

Avaliação da variação de tempo de vácuo e de pressão na produção de peças em poliuretano: estudo sobre a metodologia de produção de peças de poliuretano sem o uso de máquinas vacuum casting

Evaluation of vacuum time and pressure variations in polyurethane part production: a study on the production methodology for polyurethane parts without the use of vacuum casting machines

Evaluación de la variación del tiempo y la presión del vacío en la producción de piezas de poliuretano: un estudio sobre la metodología para producir piezas de poliuretano sin el uso de máquinas de moldeo al vacío

DOI: 10.54901/educa.v9-662

Marco Rivabem Ferreira da Silva¹
Manuel Patricio da Silva Bisneto²
Edgard Gonçalves Cardoso³
Leandro Cardoso da Silva⁴
Lucas Almeida Willenshofer⁵

RESUMO: A produção de peças de poliuretano por meio de Vacuum Casting é uma técnica utilizada pela indústria para a produção de protótipos, lotes pilotos e produtos de baixas tiragens. Com o objetivo principal de avaliar o controle do tempo de mistura sob vácuo e da aplicação de pressão de cura e seus impactos na qualidade das peças produzidas, foram produzidos 6 lotes em um molde de silicone bipartido variando o tempo sob vácuo (sem vácuo, um minuto e dois minutos) e cura sob pressão (pressão ambiente ou em câmara de pressão a 60 psi). Através de análises visuais, ensaios de tração e comparações por análise por elementos finitos, constatou-se que os lotes com tempos sob vácuo de 1 e 2 minutos e cura sob pressão à 60 psi produziram as peças visualmente melhores, com destaque para o tempo sob vácuo de 2 minutos que obteve uma melhora de 9% na tensão de ruptura comparado às amostras sem vácuo e sem cura sob pressão e um desvio padrão 55% menor.

Palavras-chave: vacuum casting; poliuretano; silicone; pressão; manufatura aditiva.

¹ Graduado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, São Paulo, Brasil. Estudante de Pós-Graduação em Projetos de Mecânica Industrial, Centro Universitário SENAI-SP, São Paulo, São Paulo, Brasil. E-mail: marcorivabem@gmail.com

² Doutor em Nanociência e Materiais Avançados, Centro Universitário SENAI-SP, São Paulo, São Paulo, Brasil. E-mail: manuel.bisneto@sp.senai.br

³ Doutorando em Energia, Centro Universitário SENAI-SP, São Paulo, São Paulo, Brasil; Universidade Federal do ABC, Santo André, São Paulo, Brasil. E-mail: edgard.cardoso@sp.senai.br

⁴ Doutor em Engenharia Mecânica, Centro Universitário SENAI-SP, São Paulo, São Paulo, Brasil. E-mail: leandro.cardoso@sp.senai.br

⁵ Mestre em Engenharia Mecânica, Centro Universitário SENAI-SP, São Paulo, São Paulo, Brasil. E-mail: lucas.willenshofer@sp.senai.br

1 INTRODUÇÃO

Os materiais poliméricos impactaram profundamente a indústria e a economia global, fruto de sua imensa variedade de aplicações, desde seu uso rudimentar com os polímeros naturais até os sistemas sintéticos altamente complexos conhecidos e sintetizados atualmente (Feldman, 2008). Entre as diversas classes de polímeros difundidos comercialmente, o Poliuretano (PU) sobressai como um dos polímeros mais versáteis do mercado, capaz de se apresentar sob a forma de termoplásticos, elastômeros ou estruturas termofixas (Canevarolo, 2010). Tal adaptabilidade industrial é explicada pela relação estrutura-propriedade entre os seus dois componentes principais, o polioli e o isocianato, cuja manipulação permite adequar com precisão características como dureza, maciez e resistência mecânica (Das; Mahanwar, 2020). No espectro das resinas termofixas, os poliuretanos termofixos bicomponentes ganham destaque na fabricação de peças sólidas e componentes funcionais, entregando propriedades físicas similares ou até superiores às dos termoplásticos tradicionais de mercado (Wortmann; Frese, 2022).

Para a produção de protótipos e séries intermediárias de produtos de forma ágil e sem os elevados investimentos financeiros e o extenso tempo de desenvolvimento associados às matrizes metálicas da moldagem por injeção, a indústria recorre a técnicas integradas ao conceito de Rapid Manufacturing (S. S. Dimov; D. T. Pham, 2001). Nesse cenário, o Vacuum Casting (VC) apresenta-se como um método indireto de fabricação muito eficaz, caracterizado pelo uso de moldes flexíveis de borracha de silicone que replicam, com extrema fidelidade geométrica, modelos matrizes (Wortmann; Frese, 2022). O cerne desta técnica reside na aplicação de vácuo durante a etapa de mistura da resina líquida, uma condição essencial para a desgaseificação (eliminar bolhas e bolsões de ar aprisionados), garantindo um produto final homogêneo e com alta qualidade óptica, mecânica e tátil (Wortmann et al., 2021). Desse modo, o domínio do VC viabiliza a redução do tempo de lançamento de um produto no mercado, a maturação do projeto através da validação do lote piloto sem grandes custos iniciais e uma sondagem da aceitação do mercado antes da produção em larga escala. Tais características podem gerar vantagens competitivas altamente desejáveis como previsibilidade, redução de custos e projetos bem desenvolvidos (Wortmann et al., 2020).

Portanto, o domínio das técnicas de produção é fundamental para o êxito do processo como um todo. Além dos materiais e equipamentos, o controle e, principalmente, a redução do tempo de produção sem perda de qualidade é essencial. Nesse aspecto, o controle do tempo da mistura sob vácuo e a pressão de cura são fatores preponderantes na relação tempo-qualidade

na produção de peças em poliuretano. Diante disso, o objetivo geral deste artigo é avaliar o impacto do tempo de mistura sob vácuo e da aplicação de pressão de cura na qualidade final de peças de poliuretano fabricadas sem maquinário industrial complexo.

Com essas considerações, a hipótese inicial é que um maior tempo da mistura sob vácuo e a aplicação de pressão no processo de cura resultará em peças de melhor qualidade visual e mecânica. Para testá-la, definem-se como objetivos específicos: fabricar seis lotes de amostras variando o tempo de vácuo e os ambientes de pressão; submeter as peças a análises de qualidade visual e ensaios mecânicos de resistência à tração; e comparar os resultados experimentais com simulações computacionais feitas por análise de elementos finitos.

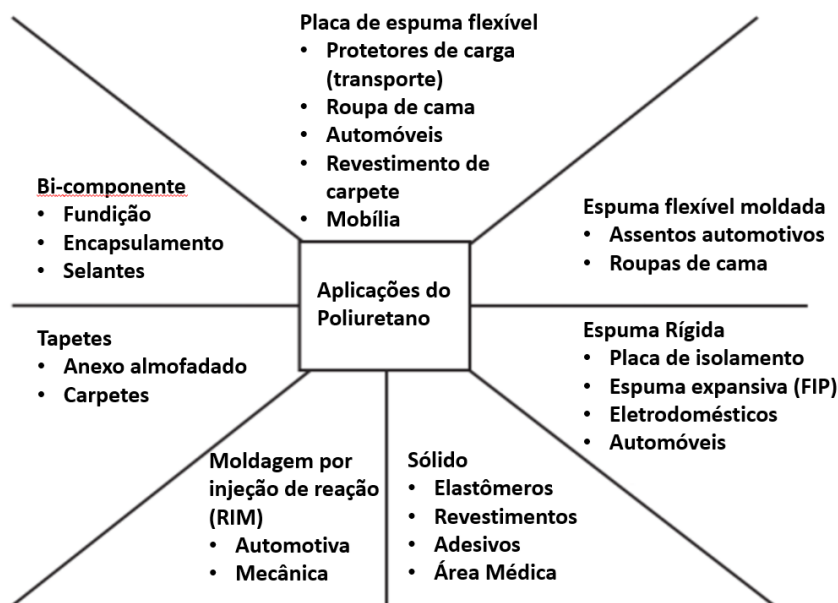
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Poliuretano (PU)

Os polímeros são amplamente usados e conhecidos atualmente, mas seu uso data de milhares de anos atrás quando o homem, mesmo sem entendimento, já modificava e misturava polímeros naturais para diversos fins (R. B. Seymour, 1987). Com o desenvolvimento dos polímeros sintéticos essa classe de materiais tornou-se extremamente vasta e com diversas aplicações. Plásticos, resinas, Borrachas, Fibras, Selantes, Revestimentos, etc.; todos esses materiais poliméricos geraram impactos significativos no presente e movimentam a economia global (Feldman, 2008). Em 2025, somente o mercado global de plásticos foi avaliado em US\$ 533,59 Bilhões de dólares e com previsões de crescimento para os próximos anos. (Fortune Business Insights, 2026)

O Poliuretano é considerado um dos polímeros mais versáteis do mercado, se apresentando na forma de termoplástico, termofixo, elastômero ou fibra, na forma expandida ou não, dependendo da estrutura química e funcionalidade dos reagentes empregados na formulação do polímero (Canevarolo, 2010). Sendo aplicados em diversas áreas (Figura 1) como tintas, revestimentos líquidos, elastômeros, isolantes, fibras elásticas, espumas, peles integrais, peças sólidas, etc.; O coloca com um valor de mercado global estimado em US\$ 84,61 bilhões de dólares, em 2025 (Akindoyo et al., 2016) (GVR Plastics; Polymers & Resins, 2026).

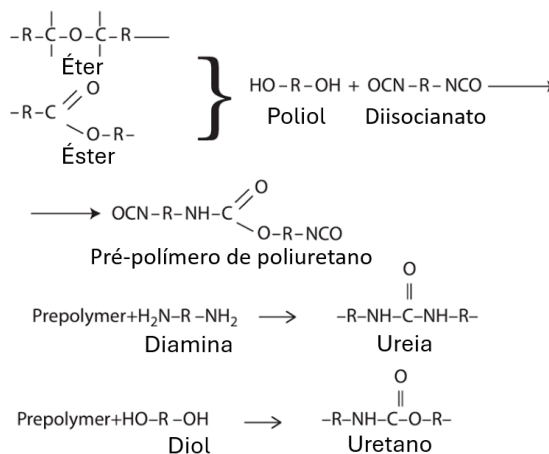
Figura 1 – Exemplo de aplicações do poliuretano.



Fonte: Szycher, 2012 (adaptado).

Atualmente o interesse por esse polímero tem aumentado, com ênfase nos poliuretanos de base biológica, oriundo de recursos de biomassa renováveis, como óleos vegetais, fenóis vegetais, óleos residuais, lignocelulose e outras substâncias orgânicas naturais; ao invés das matérias-primas monoméricas derivadas do petróleo (Li et al., 2025) (GVR Plastics, 2024). Seu uso em diversas áreas é explicado por sua relação estrutura-propriedade entre o Polioli e o isocianato (Figura 2), os dois componentes principais do poliuretano. Propriedades como maciez, flexibilidade e dureza do produto final podem ser totalmente alteradas através da manipulação de seus reagentes, resultando em uma gama vasta de produtos que atendem diversos requisitos (Das; Mahanwar, 2020).

Figura 2 – Reação química envolvendo a preparação do poliuretano.



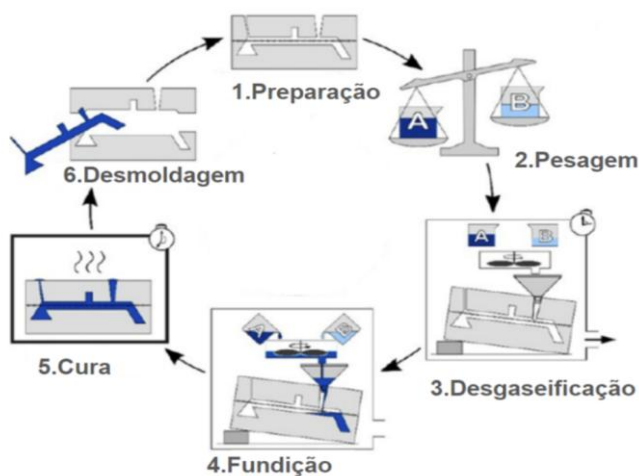
Fonte: Szycher, 2012 (adaptado).

A resina de Poliuretano (PUR) é um termofixo bicomponente que está incorporado a essa classe de polímeros. Amplamente utilizado em protótipos e produtos finais cujo objetivo são peças para testes funcionais e com propriedades físicas similares (ou mesmo superiores) aos termoplásticos de mercado. Assim como sua classe, as resinas de PU possuem uma alta versatilidade, o que resulta em resinas com propriedades físicas variadas para diversos fins. Destaca-se nas áreas de automobilística, eletrodomésticos, dispositivos eletrônicos e produtos de consumo (Wortmann; Frese, 2022).

2.2 Vacuum Casting (VC)

O termo “vacum casting” é usado para definir muitos processos, que não necessariamente seguem os mesmos parâmetros e métodos. No presente artigo o termo referência o processo de confecção de peças feitas de polímeros termofixos produzidos com resinas de fundição reativa poliméricas bicomponentes, através de moldes de silicone e câmaras de vácuo (Wortmann; Frese, 2022). Esse é um processo indireto de fabricação de peças, que integra um grupo de métodos de fabricação intitulado “Rapid Manufacturing”, que engloba processos que visam reduzir o tempo de lançamento de um produto no mercado, seja acelerando a produção de protótipos ou pequenos lotes (S. S. Dimov; D. T. Pham, 2001). É um método indireto pois utiliza um modelo (geralmente fabricado por manufatura aditiva) para a fabricação de moldes e matrizes (Wortmann; Frese, 2022) (). A figura abaixo (Figura 3) exemplifica um ciclo do processo de Vacuum Casting.

Figura 3 – Exemplo de ciclo de processo de peças produzidas por VC.



Fonte: Wortmann; Frese, 2022 (adaptado).

O molde de silicone é usado para replicar peças complexas e de tamanhos variados, ele garante texturas, marcações e outras exigências ópticas e táteis (Wortmann et al., 2021). Já que copia fielmente essas características do modelo usado. O vácuo é usado para retirar as bolhas da resina, que podem gerar imperfeições e fragilidades nas peças. Em alguns casos, a cura pode ser feita em uma câmara de pressão que comprime as bolhas retidas na mistura mesmo após o processo de vácuo. O processo usa principalmente resinas bicomponente de PU e Epóxi que, além de possuírem uma alta gama de produtos com propriedades mecânicas e químicas diversas, também permitem alguns aditivos que ampliam ainda mais o leque de possibilidades. Além de um investimento extremamente baixo se comparado aos métodos tradicionais como a injeção de termoplásticos.

Contudo, o processo possui algumas limitações como por exemplo, a vida útil dos moldes de silicone. Após uma faixa aproximada entre 15 e 30 de ciclos, o molde de silicone começa a apresentar deterioração, isso ocorre devido ao isocianato (componente da resina de poliuretano) que se difunde na superfície da cavidade do molde, polimerizando com a unidade contida no silicone e formando poliureia. O resultado é a formação de microfissuras que resultam em rupturas no silicone (Wortmann et al., 2020) (Kuo; Wu, 2017).

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais

3.1.1 Resina de Poliuretano

Poliuretano RESINA CST 47 da Redelease, bi-componente com proporção de 10 partes de massa da RESINA CST 47 A e 8 partes do Endurecedor CST 47 B. As propriedades físicas do material estão disponibilizadas na tabela abaixo, fornecida pelo fabricante.

Tabela 1 – Propriedades Físicas do poliuretano RESINA CST 47 da Redelease.

Propriedades	Unidade	Valores
Dureza (Shore D)	-	80
Tempo de Trabalho	minutos	8
Resistência à compressão	MPa	64.34
Proporção de mistura por peso	gramas	A-100 para B-80
Tempo de desmoldagem	minutos	30
Ciclo de cura 25°C	dias	7

Fonte: Site do fabricante, 2026.

3.1.2 Silicone

Os moldes foram confeccionados em silicone e para todo o experimento foi utilizado a Borracha de Silicone Rosa Média Flexibilidade para Moldes Com Catalisador por sua boa resistência ao rasgo e à tração, resistência química e baixo custo. Abaixo temos as propriedades físicas do silicone selecionado (Tabela 3.2):

Tabela 2 – Propriedades Físicas da Borracha de Silicone Rosa Média Flexibilidade.

Propriedades	Unidade	Valores
Dureza (Shore A)	-	13 - 17
Resistência à Tração	N/m	2.0 - 2.2
Resistência ao Rasgo	N/mm	2.5 - 5.5
Alongamento à Ruptura	%	200 - 250

Fonte: Site do fabricante, 2026.

3.1.3 Câmara de Pressão

Tabela 3 – Especificação da câmara de pressão usada.

Empresa	PRP
Pressão	60 psi (padrão)
Modelo	10 Litros

Fonte: Fabricante, 2026.

3.1.4 Câmara e Bomba de Vácuo

Tabela 4 – Especificação da bomba de vácuo usada.

Empresa	Gallant.
Nome	Microcomputer Controlled Eletronic Universal Testing Machine
Modelo	Gbv70234a-azbiv
Potência	0,75 hp

Fonte: Fabricante, 2026.

Tabela 5 – Especificação da câmara de vácuo usada.

Empresa	JCS
Modelo	22cm x 10cm (redondo)
Pressão Máx.	-762 mmHg

Fonte: Fabricante, 2026.

3.1.5 Máquina de Tração

A Tabela 6 os dados relevantes da máquina de tração utilizada no estudo.

Tabela 6 – Dados do equipamento de tração utilizado.

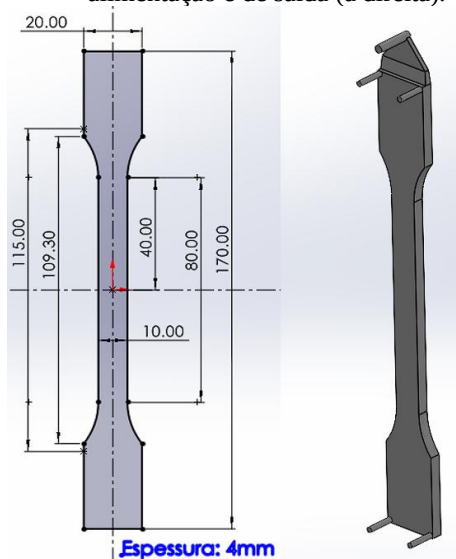
Empresa	Time Group Inc.
Nome	Microcomputer Controlled Eletronic Universal Testing Machine
Modelo	WDW-100E
Célula de Carga	10 ton

Fonte: Fabricante, 2026.

3.2 Corpo de Prova

Para a avaliação do processo foi adotado o modelo de corpo de prova conforme a norma ISO 527–2 com as dimensões conforme a Figura 4:

Figura 4 – Dimensões do corpo de prova adotado (a esquerda). Modelo do corpo de prova com os canais de alimentação e de saída (a direita).



Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

A peça matriz utilizada para a produção do molde de silicone foi produzida utilizando prototipagem rápida por tecnologia SLA (estereolitografia).

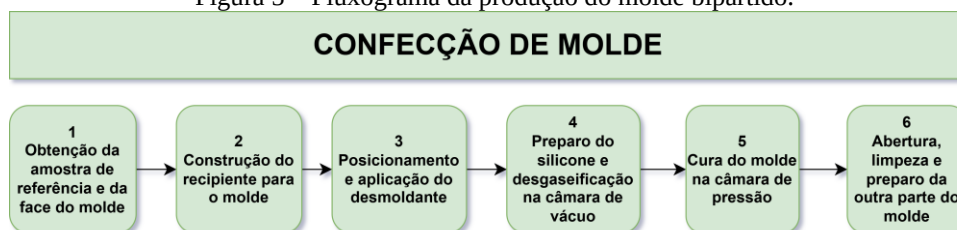
3.3 Molde

O molde foi feito inteiramente em silicone, utilizando a técnica de bipartição (Molde Bi-Partido), que consiste na produção de uma das partes do molde e, posteriormente, da outra usando a primeira como base. Para esse experimento, foi modelado e impresso o que seria a face de contato entre as partes do molde, para agilizar o processo. As figuras 5 e 6 demonstram o procedimento detalhado que consiste em:

- Modelagem da face do molde e amostra

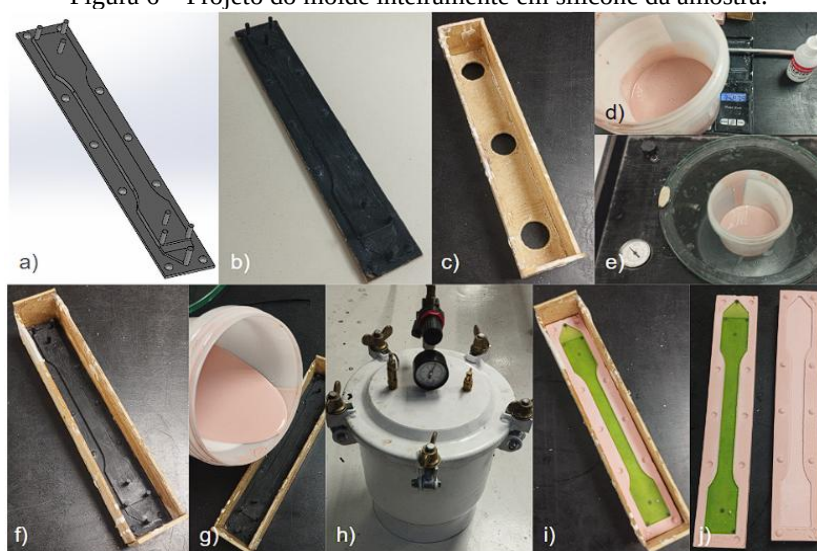
- b) Produzir os modelos por impressão 3D
- c) Preparo do recipiente do molde
- d) Pesagem do silicone e do catalisador
- e) Desgaseificação da mistura na câmara de vácuo
- f) Montagem do modelo no recipiente e preparo com desmoldante
- g) Preenchimento do recipiente com o silicone
- h) Cura na câmara de pressão
- i) Limpeza e preparo da primeira parte do molde e posicionamento da peça modelo no molde
- j) Repetir os passos anteriores para a outra parte do molde
- k) Abrir o molde e retirar o modelo, após a cura total do molde

Figura 5 – Fluxograma da produção do molde bipartido.



Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

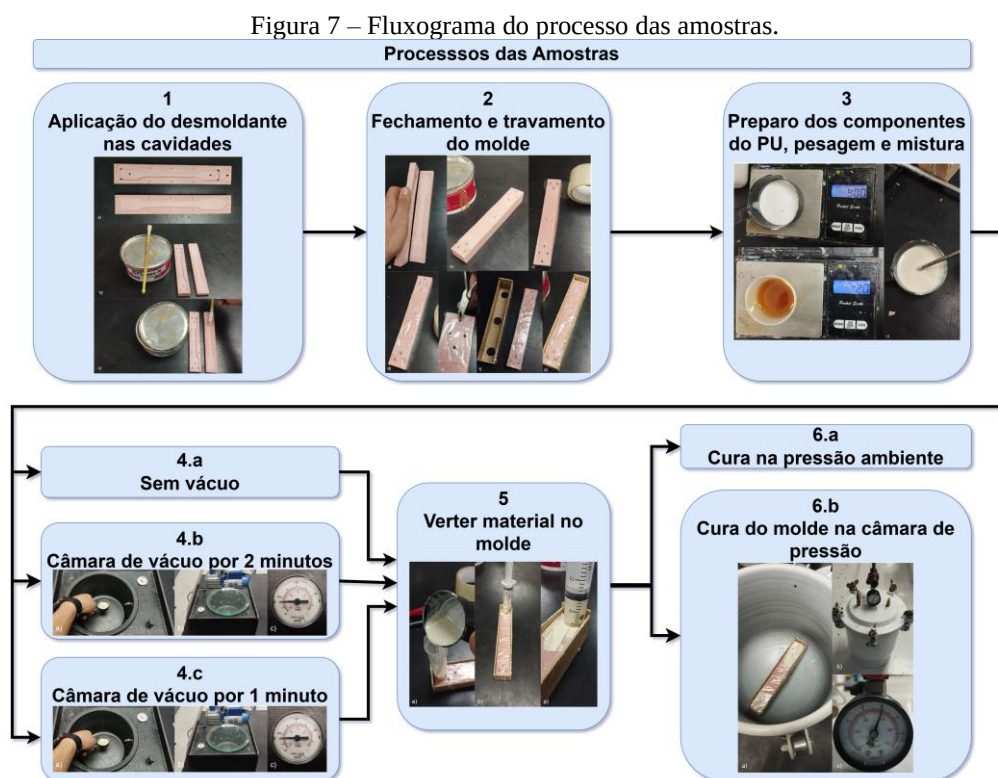
Figura 6 – Projeto do molde inteiramente em silicone da amostra.



Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

3.4 Procedimentos

Os processos a serem aplicados buscam avaliar a influência do vácuo e da pressão como parâmetros no processo de obtenção das amostras, avaliando principalmente a aplicação do vácuo na mistura e o tempo no qual a mistura é submetida ao vácuo, além da cura das peças a pressão ambiente ou dentro de uma câmara pressurizada. Essa variação nos parâmetros citados resulta em 6 “linhas de processos” (L1, L2, L3, L4, L5 e L6), em que cada uma delas possui uma característica diferente. O fluxograma da Figura 7 ilustra de forma resumida os processos das amostras.



Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

Inicialmente foi preparado o molde para receber a resina. Já limpo de qualquer impureza e resíduos e, posteriormente, aplicado um desmoldante em toda a superfície interna (Figura 7 (etapa 1)).

O molde foi fechado, selado com fita adesiva e travado dentro de uma caixa de MDF. Evitando problemas de abertura, vazamentos e deformações indesejadas (Figura 7 (etapa 2)).

Com o molde preparado, utilizamos o software de modelagem (Solidworks) para definir a massa aproximada do corpo de prova e, com esse dado, mensurar as massas dos componentes da resina.

Considerado uma massa total de PU de 16,2 gramas (12,2 g do corpo mais 4,0 g de margem de segurança), sendo 9 gramas do Componente A e 7,2 gramas do Componente B, (Figura 7 (etapa 3)).

Pesada as massas dos componentes, o componente B foi então vertido no componente A e misturado até atingir uma composição homogênea, esse processo é padronizado para todas as amostras e durou 1 minuto (Figura 7 (etapa 4.c)). Até essa etapa todas as amostras passaram pelo mesmo procedimento. Contudo, a próxima etapa mudou conforme cada linha de processo.

Para as Linhas de Processo L1 e L4, a mistura foi colocada em uma câmara de vácuo para retirada de bolhas por 1 minuto. O tempo foi contabilizado assim que a câmara passou os -640 mmHg de pressão, desligando-a após atingido o tempo determinado e, posteriormente, retirou-se a mistura do equipamento. Para as Linhas de Processo L2 e L5 o procedimento foi o mesmo, mas o tempo dentro da câmara de vácuo foi estendido para 2 minutos (Figura 7 (etapa 4.b)). Já as Linhas de Processo L3 e L6 foram diretamente para a próxima etapa (Figura 7 (etapa 4.a)).

Neste ponto todas as Linhas de Processo passaram pelo mesmo procedimento, que é o preenchimento do molde com a mistura de PU (Figura 7 (etapa 5)). Para agilizar o processo foi utilizada uma seringa de 20mL, a mistura foi vertida na seringa diretamente conectada ao molde, o êmbolo foi encaixado e pressionado para injetar o PU no interior do molde. Para o uso da seringa foi muito importante utilizar uma quantidade de PU maior que a massa da amostra (conforme considerado anteriormente), para que ao injetá-lo o êmbolo pare com uma quantidade de PU dentro da seringa (necessário para que o ar presente dentro da seringa não entrasse no molde e danificasse a amostra) (Figura 7 (etapa 5)).

Com o molde preenchido, as Linhas de Processo L4, L5 e L6 foram armazenadas para que o PU cure à pressão ambiente (Figura 7 (etapa 6.a)). E nas Linhas de Processo L1, L2 e L3 as amostras foram imediatamente colocadas dentro da câmara de pressão que, após ser devidamente fechada, foi preenchida com a ajuda de um compressor até atingir a pressão de aproximadamente 60 psi, sendo vedada e armazenada até atingir o tempo de cura do PU (Figura 7 (etapa 6.b)).

Passado o tempo de cura do PU, os moldes foram então abertos e as amostras retiradas, preparadas e identificadas conforme abaixo (Tabela 7):

Tabela 7 – Dados do equipamento de tração utilizado

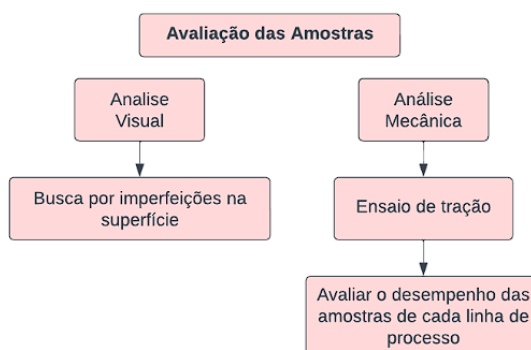
Processo	Procedimentos
L1	Retirar bolhas na Câmara de vácuo por 1 minuto + Cura na Pressão
L2	Retirar bolhas na Câmara de vácuo por 2 minutos + Cura na Pressão
L3	Cura na Pressão
L4	Retirar bolhas na Câmara de vácuo por 1 minuto + Cura na Pressão Atmosférica
L5	Retirar bolhas na Câmara de vácuo por 2 minuto + Cura na Pressão Atmosférica
L6	Cura na Pressão Atmosférica

Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

3.5 Procedimentos de Avaliação dos Resultados

Os resultados obtidos com os experimentos foram avaliados seguindo uma sistemática simples para comparar a qualidade de cada processo e suas variações. As amostras foram avaliadas seguindo dois parâmetros: análise visual e análise do comportamento mecânico em tração. Todo o procedimento foi explicitado no fluxograma da Figura 8 abaixo:

Figura 8 – Fluxograma do processo de avaliação dos resultados.



Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

3.5.1 Análise Visual

Uma vistoria qualitativa da peça, identificando imperfeições nas peças, bolhas, pontos sem preenchimento de material e qualidade da superfície da amostra obtida no processo.

3.5.2 Análise do Comportamento Mecânico em Tração

As amostras foram submetidas a ensaios de tração buscando a coleta de dados relacionados a deformação, Tensão de Ruptura e Módulo elástico para uma avaliação

comparativa do desempenho de cada Linha de Processo. Cada linha de processo teve suas amostras avaliadas com relação às obtidas com outras variações.

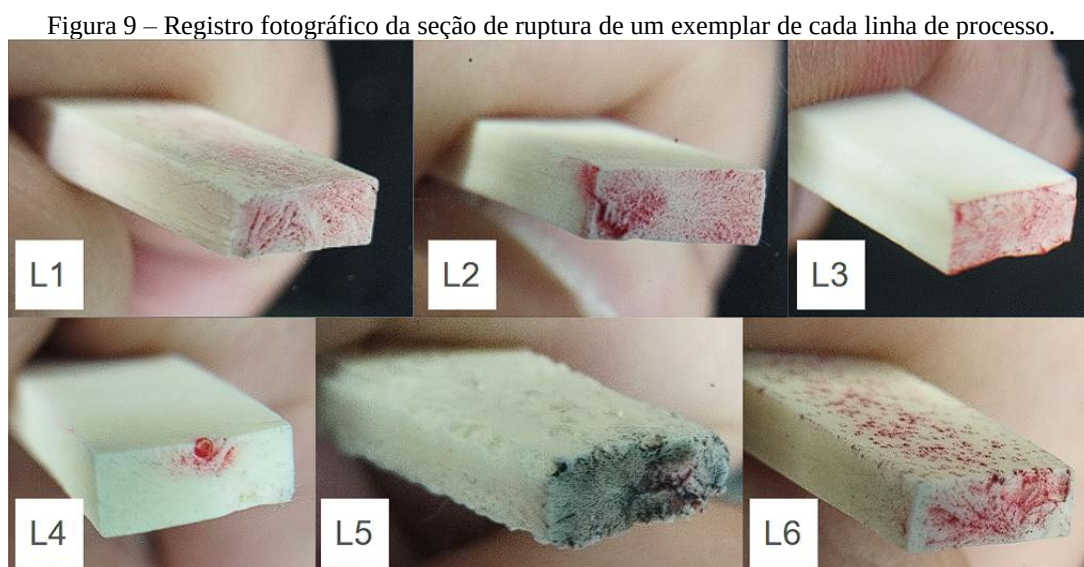
3.5.3 Análise por Elementos Finitos do Material

Comparação entre os resultados obtidos no ensaio de tração e os dados obtidos por meio de análise de elementos finitos em um software de simulação computacional.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise Visual das Amostras

As amostras obtidas foram avaliadas visualmente buscando principalmente a ocorrência de bolhas em sua superfície. Para que a detecção das bolhas fosse mais fácil a olho nu, foi aplicada uma tinta sobre parte da superfície das amostras e, posteriormente, limpas com um pano umedecido com álcool isopropílico. Dessa forma as bolhas superficiais ficaram preenchidas de tinta e destacadas em relação ao restante da superfície. A Figura 9 apresenta o registro fotográfico da seção de ruptura de um exemplar de cada linha de processo e a Tabela 8 traz a avaliação visual das amostras de cada linha de processo.



Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

Tabela 8 – Análise visual das amostras.

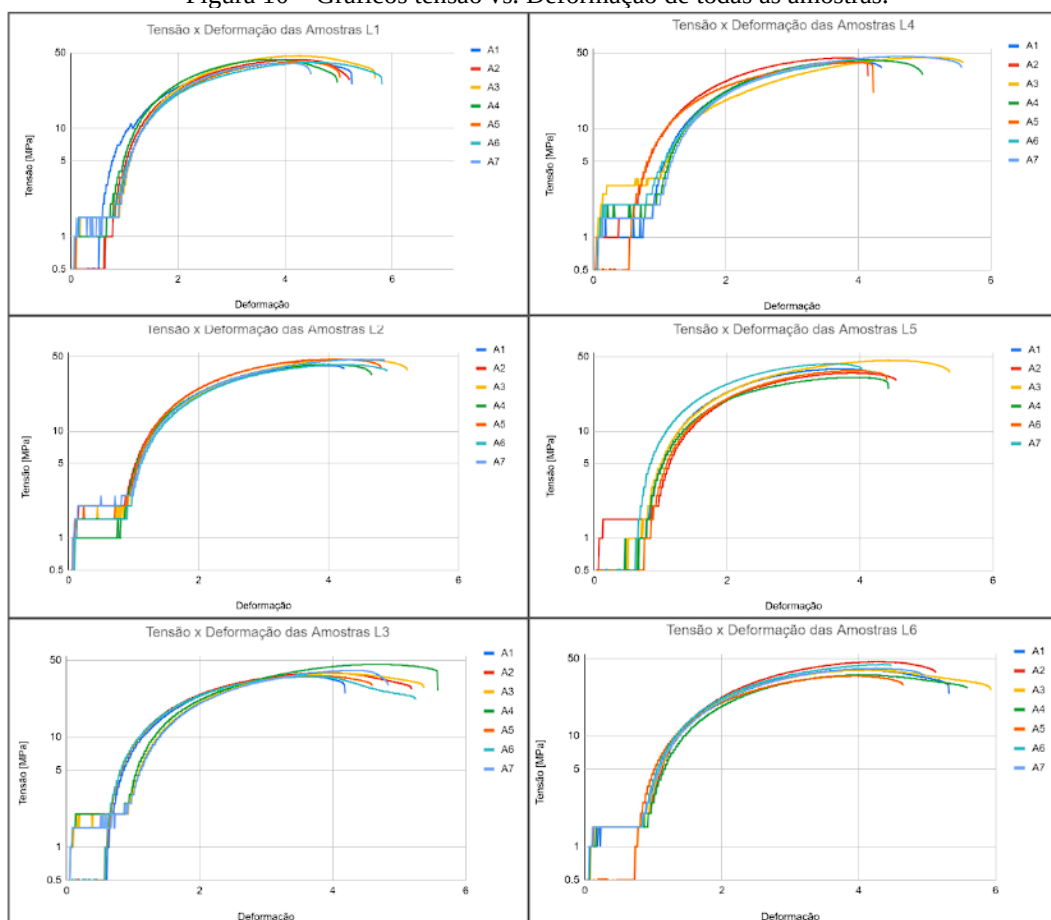
Processo	Avaliação visual
L1	Não apresentou bolhas visivelmente aparentes em sua superfície nem em seus pontos de ruptura.
L2	Não apresentou bolhas visivelmente aparentes em sua superfície nem em seus pontos de ruptura
L3	Não apresentou bolhas visivelmente aparentes em sua superfície nem em seus pontos de ruptura.
L4	Apresentou bolhas visivelmente aparentes em sua superfície e em seus pontos de ruptura
L5	Apresentou uma alta concentração de bolhas visivelmente aparentes em sua superfície. Detectadas bolhas nas seções de ruptura das amostras.
L6	Apresentou uma alta concentração de bolhas visivelmente aparentes em sua superfície. Detectadas bolhas nas seções de ruptura das amostras.

Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

4.2 Análise dos Dados Obtidos no Ensaio de Tração

Os dados do ensaio de tração foram coletados e tratados. As curvas tensão x deformação de cada amostra foram compiladas nos gráficos abaixo (Figura 10):

Figura 10 – Gráficos tensão vs. Deformação de todas as amostras.



Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

Os parâmetros de Deformação, Tensão de Ruptura e Módulo Elástico foram encontrados para cada amostra, e então calculada às médias e os desvios padrão para cada Linha de Processo, conforme tabelas abaixo (Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11):

Tabela 9 – Deformação média de cada Linha de Processo.

Amostras	Deformação Média	Desvio Padrão
L1	6.92%	0.55%
L2	6.38%	0.83%
L3	6.67%	0.61%
L4	6.16%	0.95%
L5	5.98%	0.57%
L6	6.84%	0.63%

Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

Tabela 10 – Tensão de Ruptura média de cada Linha de Processo.

Amostras	Tensão de Ruptura Média [MPa]	Desvio Padrão [MPa]
L1	42.357	2.199
L2	44.857	2.669
L3	38.571	3.427
L4	43.071	2.470
L5	38.667	4.652
L6	41.083	3.990

Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

Tabela 11 – Módulo Elástico médio de cada Linha de Processo.

Amostras	Módulo Elástico Médio [GPa]	Desvio Padrão [GPa]
L1	1.53	0.0077
L2	1.62	0.0073
L3	1.45	0.0074
L4	1.52	0.0075
L5	1.48	0.0074
L6	1.43	0.0071

Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

Com os dados de cada linha de processo, avaliou-se o desempenho das linhas de processo que curaram na câmara de pressão comparadas com as curadas na pressão ambiente (Tabela 12).

Tabela 12 - Parâmetros médios das linhas de processo curadas na câmara de pressão em relação às curadas na pressão ambiente. (células em verde indicam os melhores parâmetros entre os 2 grupos).

Amostras	L1, L2 e L3	L4, L5 e L6
Módulo de Elasticidade Média [GPa]	1.53	1.50
DP Módulo de Elasticidade [GPa]	0.0075	0.0073
Tensão de Ruptura Média [MPa]	41.929	40.940
DP Tensão Ruptura [MPa]	2.765	3.704
Deformação Média [%]	6.657	6.325
DP Deformação [%]	0.6618	0.7162

Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

Avaliando as linhas de processo com relação a câmara de vácuo, podemos separar em 3 grupos: Amostras sem câmara de vácuo, 1 minuto na câmara de vácuo e 2 minutos na câmara de vácuo (Tabela 13).

Tabela 13 – Parâmetros médios das linhas de processo considerando o tempo na câmara de vácuo. (células em verde indicam os melhores parâmetros entre os 3 grupos).

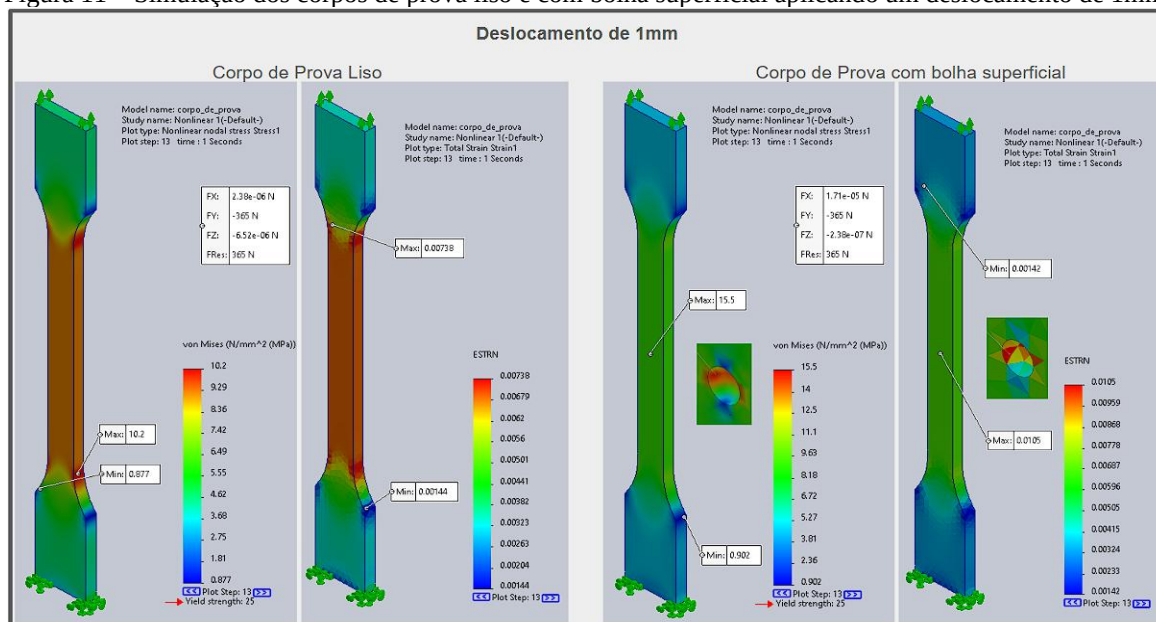
Amostras	L1 e L4	L2 e L5	L3 e L6
Módulo de Elasticidade Média [GPa]	1.52	1.55	1.44
DP Módulo de Elasticidade [GPa]	0.0076	0.0074	0.0073
Tensão de Ruptura Média [MPa]	42.714	41.762	39.827
DP Tensão Ruptura [MPa]	2.335	3.660	3.708
Deformação Média [%]	6.540	6.177	6.755
DP Deformação [%]	0.749	0.697	0.621

Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

4.3 Análise dos Dados Obtidos por Simulação Computacional

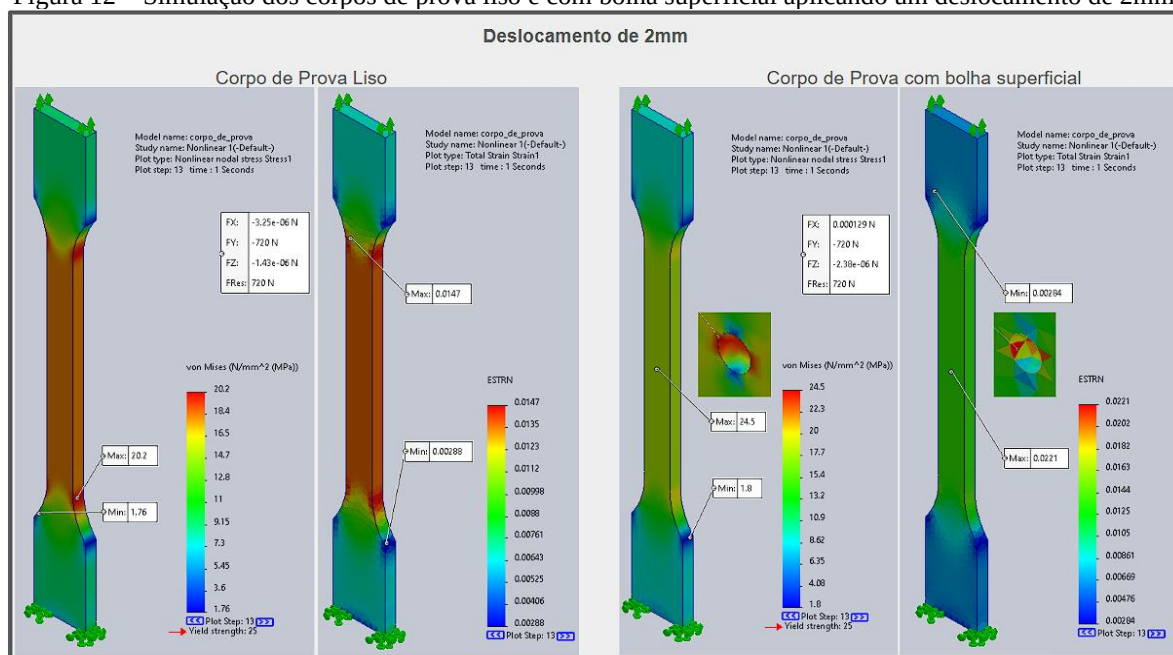
As simulações foram realizadas de forma a avaliar o impacto da presença de imperfeições (no caso, bolhas de ar) no comportamento do material quando submetido a tração. Foram estudadas duas situações: Corpo de prova sem imperfeição e Corpo de prova com imperfeição. As figuras 11, 12 e 13 demonstram os resultados da tensão em cada caso, com a deformação (ESTRN), a Tensão de Von Mises e a Força resultante em três situações em que foram aplicados deslocamentos de 1, 2 e 3mm como dados de entrada.

Figura 11 – Simulação dos corpos de prova liso e com bolha superficial aplicando um deslocamento de 1mm.



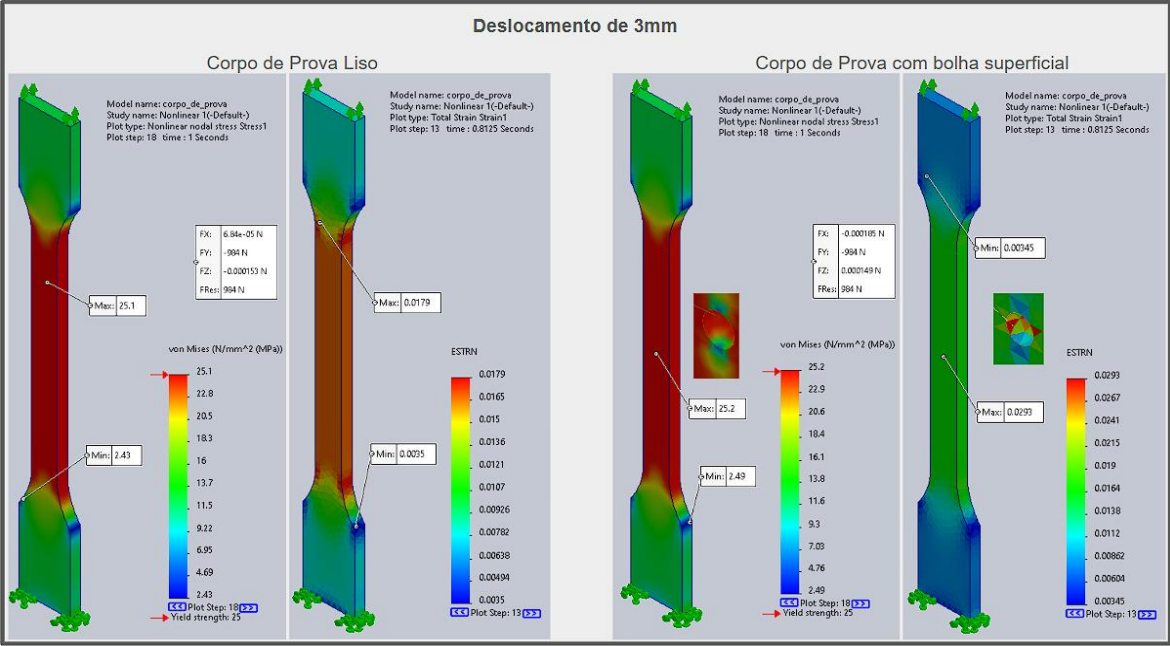
Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

Figura 12 – Simulação dos corpos de prova liso e com bolha superficial aplicando um deslocamento de 2mm.



Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

Figura 13 – Simulação dos corpos de prova liso e com bolha superficial aplicando um deslocamento de 3mm.



Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

No deslocamento de 1mm o material se manteve dentro do regime elástico e, consequentemente, abaixo do limite de escoamento do material. Com um deslocamento de 2mm a tensão se encontra próxima ao limite de escoamento. Já com um deslocamento de 3mm o material já se encontra no regime plástico. Os resultados das simulações foram compilados na Tabela 14:

Tabela 14 – Parâmetros coletados das simulações.

Amostras	CdP Liso	Cdp com Bolha	CdP Liso	Cdp com Bolha	CdP Liso	Cdp com Bolha
Deslocamento Aplicado [mm]	1	1	2	2	3	3
Tensão Máxima de Von Mises [MPa]	10,2	15,5	20,2	24,5	25,1	25,2
Deformação Máxima (ESTRN)	0.00738	0.0105	0.0147	0.0221	0.0179	0.0293
Força Resultante [N]	365	365	720	720	984	984

Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

4.4 Discussões

As Linhas de Processo L1, L2 e L3 não apresentaram diferenças quanto à qualidade da superfície das peças, na análise visual. Já as Linhas de Processo L4, L5 e L6 tiveram resultados

difusos, com peças extremamente porosas (como a L5 e L6) e outras com a presença de bolhas de forma mais pontual (L4).

As amostras que passaram pelo processo de cura na câmara de pressão (L1, L2 e L3), apresentaram uma superfície livre de bolhas (se comparadas às amostras das linhas de processos L4, L5 e L6. Conclui-se que a cura na pressão de 60 psi foi um fator essencial para obter peças com um acabamento superficial melhor.

Essa disparidade entre os dois métodos de cura também ficou nítida quando comparados os dados do ensaio de tração entre os mesmos dois grupos. A Tabela 12 indica que os melhores resultados, considerando os parâmetros de Deformação, Tensão de Ruptura e Módulo elástico, foram obtidos pelas linhas de processo que passaram pela cura na câmara de pressão.

Considerando o procedimento na câmara de vácuo, cada grupo obteve bons resultados nos 3 parâmetros retirados dos ensaios de tração, conforme demonstrou a Tabela 12. Contudo, analisando os mesmos parâmetros considerando apenas as Linhas de Processo L1, L2 e L3 (as que obtiveram bons resultados na análise visual), verificamos que as que passaram pela câmara de vácuo (L1 e L2) possuem parâmetros médios superiores em relação às médias de L3, conforme demonstra a Tabela 15.

Tabela 15 – Comparação entre L1, L2 e L3 com relação aos parâmetros retirados do ensaio de tração.

Amostras	Deformação Média [%]	Desvio Padrão [%]	Tensão de Ruptura Média [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	Módulo de Elasticidade Média [GPa]	Desvio Padrão [GPa]
L1	6.92	0.55	42.357	2.199	1.53	0.0073
L2	6.38	0.83	44.857	2.669	1.62	0.0074
L3	6.67	0.61	38.571	3.427	1.45	0.0075

Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

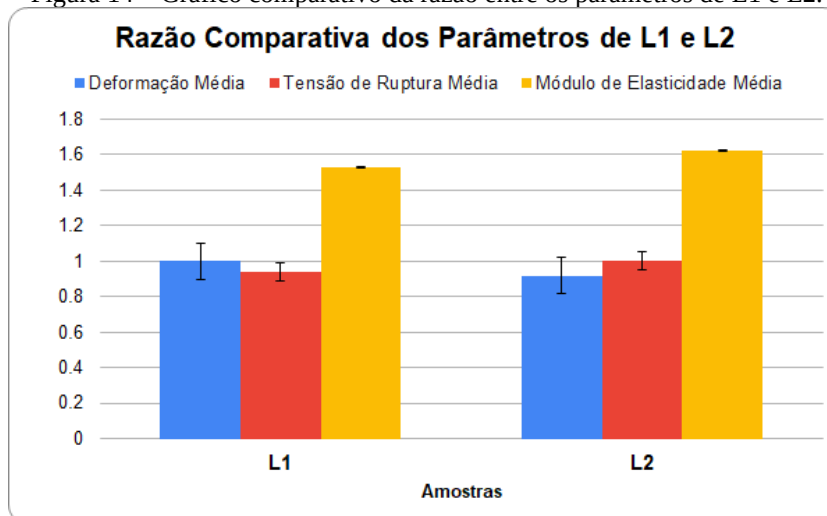
Isolando L1 e L2 e comparando a razão entre seus parâmetros, e um desvio padrão médio entre as duas Linhas de Processo obtemos a Tabela 16 e um gráfico comparativo entre as duas Linhas de Processo (Figura 14):

Tabela 16 – Comparação entre a razão dos parâmetros de L1 e L2.

Amostras	Deformação Média	DP Médio	Tensão de Ruptura Média	DP Médio	Módulo de Elasticidade Média	DP Médio
L1	1.00	0.10	0.94	0.05	0.94	0.0045
L2	0.92		1.00		1.00	

Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

Figura 14 – Gráfico comparativo da razão entre os parâmetros de L1 e L2.



Fonte: Arquivo pessoal dos autores, 2026.

Analisando L1 e L2, vemos que L2 possui parâmetros ligeiramente melhores. Contudo, a diferença não é grande, ainda mais se considerado o desvio padrão das amostras.

A análise por elementos finitos não-linear de um material plástico contendo pontos de concentração de tensão deve ser avaliada com cautela quanto aos níveis de tensão na peça. Ocorre que pontos com cantos vivos, pequenos raios, entalhes, ou nesse caso bolhas; São concentradores de tensão que tendem a elevar as tensões sofridas pela peça. Contudo, matematicamente esses são pontos de singularidade que podem gerar resultados com tensões muito mais altas que as observadas na prática Seweryn, 2002.

Apesar dos resultados da simulação não parecerem apresentar fenômenos de singularidade, o método mais confiável é avaliando a deformação/grau de absorção de energia dos corpos de prova. Não só pela questão matemática, mas pela natureza dos materiais poliméricos que são problemáticos quanto a classificação da sua tenacidade (Richard W. Hertzberg; Jason L.Hertzberg; Richard P. Vinci, 2012).

Assim, os resultados de deformação simulados claramente evidenciam uma maior deformação nos corpos de prova com bolhas, mesmo que o corpo de prova apresente uma força resultante idêntica ao material liso. O comportamento observado na figura 10 corrobora com o que foi observado nos ensaios de tração. A presença de bolhas no material pode favorecer a falha prematura do material, isso ocorre, pois, as bolhas concentram tensão, podendo criar microfissuras/trincas que podem se propagar levando a falha do material (Richard W. Hertzberg; Jason L.Hertzberg; Richard P. Vinci, 2012).

5 CONCLUSÕES

Conforme proposto, foi possível obter as peças utilizando os processos e metodologias do vacuum casting em todas as linhas de Processo. E podemos concluir que o uso de pressão na cura do poliuretano demonstrou-se um procedimento necessário para a obtenção de peças de melhor qualidade e dentre as linhas de processo desse grupo, as que passaram pela câmara de vácuo possuem os melhores parâmetros (L1 e L2), das quais a Linha de Processo L2 obteve os melhores resultados com uma melhora de 9% na tensão de ruptura comparado às amostras sem vácuo e sem cura sob pressão e um desvio padrão 55% menor.

Portanto, a adoção da Linha de Processo L2 é a mais indicada. Em situações onde há variação no tempo de trabalho das resinas de Poliuretano fornecidas no mercado para valores inferiores a 7 minutos, L1 poderá ser utilizada. Há ainda algumas resinas de poliuretano que possuem tempo de trabalho extremamente baixos (cerca de 2 minutos), nesses casos a Linha de Processo L3 é a mais indicada.

As simulações reforçaram o que foi observado durante o experimento, evidenciando que a presença de bolhas no material pode reduzir o desempenho mecânico do poliuretano. O que reforça a importância de realizar uma desgaseificação eficiente das peças produzidas no processo.

REFERÊNCIAS

AKINDOYO, John O. *et al.* **Polyurethane types, synthesis and applications-a review.** RSC **Advances** Royal Society of Chemistry, 2016.

CANEVAROLO, Sebastião V. **CIÊNCIA DOS POLÍMEROS - Um Texto Básico Para** Tecnólogos e Engenheiros. 2010.

DAS, Abhijit; MAHANWAR, Prakash. **A brief discussion on advances in polyurethane applications.** **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research** KeAi Communications Co., 1 jul. 2020.

FELDMAN, Dorel. Polymer History. **Designed Monomers and Polymers**, v. 11, n. 1, p. 1–15, 1 fev. 2008.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Plastics Market Size, Share & Industry Analysis, By Type (Polyethylene, Polypropylene, Polyethylene Terephthalate, Polyvinyl Chloride, Acrylonitrile Butadiene Styrene, Polyamide, Polycarbonate, Polyurethane, Polystyrene, and Others), By End-use Industry (Packaging, Automotive & Transportation, Infrastructure & Construction, Consumer Goods/Lifestyle, Healthcare & Pharmaceutical, Electrical & Electronics, Textile, and Others), and Regional Forecast,**

2026-2034. Report ID: FBI102176. <https://www.fortunebusinessinsights.com/plastics-market-102176>.

GVR PLASTICS. **Bio-based Polyurethane Market (2025 - 2030).**
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/bio-based-polyurethane-industry>.

GVR PLASTICS; POLYMERS & RESINS. **Polyurethane Market (2026 - 2033).**
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/polyurethane-pu-market>.

KUO, Chil Chyuan; WU, Min Xiang. Evaluation of service life of silicone rubber molds using vacuum casting. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 90, n. 9–12, p. 3775–3781, 1 jun. 2017.

LI, Qingxu *et al.* **Bio-based polyurethane for road engineering applications: A comprehensive review.** **Journal of Road Engineering** KeAi Publishing Communications Ltd., 1 dez. 2025.

R. B. SEYMOUR. **History of Polymeric Composites.** [S.l.: S.n.].

RICHARD W. HERTZBERG; JASON L. HERTZBERG; RICHARD P. VINCI.
Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. Fifth ed. [S.l.: S.n.].

SEWERYN, Andrzej. **Modeling of singular stress fields using finite element method.** [S.l.: S.n.]. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/ijsolstr>.

S. S. DIMOV; D. T. PHAM. **Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling.** [S.l.: S.n.].

WORTMANN, Martin *et al.* The Deterioration Mechanism of Silicone Molds in Polyurethane Vacuum Casting. **ACS Applied Polymer Materials**, v. 2, n. 11, p. 4719–4732, 13 nov. 2020.

WORTMANN, Martin *et al.* Silicone Mold Accuracy in Polyurethane Vacuum Casting. **Macromolecular Symposia**, v. 395, n. 1, 1 fev. 2021.

WORTMANN, Martin; FRESE, Natalie. **Industrial-scale vacuum casting with silicone molds: A review.** **Applied Research** John Wiley and Sons Inc, 1 jun. 2022.