida útil do equipamento e, conseqüentemente, no valor de depreciação. Os valores de depreciação calculados para diferentes níveis de produtividade são apresentados no Gráfico 9.

Gráfico 9 - Custos de depreciação por peça em função do volume



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para este estudo foi adotado o valor de 10% de custos de manutenção em relação ao custo dos equipamentos, considerado o uso de 80% da capacidade (2 turnos), conforme a Equação 17. O valor dos custos de manutenção calculado para temperatura de processamento a 150°C foi de R\$ 61,13 por peça, conforme a Tabela 16.

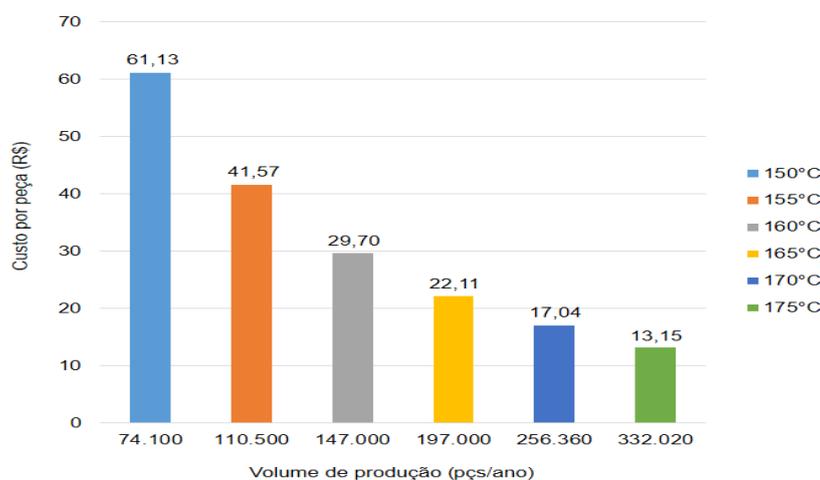
Tabela 16 - Cálculo dos custos de manutenção por peça produzida

NUM (Equipamentos)	9
Valor total equipamentos	R\$ 4.803.500,00
Taxa de manutenção (10%)	0,1
Produtividade anual ¹	74.100
NUM x Total equip X Taxa manutenção ²	4.323.150
Custo manutenção por peça (2)/(1)	R\$ 61,13

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a produtividade anual o fator de custo da manutenção é alterado e o valor por peça se reduz, conforme apresentado no Gráfico 10.

Gráfico 10 - Custos de manutenção por peça em função do volume



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os custos que foram calculados anteriormente foram utilizados para compor os custos fixos do processo. Ao somar os valores conforme a Equação 18, se obteve o custo por operação e a partir disso o valor da matéria prima foi incluído para compor o valor estimado da peça para cada temperatura. Conforme o volume diário aumenta o custo do processo a ser diluído no preço da peça também diminui. Desta forma, o preço da peça produzida à uma temperatura de 175°C representa uma redução de custo de R\$56,20 por peça quando comparado à temperatura de processo de 150°C. Os valores comparativos são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Composição preço peça

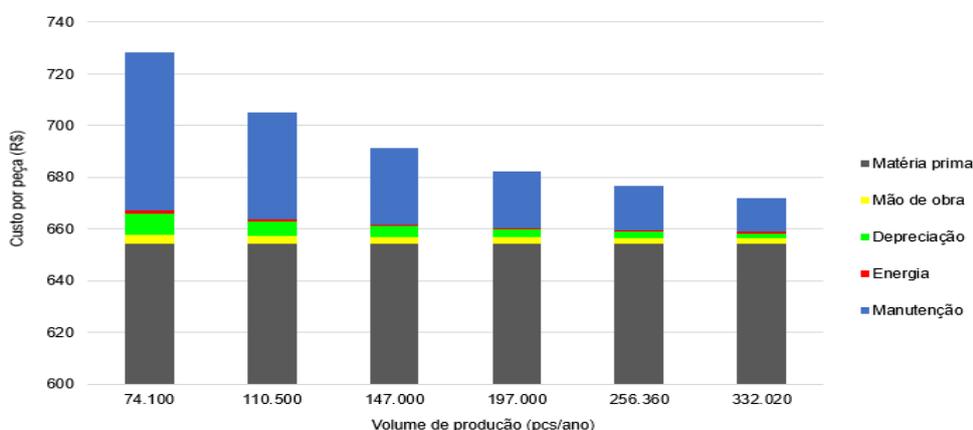
Temp	Ciclo Cura (s)	Produção (pç/ano)	Matéria Prima	Custo Mão de obra	Custo Energia	Depreciação	Manutenção	Preço Peça
150°C	202,8	74.100	R\$ 654,32	R\$ 3,33	R\$ 0,94	R\$ 8,49	R\$ 61,13	R\$ 728,21
155°C	140,9	110.500	R\$ 654,32	R\$ 2,90	R\$ 0,75	R\$ 5,77	R\$ 41,57	R\$ 705,31
160°C	101,8	147.000	R\$ 654,32	R\$ 2,62	R\$ 0,66	R\$ 4,12	R\$ 29,70	R\$ 691,42
165°C	75,9	197.000	R\$ 654,32	R\$ 2,43	R\$ 0,59	R\$ 3,07	R\$ 22,11	R\$ 682,52
170°C	58,4	256.360	R\$ 654,32	R\$ 2,31	R\$ 0,54	R\$ 2,37	R\$ 17,04	R\$ 676,58
175°C	45,1	332.020	R\$ 654,32	R\$ 2,22	R\$ 0,49	R\$ 1,83	R\$ 13,15	R\$ 672,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o custo por peça para altos volumes de produção, os custos de mão de obra e energia não contribuem significativamente quando comparados aos valores de matéria prima e manutenção. O custo de matéria-prima é dominante, Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 22, n. 2, p. 2833-2858, 2022

contudo o aumento do consumo de material pode favorecer a redução no preço por m². A depreciação dos equipamentos conforme o volume anual aumenta, mostrou uma capacidade maior de diluição deste custo no preço da peça. Entretanto, a manutenção está atrelada ao número de ciclos de operação dos equipamentos, o aumento da quantidade de peças produzidas por unidade de tempo, conseqüentemente, aumentará o número de ciclos da operação o que intensifica a frequência de manutenção.

Gráfico 11- Composição do preço peça para diferentes volumes de produção



Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo de ciclo de 45,1 s possibilitou uma produtividade de até 332.020 peças por ano. Contudo este tempo não deve ser considerado, pois pode resultar em problemas de processamento do material como o aprisionamento de ar entre camadas, e conseqüentemente comprometer as propriedades do produto final. As temperaturas de processamento que apresentaram melhor viabilidade técnica e econômica estão entre 150°C e 160°C, pois os tempos de ciclo estão entre 200 s e 100 s. Trabalhar nestas faixas de temperatura possibilita uma produtividade de 70.000 a 150.000 peças/ano, o que demonstra compatibilidade com a indústria automobilística.

4 CONCLUSÕES

A análise técnica e econômica no desenvolvimento de componentes em materiais compósitos, com o auxílio da técnica de Calorimetria Exploratória Diferencial, se mostrou uma ferramenta importante na definição de processos

produtivos de alta cadência. As variáveis grau de cura e temperatura de cura em função do tempo de ciclo foram otimizadas e utilizadas para simular o processo de manufatura adequado para produção em alta cadência sem comprometer a qualidade do material.

Os resultados da termogravimetria possibilitaram identificar o intervalo de temperatura que o material poderia ser submetido na fase experimental, sem que houvesse degradação significativa da matriz polimérica. Neste estudo observou-se que quanto maior a taxa de aquecimento menor a precisão entre a temperatura de amostra e referência. A análise de cura do material em condições dinâmicas realizadas no DSC, permitiu avaliar a entalpia da reação de cura e então definir as curvas de grau de cura em função da temperatura e/ou tempo.

O modelo de custos desenvolvido foi bastante explorado para evidenciar possíveis melhorias ao adicionar maiores detalhes e dados do processo. É importante destacar que o custo da matéria-prima compõe a maior parte do produto, portanto projetos que geram elevado nível de *scrap* não devem ser considerados para produção de alto volume. Os custos do componente diminuem a medida que o volume de produção aumenta. Com temperatura de processamento de 150°C o preço peça é de R\$ 728,21 comparado com a temperatura de 170°C este valor é de R\$ 672,01 o que representa uma redução no preço de 7,7% por peça.

Considerando que o menor tempo de ciclo reduz o consumo de energia para produção de cada peça, isto potencializa a redução de custo a ser embutido na composição do preço unitário do componente produzido. Contudo tempos de ciclos muito curtos como 58,4 s a uma temperatura de 170°C, podem comprometer as propriedades do produto final. Desta forma, a faixa de temperatura que viabiliza a produção em alta cadência deve estar entre 150°C e 160°C, o que permite uma produtividade de 70.000 a 150.000 peças por ano.

REFERÊNCIAS

BERNATH, A.; KÄRGER, L.; HENNING, F. Accurate Cure Modeling for Isothermal Processing of Fast Curing Epoxy Resins. **MDPI Polymers Journal**, v. 8, 2016. 19p. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym8110390>

BRASIL DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. Resolução nº 492, de 20 de dezembro de 2018. Estabelece as Fases PROCONVE L7 e PROCONVE L8 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE

para veículos automotores leves novos de uso rodoviário, altera a Resolução CONAMA nº 15/1995 e dá outras providências. **DOU Diário Oficial da União**. 246. ed. Brasília, DF, 2018.141p. Disponível em: https://doi.org/10.14488/enegep2018_tn_stp_258_481_35245. Acesso em: 12 jan. 2021.

KIRCHAIN, R. Cost Modeling of Materials and Manufacturing Processes. **Encyclopedia of Materials: Science & Engineering**, Massachusetts, USA: Elsevier,2001. p. 1718-1727. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043152-6/00310-7>

MARINUCCI. G. **Materiais Compósitos Poliméricos – Fundamentos e Tecnologia**. 1. Ed. São Paulo: Artliber, 2011. 329 p.

MILBERG. E. Magna Delivers Prototype of Composite Subframe to Ford: Composites Manufacturing. Arlington, 2018. Disponível em: <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2018/04/magna-delivers-prototype-of-composite-subframe-to-ford/>. Acesso em: 13 jan. 2021

ROTA 2030. **Consulta ao e-book do programa Rota 2030**. Disponível em : <https://www.rota2030.com.br/wp-content/uploads/2019/11/E-book-Rota-2030.pdf> Acesso em: 20 Mar. 2020.

SOLVAY. **Solvay announces at JEC World 2017 the launch of its new innovative thermoset prepreg resin system Solvalite™ 730* specifically developed for high volume automotive applications**. Disponível em: <https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-launches-solvalite-730-next-generation-sub-60-seconds-cure-technology> Acesso em: 01 abr. 2021.

SOLVAY. Solvalite. **730 Processing tip sheet**. TDS1047_07. Arizona: Solvay Composite Material, 2017. 3 p.

SOLVAY. Solvalite. **730 Prepreg technical data sheet**. Arizona: Solvay Composite Material, 2017. Disponível em: <https://www.solvay.com/en/product/solvalite-730> Acesso em: 29 abr. 2021

TURNER, T. A. *et al.* Low-cost carbon-fiber-based automotive body panel systems: a performance and manufacturing cost comparison. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D. **Journal of Automobile Engineering**, v. 222, n. 1, p. 53-63, 2008.



Artigo recebido em: 27/09/2022 e aceito para publicação em: 27/12/2022
DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v22i2.4756>