



Igor Duarte Parreira

Uso de Impressora 3D em Reometria.

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio.

Orientadora: Prof. Mônica Feijó Naccache.

Coorientadora: Priscilla Ribeiro Vargas.

Rio de Janeiro

Junho 2024

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha orientadora Mônica Naccache e à minha coorientadora Priscilla Varges, por terem tido paciência, apoio e boa vontade, e acreditado no potencial deste trabalho de conclusão de curso.

Em seguida, gostaria de agradecer também aos meus familiares, por serem a minha fonte de motivação. Agradecer principalmente ao meu pai e minha tia por arcarem com todos os custos, tanto financeiros quanto psicológicos, atrelados ao meu ensino superior. Aos meus amigos da faculdade, por todas as horas de estudo juntos, e aos do colégio, por sempre acreditarem no meu potencial.

Agradeço à PUC, a todos os integrantes do GReo, que me auxiliaram na evolução deste projeto, e às agências CNPq, CAPES e FAPERJ pelo apoio concedido no desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

Duarte Parreira, Igor; Feijó Naccache, Mônica; Uso de Impressão 3D em Reometria. Rio de Janeiro, 2024. 41p. Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os reômetros rotacionais são instrumentos essenciais na medição de propriedades de fluidez e deformação de materiais viscoelásticos, amplamente utilizados em diversas indústrias. Este trabalho visa desenvolver geometrias de trabalho impressas em 3D como substitutas para as peças originais de reômetros, com o objetivo de reduzir custos, permitir o uso descartável e criar novas geometrias para testes. O objetivo desse projeto consiste em criar, modelar e imprimir geometrias de trabalho que possam substituir as peças originais do reômetro do Grupo de Reologia da PUC-Rio. A primeira fase envolve modelar e imprimir geometrias existentes. Posteriormente, serão realizados testes com diferentes geometrias e resinas para avaliar sua eficácia e semelhança com as peças originais. Por fim, novas geometrias serão testadas para verificar possíveis melhorias. O estudo inicia com a calibração da impressora 3D e a aplicação de técnicas para minimizar erros durante a impressão. As geometrias serão desenhadas no SolidWorks e impressas utilizando diferentes tipos de resinas. Inicialmente, três geometrias diferentes serão impressas e testadas com fluidos newtonianos e não-newtonianos. O processo será repetido com novas geometrias para avaliar suas propriedades e desempenho. Espera-se construir geometrias impressas com alta eficiência e sem deformações, estabelecer um procedimento padrão para a fabricação de geometrias para reômetros rotacionais, e produzir geometrias que possam ser usadas imediatamente conforme a demanda e variedade dos ensaios. A impressão 3D de peças para reômetros pode oferecer uma alternativa eficiente e econômica, possibilitando a criação de geometrias personalizadas e descartáveis, melhorando a flexibilidade e a precisão dos testes realizados. Ao final deste projeto, concluiu-se que apesar do avanço no desenvolvimento da modelagem das geometrias, possibilitando obter resultados com erros pequenos, ainda não se estabeleceu um design ideal para se elaborar um processo padrão de fabricação e impressão.

Palavras-chave:

Impressora 3D; Reômetros; Geometrias; Materiais viscoelásticos; Calibração; Resinas.

Abstract

Duarte Parreira, Igor; Feijó Naccache, Mônica; Uso de Impressão 3D em Reometria. Rio de Janeiro, 2024. 41p. Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Rotational rheometers are essential instruments for measuring the flow and deformation properties of viscoelastic materials, widely used in various industries. This work aims to develop 3D-printed working geometries as substitutes for the original rheometer parts, with the goal of reducing costs, allowing for disposable use, and creating new geometries for testing. The objective of this project is to create, model, and print working geometries that can replace the original parts of the rheometer in the Rheology Group at PUC-Rio. The first step involves modeling and printing existing geometries. Subsequently, tests will be conducted with different geometries and resins to evaluate their effectiveness and similarity to the original parts. Finally, new geometries will be tested to verify possible improvements. The study begins with the calibration of the 3D printer and the application of techniques to minimize errors during printing. The geometries will be designed in Solidworks and printed using different types of resins. Initially, three different geometries will be printed and tested with Newtonian and non-Newtonian fluids. The process will be repeated with new geometries to evaluate their properties and performance. It is expected to print geometries with high efficiency and without deformations, establish a standard procedure for the manufacture of geometries for rotational rheometers, and produce geometries that can be used immediately according to the demand and variety of the tests. The 3D printing of rheometer parts can offer an efficient and economical alternative, enabling the creation of customized and disposable geometries, improving the flexibility and accuracy of the tests performed. At the end of this project, it has been concluded that despite advances in the development of geometry modeling, making it possible to obtain results with small errors, an ideal design has not yet been established to develop a standard manufacturing and printing process.

Keywords:

3D Printer; Rheometer; Geometries; Viscoelastic Materials; Calibration; Resins.

Sumário

Agradecimentos	2
Resumo	3
Abstract	4
Lista de Figuras	6
Lista de Tabelas.....	9
1. Introdução.....	11
1.1 Principais Geometrias do Reômetro.....	13
1.2 Tipos de Resinas para Impressão 3D:	17
2. Metodologia.....	21
2.1 Fase I: Estudo do Funcionamento da Impressora 3D	22
2.2 Fase II: Desenvolvimento de amostras.	32
2.3 Fase III: Seleção das Geometrias.	44
3. Resultados	45
3.1 Cálculo do Erro Percentual.....	51
4. Conclusão.....	53
4.1 Conclusões e Avanços no Design da Modelagem da Base do Furo	53
4.2 Integração com Resultados dos Testes.....	54
4.3 Análise comparativa de Resultados e de Custos.....	55
5. Referências Bibliográficas.....	58

Lista de Figuras

Figura 1.1 Geometria Ranhurada (Concentric Cylinder Cross Hatched).....	13
Figura 1.2 Geometria Lisa (Concentric Cylinder Recessed End).	14
Figura 1.3 Geometria Vane (Concentric Cylinder Vane).....	15
Figura 1.4 Geometria Ranhurada (Concentric Cylinder Cross Hatched).....	16
Figura 1.5 Geometria Discos e Paralelos.	17
Figura 1.6 Exemplo de aplicação Resina Standard.	18
Figura 1.7 Exemplo de aplicação Resina de Alta Resistência.....	18
Figura 1.8 Exemplo de aplicação Resina Flexíveis.....	19
Figura 1.9 Exemplo de aplicação Resina de Alta Resistência.....	19
Figura 1.10 Exemplo de aplicação Resina Transparente.....	20
Figura 1.11 Exemplo de aplicação Resina Calcinável.	20
Figura 1.12 Exemplo de aplicação Resina Transparente.....	21
Figura 2.1 Setup da Impressora 3D Resina Form3B da Formlabs.	22
Figura 2.2 Plataforma de Impressão (a), Tanque de resina V2 (b).....	23
Figura 2.3 Ajuste dos pés da impressora	23
Figura 2.4 Alinhamento do círculo azul.	24
Figura 2.5 Visão geral dos principais comandos do PreForm.....	24
Figura 2.6 Configuração da escala.	25
Figura 2.7 Configuração da orientação das geometrias.....	26
Figura 2.8 Configuração dos suportes a serem utilizados nas geometrias.	26
Figura 2.9 Configuração da localização das geometrias.	27
Figura 2.10 Escolha da Resina a ser utilizada.	27
Figura 2.11 Definição da espessura da camada.....	28
Figura 2.12 Modelo de calibração.	29
Figura 2.13 FormWash (a), Retirada da FormWash (b).....	30
Figura 2.14 Equipamento de Cura - FormCure	31
Figura 2.15 Retífica utilizada para dar o acabamento superficial nas geometrias.	32

Figura 2.17 Geometrias de Calibração da Resina Rigid 10K (A) e da Resina Clear V4 (B).	35
Figura 2.18 Modelagem 3D das Geometrias Originais: Cilíndrica Ranhurada (a) Cilíndrica Lisa (b) Cilíndrica Cônica(c) Geometria Vane(d).....	36
Figura 2.19 Impressão das Geometrias Originais: Cilíndrica Ranhurada(a) Cilíndrica Lisa (b) Cilíndrica Cônica(c) Geometria Vane (d).....	36
Figura 2.20 Recipientes preenchidos com IPA para a lavagem das geometrias da Resina Rigid 10K.	37
Figura 2.21 Exemplo de suportação pré impressão (cor cinza).....	39
Figura 2.22 Geometria sem acabamento de superfície (a); Geometria com acabamento de superfície (b).....	40
Figura 2.23 Geometrias sendo avaliadas para verificação de precisão de encaixe e detecção visual de oscilações durante a rotação.	41
Figura 2.24 Correção do erro no furo roscado da geometria.	42
Figura 2.25 Correção do erro na base do furo da geometria.	42
Figura 2.26 Adição dos quatro furos (a) Adição dos furos no final do furo roscado (b).	43
Figura 2.27 Face da amostra completamente lixada (a) Face da amostra evidenciada em branco na parte superior e parcialmente lixada na parte inferior (b) Desnível da amostra ao exibir o seu tamanho original sem a camada branca(c).....	44
Figura 3.1 Dados Inseridos da Geometria e Valores dos testes de Calibração.	45
Figura 3.2 Definição da temperatura do Sistema e tempo de espera para atingir regime permanente.	46
Figura 3.3 Valor mínimo e máximo de análise da taxa de cisalhamento, tempo de equilíbrio, período de amostra e tolerância dos dados.....	47
Figura 3.4 Vista do experimento montado e pronto para ser executado.	47
Figura 3.5 Gráfico Viscosidade Geometria Original Cone.	48
Figura 3.6 Gráfico Viscosidade Geometria Original Lisa.	49
Figura 3.7 Gráfico Viscosidade Geometria Lisa Rigid 10K.	49
Figura 3.8 Gráfico Viscosidade Geometria Ranhurada Rigid 10K.	50
Figura 3.9 Gráfico Viscosidade Geometria Ranhurada V3.1 Clear V4.	50

Figura 3.10 Gráfico Viscosidade Geometria Ranhurada V3 Clear V4.	51
Figura 3.11 Gráfico Viscosidade Geometria Ranhurada V6 Clear V4.	51
Figura 3.12 Gráfico de resultados compilados da viscosidade.....	55

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Propriedades da Resina Clear V4 Pré e Pós-Cura.	33
Tabela 2.2 Propriedades da Resina Rigid 10k Pré e Pós-Cura.	34
Tabela 2.3 Tempo de Lavagem com álcool Isopropílico (IPA) na FormWash.....	37
Tabela 2.4 Tempo e Temperatura de Cura na FormCure.	38
Tabela 3.1 Dados do Óleo Padrão IPT84 OP150 referente a diferentes temperaturas.....	48
Tabela 3.2 Dados do Erro percentual de cada Geometria.	52
Tabela 3.3 Tabela comparativa de preço da geometria original com a de melhor resultado (na resina Rigid 10K).	56

*“O homem não teria alcançado o possível se,
repetidas vezes, não tivesse tentado o impossível.”*

Max Weber.

1. Introdução

Reômetros rotacionais são instrumentos de medição que utilizam a rotação para avaliar as propriedades reológicas de fluidos e semissólidos. Eles medem a viscosidade e outros comportamentos de fluxo de uma amostra aplicando um torque e observando a resposta ao cisalhamento. Esses dispositivos são essenciais para entender como um material escoa e se deforma sob diferentes condições, medindo importantes propriedades como viscosidade, e determinando a presença de elasticidade e tixotropia. São fundamentais para controlar o desempenho de materiais em várias condições de processamento e aplicação, sendo ferramenta importante para utilização em indústrias alimentícia, cosmética, farmacêutica, de tintas e revestimentos, e no setor de petróleo e gás.

A tecnologia de reometria tem suas raízes no início do século XX, mas os reômetros rotacionais modernos começaram a ser desenvolvidos comercialmente a partir da década de 1950. Desde então, esses instrumentos evoluíram significativamente, permitindo medições mais precisas e a análise de uma variedade maior de materiais. Eles garantem a qualidade e consistência dos produtos e são ferramentas cruciais para a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais.

Impressoras 3D de resina, conhecidas como impressoras de estereolitografia (SLA) ou de processamento digital de luz (DLP), são dispositivos que criam objetos tridimensionais a partir de resina líquida fotossensível. Utilizando um laser ou um projetor digital, a resina é solidificada camada por camada, permitindo a construção de objetos complexos com alta precisão e detalhes finos. Essas impressoras são amplamente utilizadas para criar protótipos, peças funcionais e modelos detalhados em áreas como engenharia, odontologia, medicina, joalheria, modelismo e nas indústrias automotiva e aeroespacial.

Na engenharia e manufatura, as impressoras 3D de resina são usadas para prototipagem rápida, criando modelos que permitem testar a forma, ajuste e função dos produtos. Na odontologia e medicina, são utilizadas para criar modelos dentários e anatômicos. Na joalheria, são essenciais para a produção de moldes de cera perdida. No modelismo e miniaturas, possibilitam a produção de peças detalhadas para hobbies e colecionáveis. A tecnologia de impressão 3D de resina foi uma das primeiras formas de

impressão 3D a ser desenvolvida, com a estereolitografia (SLA) inventada por Charles W. Hull em 1986¹, que fundou a 3D Systems.

Os engenheiros utilizam essas impressoras para validar projetos antes da produção em massa, fabricar ferramentas e gabaritos, criar peças personalizadas sob demanda e realizar testes de forma e função de novos produtos. A tecnologia tem evoluído continuamente, com avanços na formulação de resinas, precisão de impressão e velocidade, ampliando suas aplicações.

Os preços dos reômetros variam consideravelmente, dependendo da marca, modelo e capacidade do equipamento. Equipamentos de laboratório mais simples podem custar alguns milhares de dólares, enquanto reômetros avançados e de alta precisão podem custar dezenas de milhares de dólares ou mais, dependendo das especificações. Os reômetros rotacionais funcionam com diferentes geometrias, que simulam escoamentos de cisalhamento. A definição da geometria a ser utilizada depende do tipo de material a ser caracterizado. As geometrias são vendidas como acessórios dos reômetros e seu custo é bastante elevado. Materiais abrasivos, extremamente viscosos ou quimicamente reativos podem danificar as geometrias do reômetro, mesmo com manutenção adequada. Considerando o custo, a escassez de peças no mercado e os longos períodos de espera para importação das geometrias, surgiu a motivação para este trabalho: produzir geometrias que similares às peças originais do fabricante e outras derivadas, por meio da impressão 3D de resinas.

O objetivo é diminuir o custo das geometrias, possibilitar o uso descartável em ensaios que possam danificar a peça original e criar novas geometrias para testes. No Laboratório do Grupo de Reologia da PUC-Rio, a primeira fase envolve modelar, imprimir e construir geometrias de trabalho similares às existentes, utilizando diferentes resinas. Posteriormente, serão realizados testes nos reômetros com as diferentes geometrias impressas para analisar sua efetividade. Finalmente, novas geometrias serão testadas para verificar seus efeitos e melhorias nos ensaios de reometria.

¹ <https://fesmo.com.br/artigos/estereolitografia-em-impressora-3d-de-resina-formlabs/#:~:text=O%20termo%20estereolitografia%20foi%20cunhado,material%20cur%C3%A1vel%20por%20luz%20ultravioleta.>

1.1 Principais geometrias do reômetro

Os reômetros rotacionais possuem atualmente tipos diferentes de geometrias, cada uma com diferentes propriedades, problemas e limitações. A seguir são descritas as principais geometrias utilizadas.

1.1.1 Couette (cilindros concêntricos)

As geometrias do reômetro desempenham papéis cruciais na obtenção de medições reológicas precisas, cada uma sendo projetada para otimizar a análise de diferentes tipos de materiais. A geometria de **cilindros concêntricos ranhurada (Concentric Cylinder Cross Hatched)**, Figura 1.1, é ideal para medir a viscosidade de fluidos não-newtonianos como suspensões e géis, devido à sua superfície texturizada que previne o deslizamento da amostra e assegura uma distribuição uniforme do cisalhamento. Isso a torna especialmente útil em aplicações na indústria alimentícia e cosmética, onde é necessário evitar a separação de fases durante a medição. Nesta geometria, o cilindro gira dentro de um copo cilíndrico, e o fluido é posicionado na folga anular entre o copo e o cilindro. O copo pode ser liso ou ranhurado.



Figura 1.1 Geometria Ranhurada (Concentric Cylinder Cross Hatched).

A geometria de **cilindros concêntricos lisa (Concentric Cylinder)** é mostrada na Figura 1.2. Ela é adequada para medir a viscosidade de amostras de baixa viscosidade.



Figura 1.2 Geometria cilindros concêntricos lisa (Concentric Cylinder).²

A geometria **Vane (Concentric Cylinder Vane)**, Figura 1.3, possui um rotor interno em formato de pá ou hélice, sendo indicada para medir a viscosidade de materiais altamente viscoelásticos, como géis, pastas e polímeros. Esta configuração é ideal para estudar o comportamento de fluência e recuperação, distribuindo uniformemente o cisalhamento através da amostra. Além disso, é útil para testar lamas e suspensões densas, evitando o deslizamento e garantindo medições mais precisas.

² <https://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/BROCH-DHR-Accessories.pdf>, Página 21.



Figura 1.3 Geometria Vane (Concentric Cylinder Vane).

A geometria **cilindros concêntricos cônica (Concentric Cylinder Cone)**, Figura 1.4, é composta por cilindros concêntricos onde a extremidade interna forma um cone. Esta configuração é ideal para medir a viscosidade de fluidos de baixa viscosidade, proporcionando uma área de contato maior entre a amostra e a geometria, o que melhora a precisão das medições. É especialmente útil para testar óleos, solventes e outras substâncias pouco viscosas.



Figura 1.4 Geometria cilindros concêntricos cônica (Concentric Cylinder Cone).

Em resumo, as diferentes geometrias do reômetro – Cross Hatched, Recessed End, Vane e Cone – são projetadas para atender às necessidades específicas de vários tipos de materiais e condições de teste, proporcionando resultados reológicos confiáveis e reprodutíveis. Cada geometria tem sua funcionalidade específica: Cross Hatched para evitar deslizamento em fluidos não-newtonianos, Recessed End para precisão em pequenos volumes, Vane para materiais viscoelásticos e suspensões densas, e Cone para medir fluidos de baixa viscosidade com alta precisão.

1.1.2 Discos paralelos (parallel plates)

A geometria de **Discos Paralelos (parallel plates)**, Figura 1.5, é amplamente utilizada em reômetros para medir propriedades reológicas de diversos materiais. Consiste em dois discos planos e paralelos, com a amostra colocada entre eles. Um disco é fixo enquanto o outro rotaciona, aplicando cisalhamento à amostra. Essa configuração é ideal para medir viscosidade de fluidos de média a alta viscosidade, realizar testes de fluência e recuperação, e analisar comportamento tixotrópico. É adequada para uma ampla gama de amostras, como

géis, cremes, pastas, polímeros fundidos, suspensões e emulsões, devido à sua simplicidade e versatilidade. Assim como a geometria de cilindros concêntricos, os discos podem ter ranhuras, para evitar o problema de deslizamento dos fluidos na superfície, que resulta na obtenção imprecisa de dados.

A preparação da amostra é simples e o espaçamento ajustável entre os discos permite otimizar a resolução de medição. A geometria de discos paralelos garante uma distribuição uniforme de cisalhamento, proporcionando dados precisos e reproduzíveis, sendo uma ferramenta essencial para estudos reológicos detalhados.



Figura 1.5 Geometria Discos e Paralelos.³

1.2 Tipos de Resinas para Impressão 3D:

1.2.1 Resinas padrão (Standard)

Usada para prototipagem rápida e modelos conceituais, oferecendo bom nível de detalhe e acabamento superficial, como mostrado na Figura 1.6.

³ <https://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/BROCH-DHR-Accessories.pdf>, Página 8.



Figura 1.6 Exemplo de aplicação Resina Standard.⁴

1.2.2 Resinas de alta resistência (Engineering Resins)

Possuem alta resistência mecânica, adequadas para componentes funcionais e prototipagem robusta, como mostrado na Figura 1.7.



Figura 1.7 Exemplo de aplicação Resina de Alta Resistência.⁵

1.2.3 Resinas flexíveis

São elásticas e usadas em protetores de choque, peças de encaixe e vedações, como mostrado na Figura 1.8.

⁴ <https://formlabs.com/store/materials/white-resin/>

⁵ <https://formlabs.com/store/materials/rigid-10k-resin/>



Figura 1.8 Exemplo de aplicação Resina Flexíveis.⁶

1.2.4 Resinas dentárias e biocompatíveis

São certificadas para uso médico, criando alinhadores ortodônticos, modelos dentários e guias cirúrgicas, como mostrado na Figura 1.9.

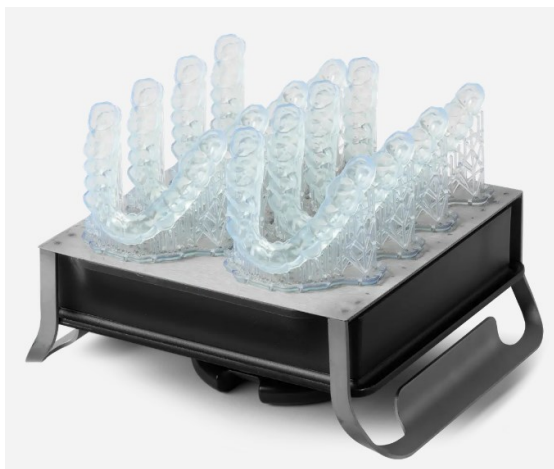


Figura 1.9 Exemplo de aplicação Resina de Alta Resistência.⁷

⁶ <https://formlabs.com/store/materials/flexible-80a-resin/>

⁷ <https://formlabs.com/store/materials/dental-lt-comfort-resin/>

1.2.5 Resinas transparentes

Produzem peças com alta clareza óptica, ideais para lentes, componentes ópticos e modelos de fluidodinâmica, como mostrado na Figura 1.10.



Figura 1.10 Exemplo de aplicação Resina Transparente.⁸

1.2.6 Resinas calcináveis

São essenciais na fundição de metais, usadas em joalheria e odontologia para moldes de cera perdida, como mostrado na Figura 1.11.



Figura 1.11 Exemplo de aplicação Resina Calcínável.⁹

⁸ <https://formlabs.com/store/materials/biomed-clear-resin/>

⁹ <https://3dlab.com.br/produto/resina-3d-calcinavel/>

1.2.7 Resinas de alta temperatura

Resistem a temperaturas elevadas, usadas em moldes para injeção de plásticos e testes de engenharia térmica, como mostrado na Figura 1.12.

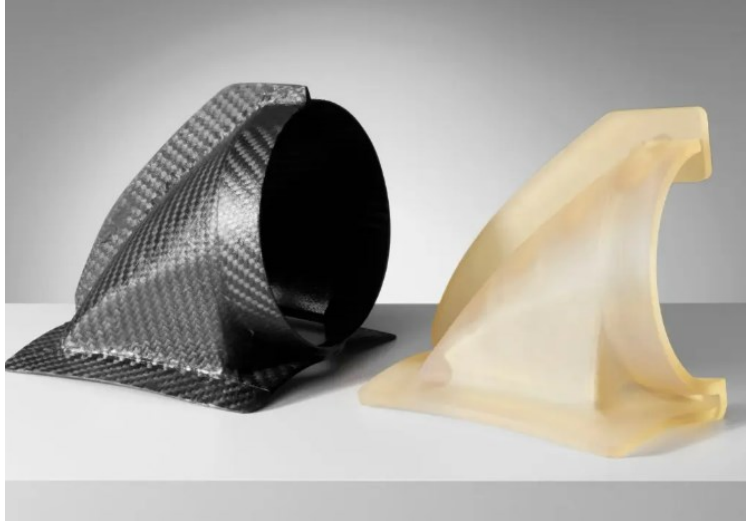


Figura 1.12 Exemplo de aplicação Resina Transparente.¹⁰

2. Metodologia

O desenvolvimento deste projeto foi dividido em três fases. Na primeira fase foi realizado um estudo sobre o funcionamento da impressora 3D disponível no laboratório do Grupo de Reologia da PUC-Rio (GReo). Na segunda fase, deu-se início à análise das resinas a serem utilizadas e à impressão das geometrias. E, por fim, na terceira fase, foram selecionadas as melhores geometrias para a realização dos testes nos reômetros para calcular a precisão das medidas realizadas pelas mesmas.

¹⁰ <https://formlabs.com/store/materials/high-temp-resin/>

2.1 Fase I: Estudo do funcionamento da impressora 3D

Este estudo visava o entendimento de processos desde o início até o processo de aquisição do produto final, tais como:

- Setup da impressora Utilizada

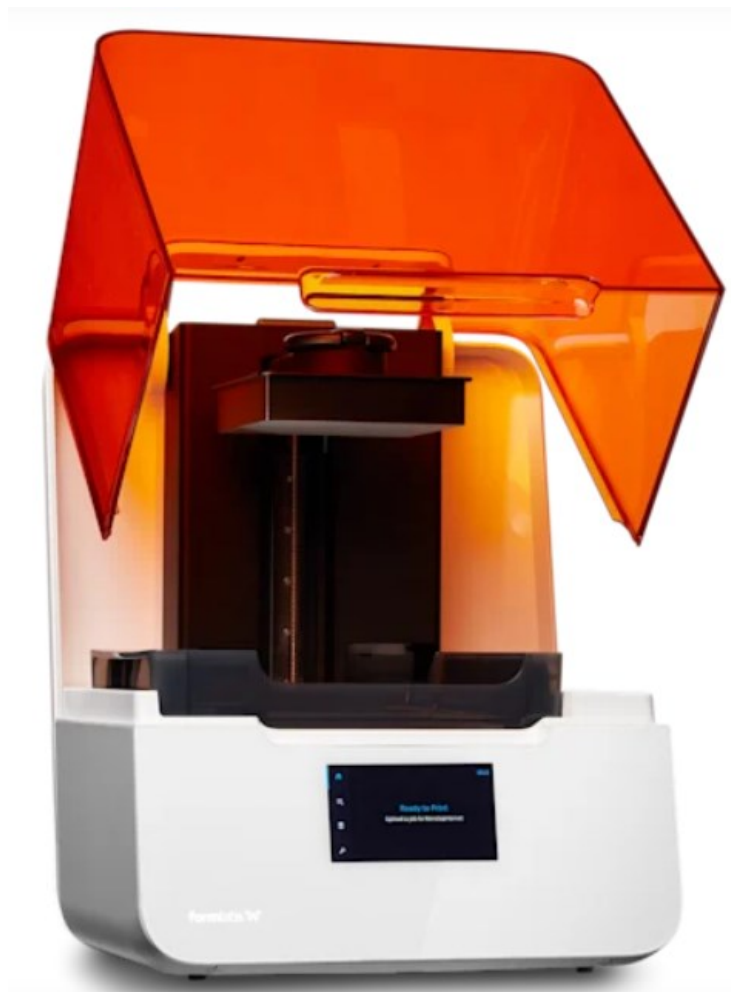


Figura 2.1 Setup da Impressora 3D Resina Form3B da Formlabs.¹¹

¹¹ <https://fesmo.com.br/artigos/impressoras-3d-da-formlabs-de-tecnologia-sla-e-sls/>

➤ Montagem dos componentes da impressora.

Neste passo, retira-se os componentes da embalagem, Figura 2.2, e encaixa-os na impressora, conforme mostrado na Figura 2.1.

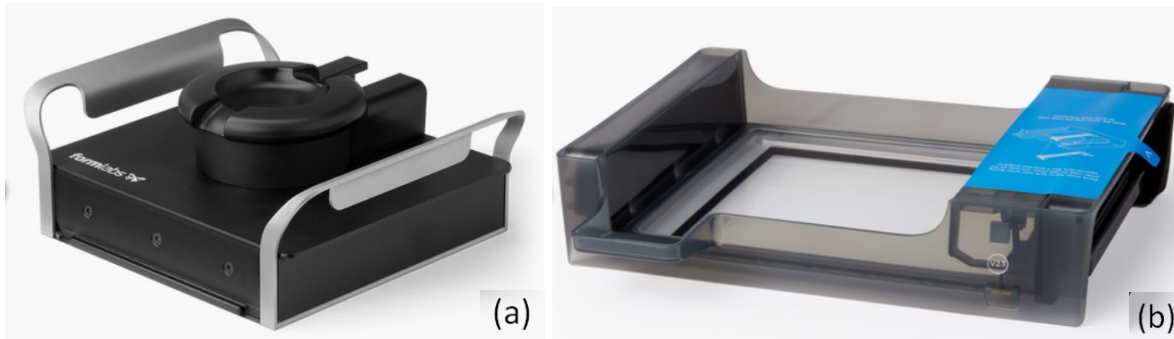


Figura 2.2 Plataforma de Impressão (a)¹², Tanque de resina V2 (b)¹³.

➤ Alinhamento e nivelamento da base

Para realizar o nivelamento da base da impressora, utilizam-se dois discos. Encaixa-se em cada pé da base e o rotaciona para aumentar ou diminuir a altura do pé em questão, Figura 2.3.



Figura 2.3 Ajuste dos pés da impressora¹⁴

¹² <https://formlabs.com/store/accessories/build-platform-2/>

¹³ <https://formlabs.com/store/form-3-resin-tank/>

¹⁴ https://support.formlabs.com/s/article/Leveling-Formlabs-SLA-printers?language=en_US

Após o nivelamento, o ideal é que o círculo azul esteja perfeitamente no centro da circunferência, conforme a imagem abaixo.



Figura 2.4 Alinhamento do círculo azul.

- Utilização do programa de impressão PreForm, Figura 2.5, o qual permitia modificar vários aspectos, tais como:

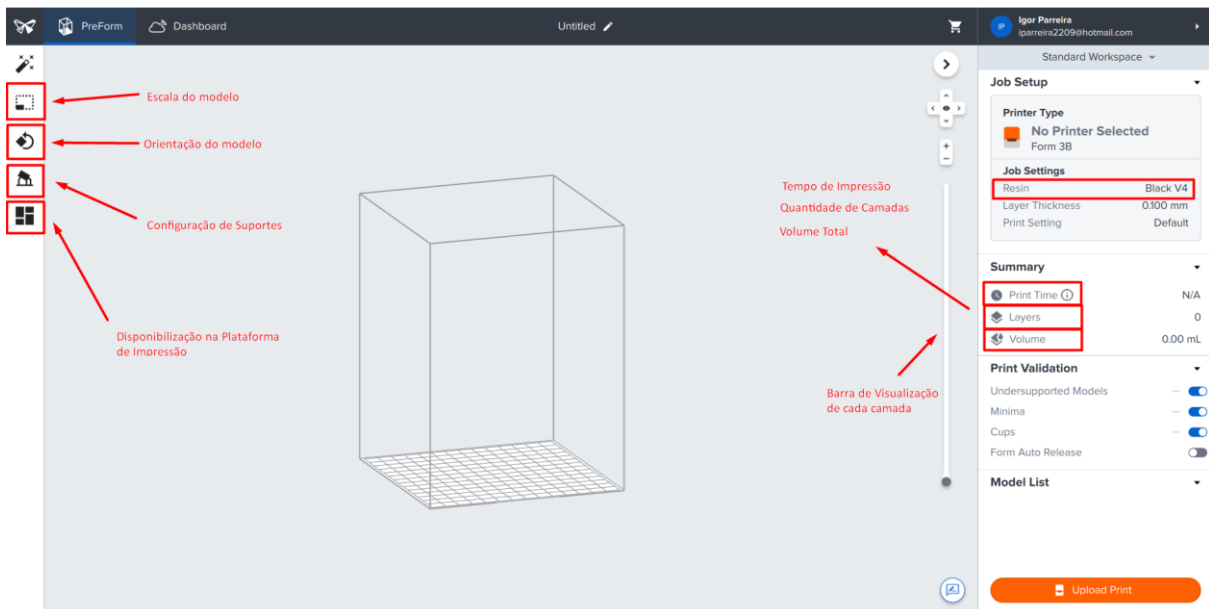


Figura 2.5 Visão geral dos principais comandos do PreForm.

- Distribuição dos suportes na base da plataforma e na geometria de impressão;
- Ângulo e orientação de impressão;
- Distribuição e espaçamento de suportes nas peças;
- Tempo de impressão total;
- Volume total de resina utilizada;
- Espessura da camada de impressão;
- Resina utilizada;
- Verificação de segurança que informava caso houvesse alguma parte da peça sem suporte ou copos formados.

A Configuração de Escala, Figura 2.6, não foi utilizada, visto que as geometrias já estavam modeladas nas unidades corretas para impressão.

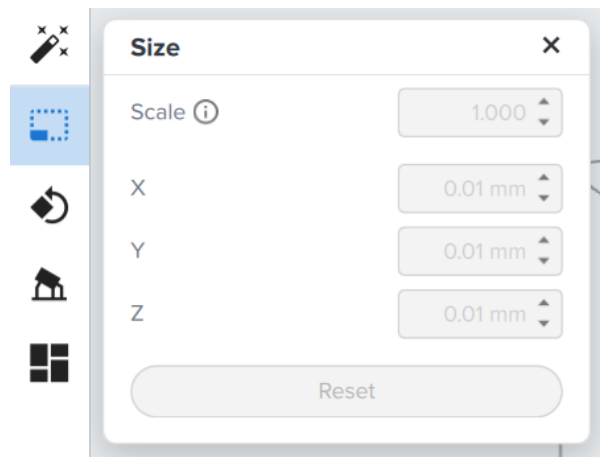


Figura 2.6 Configuração da escala.

A orientação utilizada como padrão para todas as impressões realizadas neste projeto, foi colocando a base da geometria em direção a plataforma de impressão. Essa orientação era ajustada pelo comando, Figura 2.7, conforme a orientação que a peça era importada do SolidWorks.

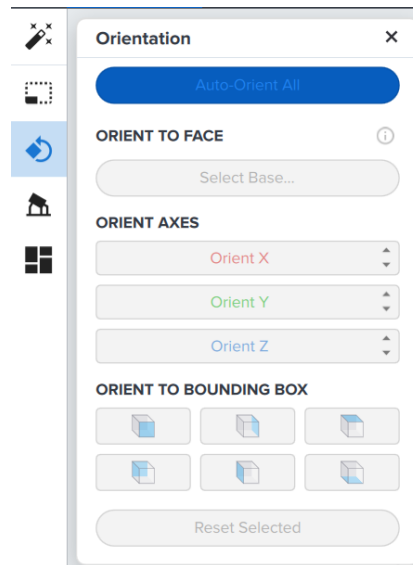


Figura 2.7 Configuração da orientação das geometrias.

Para a configuração dos suportes, foi utilizada uma base completa (Full Raft) para facilitar a remoção da geometria da plataforma de impressão. Além disso, os pontos de contato foram selecionados de maneira simétrica para evitar erros durante a rotação das geometrias.

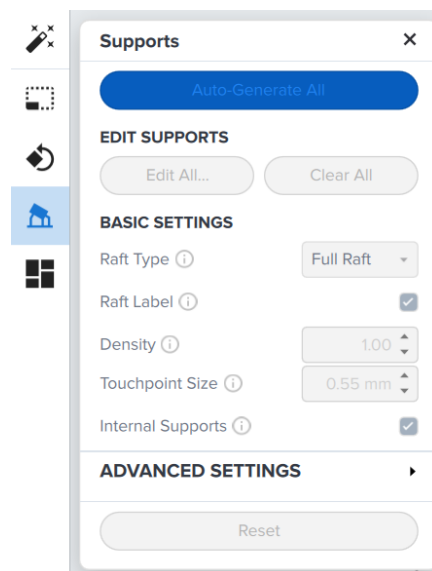


Figura 2.8 Configuração dos suportes a serem utilizados nas geometrias.

Na configuração da Localização das geometrias na base de impressão, quanto menor for a distância entre as geometrias durante a impressão, menor será o tempo total necessário

para concluir o processo. Dito isso, o tempo de impressão era ajustado conforme a demanda e disponibilidade do uso do laboratório.

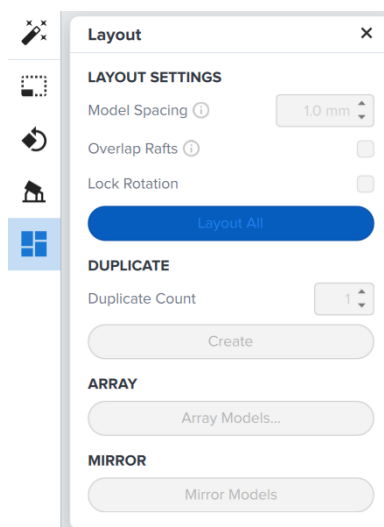


Figura 2.9 Configuração da localização das geometrias.

No Preform, você tem acesso a todas as configurações de todas as resinas que a empresa fornece, ainda separadas por tipos de função, conforme mostrado na Figura 2.10.

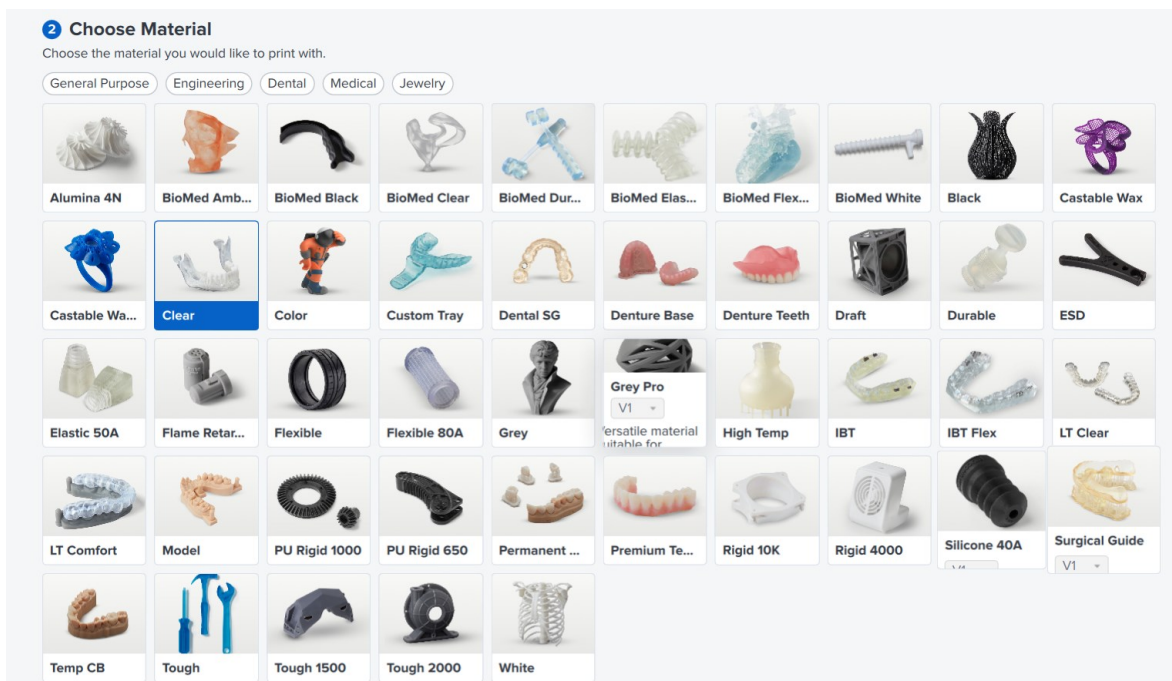


Figura 2.10 Escolha da Resina a ser utilizada.

Após a escolha da resina, aparece a opção de escolha da espessura da camada para impressão, Figura 2.11, com esses valores sendo fixos por camada ou adaptativo (variando a espessura da camada conforme necessidade de precisão da parte impressa da geometria).



Figura 2.11 Definição da espessura da camada.

Quanto menor a espessura da camada, maior é a precisão da impressão. Consequentemente, o tempo necessário para finalizar a impressão também é maior.

➤ Calibração da impressão

O processo de calibração da impressão via "fit tuning" na impressora Formlabs Form 3B envolve ajustes finos para garantir que a plataforma de construção esteja corretamente alinhada e que a resina cure de maneira adequada durante a impressão.

O Teste de Ajuste é um objeto impresso em 3D para calibrar o encaixe dos modelos, composto por duas partes: o "bloco" e o "pino".

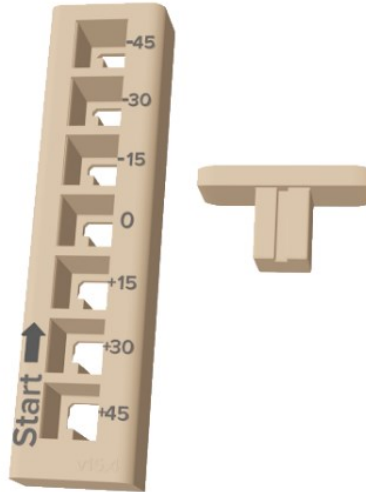


Figura 2.12 Modelo de calibração.

O teste resulta em valores de +45, +30, +15, 0, -15, -30 ou -45, com +45 sendo o encaixe mais solto. O teste começa inserindo o pino na ranhura marcada como +45.

Se o pino for facilmente removido, ele é inserido na próxima ranhura. Para verificar o encaixe correto, deve-se:

- Segurar o pino pelas laterais curtas para obter alavancagem.
- Torcer e girar o pino na ranhura.

Um encaixe adequado não deve ter folga. Então, continua-se avançando para a próxima ranhura até encontrar a posição correta. O número no orifício de visualização do pino indica o valor de Ajuste da Impressora para o material e a espessura da camada.

➤ Tratamento pós impressão: retirada da plataforma, lavagem e cura das peças.

Após a impressão, é essencial realizar um tratamento pós-impressão adequado para garantir a qualidade e durabilidade da peça impressa.

Primeiramente, desligue a impressora e retire a plataforma de impressão com cuidado para evitar danificar a geometria.

O tanque da FormWash é preenchido com álcool isopropílico (IPA) até o nível indicado. Então, coloca-se a plataforma de impressão, com a peça ainda fixada, dentro da cesta de lavagem. Em seguida, ajusta-se o temporizador da FormWash para o tempo recomendado de acordo com cada tipo de resina.

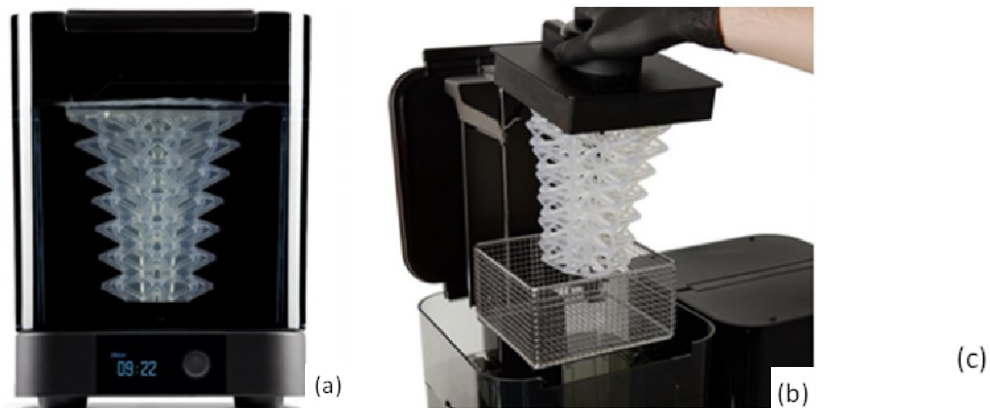


Figura 2.13 FormWash (a), Retirada da FormWash (b).¹⁵

Após a lavagem, retira-se a plataforma e coloca-se a peça para secar ao ar ou com ar comprimido para remover o excesso de IPA, conforme Figura 2.13.

Em seguida, após a secagem, utilize uma espátula ou ferramenta apropriada para remover a peça impressa da plataforma de impressão com cuidado.

Para o processo de cura, a peça é colocada no centro da câmara de cura e inicia-se o ciclo. A Form Cure utiliza luz UV e calor para finalizar a cura da resina conforme imagem acima. Após o término do ciclo, retira-se a peça da Form Cure, que estará completamente curada e pronta para os passos finais.

¹⁵ <https://fesmo.com.br/artigos/formlabs-form-wash-automatiza-a-limpeza-de-impressao-para-resultados-consistentes/>



Figura 2.14 Equipamento de Cura - FormCure¹⁶

➤ Retirada de suportes.

Para remover os suportes de uma impressão 3D de maneira eficiente e segura, é essencial seguir alguns passos importantes. Primeiro, prepara-se adequadamente utilizando luvas e óculos de proteção, além de trabalhar em uma área bem iluminada e limpa. As ferramentas necessárias incluem alicates de corte, pinças, limas, lixas e estiletes ou facas de precisão.

Começa-se identificando os pontos de contato dos suportes e utiliza-se os alicates de corte para remover os suportes maiores, cortando próximo à base. Para suportes menores, utiliza-se pinças e estiletes, para lixar as áreas ásperas após a remoção. Após a remoção inicial, inspeciona-se a peça para garantir que todos os suportes foram retirados e realiza-se lixamento adicional se necessário. Para finalizar, a peça é limpa para remover qualquer resíduo restante.

➤ Acabamento superficial com micro retífica.

Para dar um acabamento superficial com uma retífica, Figura 2.15, é crucial seguir uma série de etapas que garantem a qualidade e a segurança do processo. Utilizando

¹⁶ <https://fesmo.com.br/artigos/formlabs-form-wash-automatiza-a-limpeza-de-impressao-para-resultados-consistentes/>

equipamentos de proteção como óculos, luvas, protetores auriculares e máscara contra poeira, fixa-se a peça firmemente e escolhe-se a pedra de esmeril ou lixa adequada ao material e ao tipo de acabamento desejado.

Ajusta-se a velocidade da retífica conforme recomendado e move-se a ferramenta suavemente sobre a superfície da peça em movimentos uniformes e controlados, evitando aplicar muita pressão. Utiliza-se fluido de corte ou lubrificante para resfriar a peça e a ferramenta, quando necessário, prevenindo superaquecimento e deformação.



Figura 2.15 Retífica utilizada para dar o acabamento superficial nas geometrias.¹⁷

2.2 Fase II: Desenvolvimento de amostras.

i. Estudo das propriedades da resina já presente no laboratório e escolha da segunda resina a ser testada.

A resina Clear V4 já estava presente no Laboratório e já era utilizada para outros fins. No entanto, iniciou-se o estudo da resina para que pudesse ser confirmada a viabilidade da sua utilização para geometrias do reômetro, e também, verificar a possibilidade de existir uma resina que tivesse uma melhor aplicação para este estudo.

A resina Clear V4, é conhecida por sua alta transparência, tornando-a ideal para peças que requerem clareza visual e estética de vidro. Possui boa rigidez e durabilidade moderada, conforme Tabela 2.1, sendo versátil para uma variedade de protótipos e modelos que exigem

¹⁷ <https://cgferramentas.com.br/produtos/microretificadremel3000/>

detalhes finos e acabamento liso. Ela oferece boa resistência à tração e flexão, mas não é projetada para suportar condições extremas.

Tabela 2.1 Propriedades da Resina Clear V4 Pré e Pós-Cura.¹⁸

Clear V4	Green ²	Post-Cured ³
Tensile Properties		
Ultimate Tensile Strength	38 MPa	65 MPa
Tensile Modulus	1.6 GPa	2.8 GPa
Elongation at Break	12%	6%
Flexural Properties		
Flexural Modulus	1.3 GPa	2.2 GPa
Impact Properties		
Notched Izod	16 J/m	25 J/m
Thermal Properties		
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	43 °C	58 °C
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	50 °C	73 °C

Assim, após uma pesquisa das resinas disponíveis e suas aplicações, encontrou-se a resina Rigid 10K, que por sua vez, é extremamente rígida, com alta resistência a deformações e temperaturas elevadas, tornando-a adequada para aplicações que exigem estabilidade térmica e suportam cargas pesadas, conforme dados da Tabela 2.2. Embora não seja transparente, oferece um bom acabamento superficial e excelente estabilidade dimensional, ideal para componentes funcionais. A Clear V4 é melhor para protótipos estéticos, enquanto a Rigid 10K é mais adequada para peças funcionais que requerem alta resistência mecânica e estabilidade.

A resina Rigid 10K apresentou-se como a mais ideal para geometrias de reômetro devido à sua alta rigidez, que minimiza deformações, garantindo medições precisas de propriedades reológicas. Sua excelente resistência a altas temperaturas mantém a integridade estrutural sob variações térmicas, enquanto sua durabilidade superior suporta cargas pesadas e estresses elevados. Além disso, a Rigid 10K oferece excelente estabilidade dimensional, mantendo as dimensões originais com alta precisão, essencial para a consistência dos resultados em testes reológicos. Em contraste, a Clear V4, embora adequada para protótipos

¹⁸ <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/1801089-TDS-ENUS-0.pdf>

estéticos, não possui as mesmas propriedades mecânicas e térmicas avançadas necessárias para aplicações exigentes em reômetros.

Tabela 2.2 Propriedades da Resina Rigid 10k Pré e Pós-Cura.¹⁹

Rigid 10k	Green	UV Cure ¹	UV + Thermal Cure ²	UV Cure + Media Blast
Tensile Properties				
Ultimate Tensile Strength	55 MPa	65 MPa	53 MPa	88 MPa
Tensile Modulus	7.5 GPa	10 GPa	10 GPa	11 GPa
Elongation at Break	2%	1%	1%	1.7%
Flexural Properties				
Flexural Strength	84 MPa	126 MPa	103 MPa	158 MPa
Flexural Modulus	6 GPa	9 GPa	10 GPa	9.9 GPa
Impact Properties				
Notched Izod	16 J/m	16 J/m	18 J/m	20 J/m
Unnotched Izod	41 J/m	47 J/m	41 J/m	130 J/m
Thermal Properties				
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	65 °C	163 °C	218 °C	238 °C
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	56 °C	82 °C	110 °C	92 °C
Thermal Expansion, 0-150 °C	48 µm/m/°C	47 µm/m/°C	46 µm/m/°C	41 µm/m/°C

ii. Calibração das resinas por meio do Fit Tuning:

Ao colocar para imprimir a peça de calibração, verifica-se em qual ranhura a peça se encaixa melhor, com o mínimo de folgas possível. No caso da foto (A), primeiramente foi realizada a impressão com a resina Rigid 10K, sem calibração, a qual retornou um valor de +15 micrometros, e após aplicado o valor na impressora, retornou o valor ideal de 0, conforme o “check” azul.

¹⁹ <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001479-TDS-ENUS-0.pdf>

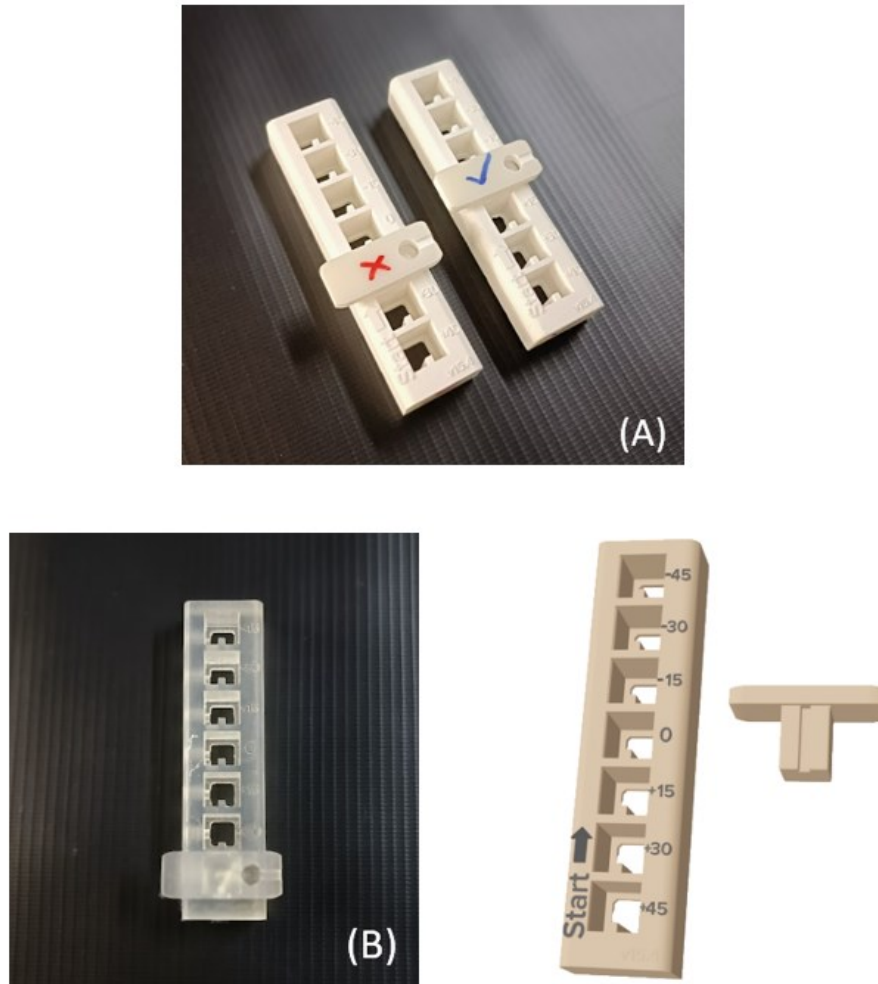


Figura 2.16 Geometrias de Calibração da Resina Rigid 10K (A) e da Resina Clear V4 (B).

iii. Desenvolvimento dos designs a partir das geometrias originais dos reômetros.

Para o início das criações dos modelos das peças originais no SolidWorks, foram modeladas todas as geometrias cilíndricas concêntricas, Figura 2.18. As geometrias (a) e (d) foram as mais desafiadoras de se modelar. Sem um modelo com medidas ou então um desenho 2D das mesmas, houve a necessidade de se basear na tentativa e erro para acertar os contornos.

A complexidade do design dessas peças está diretamente ligada à dificuldade de alcançar a eficiência na impressão. Quanto mais intrincado era o formato da geometria, mais desafiador foi determinar as dimensões adequadas para modelá-las no SolidWorks.

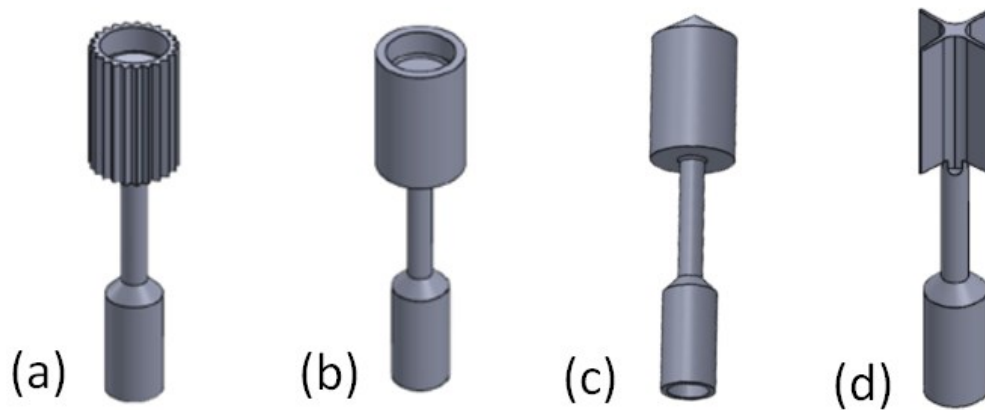


Figura 2.17 Modelagem 3D das Geometrias Originais: Cilíndrica Ranhurada (a) Cilíndrica Lisa (b) Cilíndrica Cônica(c) Geometria Vane(d).

iv. Impressão das geometrias para testes

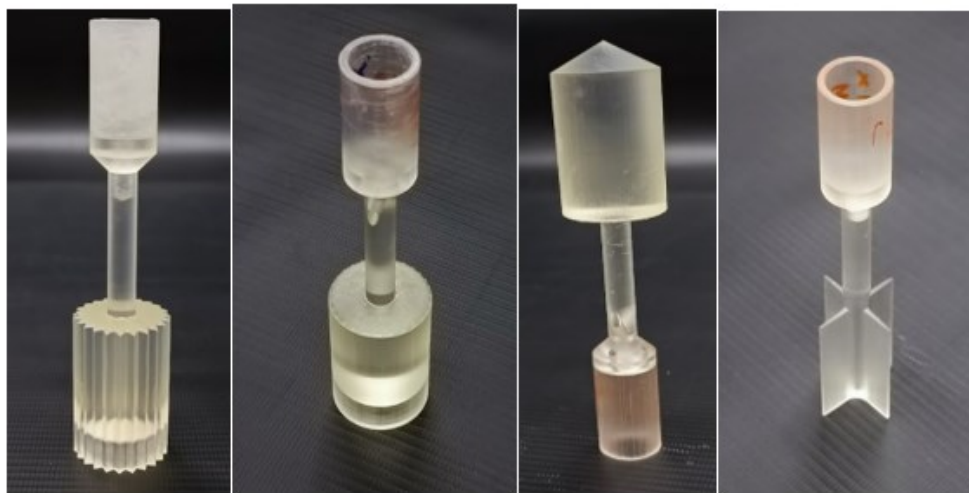


Figura 2.18 Impressão das Geometrias Originais: Cilíndrica Ranhurada(a) Cilíndrica Lisa (b) Cilíndrica Cônica(c) Geometria Vane (d).

v. Processo de lavagem utilizando a FormWash

A lavagem da resina Clear V4 e de outras resinas do mesmo grupo, Tabela 2.3, é feita em 10 minutos na FormWash, conforme já explicado.

Tabela 2.3 Tempo de Lavagem com álcool Isopropílico (IPA) na FormWash.²⁰

Black Resin V4 Clear Resin V4 Color Resin Grey Resin V4 White Resin V4	10 min
Rigid 10K Resin V1 Rigid 10K Resin V1.1	10 min + 10 min

E para a lavagem da Resina Rigid 10K são necessárias duas lavagens de 10 minutos cada, em recipientes diferentes, Figura 2.20, devido à sua composição possuir mini fragmentos de vidro, os quais podem contaminar as peças impressas pela resina Clear V4.



Figura 2.19 Recipientes preenchidos com IPA para a lavagem das geometrias da Resina Rigid 10K.

²⁰ <https://s3.amazonaws.com/servicecloudassets.formlabs.com/media/Finishing/Washing/115001347744-Form+Wash+Time+Settings/FormWashSettings.pdf>

vi. Processo de cura usando a FormCure.

A resina Clear V4 e a Rigid 10K têm processos de cura distintos na Form Cure, conforme mostrado na tabela. A resina Clear V4 requer um tempo de cura recomendado de 15 minutos a uma temperatura de 60°C, com uma cura completa de 30 minutos à mesma temperatura. Em contraste, a resina Rigid 10K V1 e V1.1 necessita de um tempo de cura recomendado de 60 minutos a 70°C. Para uma pós-cura térmica completa, a Rigid 10K requer 125 minutos a 90°C, conforme Tabela 2.4. Essas diferenças refletem a necessidade de ajustes específicos no processo de cura para otimizar as propriedades de cada resina.

Tabela 2.4 Tempo e Temperatura de Cura na FormCure.²¹

Clear Resin	Recommended ¹	15 min	60 °C
	Full post-cure	30 min	60 °C
Rigid 10K Resin V1 Rigid 10K Resin V1.1	Recommended ⁸	60 min	70 °C
	Thermal post-cure	125 min	90 °C

Além disso, esse processo é recomendado realizar ainda com os suportes presos na geometria, para melhor acabamento e não alterar o modelo durante o tempo de cura.

vii. Retirada dos suportes

A remoção dos suportes das resinas Clear V4 e Rigid 10K requer abordagens específicas devido às suas características distintas, conforme exemplo da Figura 2.21. Para a Clear V4, usa-se equipamentos de proteção e ferramentas como alicates de corte, pinças e lixas. O processo envolve cortar os suportes maiores, remover os menores com pinças e alisar a superfície, resultando em uma peça clara e bem acabada. Para a Rigid 10K, devido à sua alta rigidez, o uso de ferramentas robustas é necessário. O processo é semelhante, mas exige mais força e paciência. Após cortar e remover os suportes com cuidado, pois devido a sua rigidez a retirada do suporte pode danificar a estrutura, a peça pode precisar de lixamento mais intenso.

²¹ <https://s3.amazonaws.com/servicecloudassets.formlabs.com/media/Finishing/Post-Curing/115001414464-Form%20Cure%20Time%20and%20Temperature%20Settings/FormCurePost-CureSettings.pdf>

A Clear V4 é mais fácil de trabalhar, enquanto a Rigid 10K resulta em peças extremamente rígidas e duráveis, adequadas para aplicações funcionais.

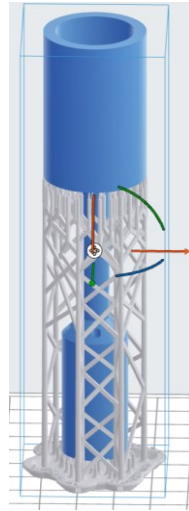


Figura 2.20 Exemplo de suportes pré-impresão (cor cinza).

viii. Acabamento superficial

O acabamento superficial das geometrias do reômetro impacta significativamente os resultados dos testes reológicos. Superfícies rugosas aumentam a aderência da amostra, prevenindo deslizamentos que podem levar a medições imprecisas, enquanto superfícies extremamente lisas podem causar deslizamento indesejado e subestimar a viscosidade, Figura 2.22. A uniformidade do cisalhamento é afetada pelo acabamento; superfícies lisas promovem uma distribuição uniforme, essencial para a precisão, enquanto irregularidades podem causar variações locais.

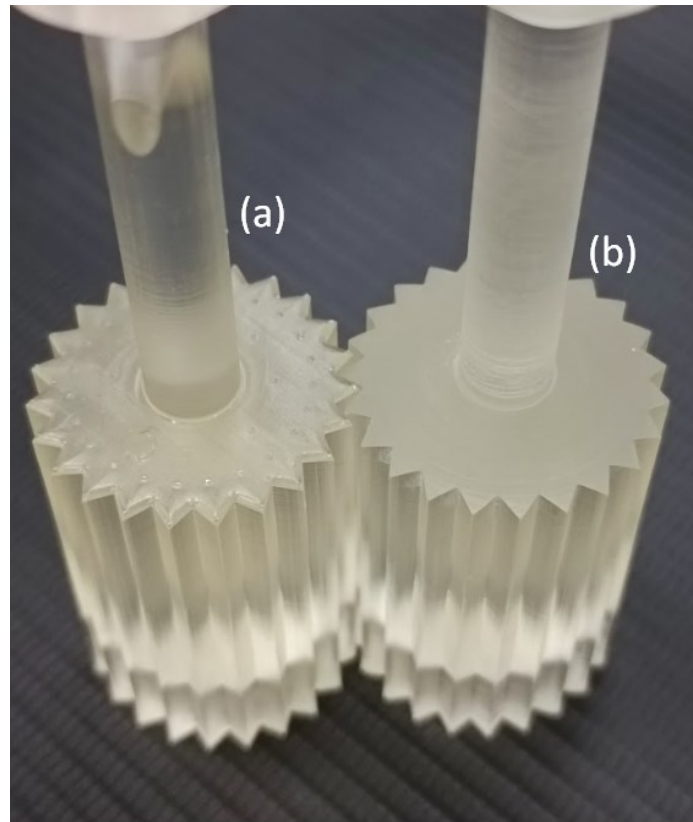


Figura 2. 21 Geometria sem acabamento de superfície (a); Geometria com acabamento de superfície (b).

A textura da superfície influencia o comportamento da amostra no escoamento. Para resultados reprodutíveis, o acabamento deve ser consistente entre os testes. Além disso, superfícies lisas facilitam a limpeza e reduzem o risco de contaminação, enquanto superfícies rugosas podem reter resíduos. Garantir um acabamento superficial adequado e manutenção regular é crucial para obter medições precisas e consistentes.

ix. Análise de encaixe no reômetro e avaliação visual de rotação.

Para identificar que uma geometria está rotacionando fora do eixo em um reômetro, Figura 2.23, é essencial observar alguns sinais e utilizar métodos específicos.

Visualmente, um movimento oscilatório ou uma trajetória irregular pode indicar problemas de excentricidade. Ferramentas como um relógio comparador ou calibradores de excentricidade podem medir variações durante a rotação. Sensores de vibração também são úteis para detectar aumentos nas vibrações, sugerindo desalinhamento. Dados reológicos

inconsistentes e ruídos anormais durante a operação são sinais adicionais de que a geometria pode estar fora do eixo. Ações corretivas incluem recalibração da geometria, manutenção do equipamento para verificar desgastes e substituição de peças danificadas.

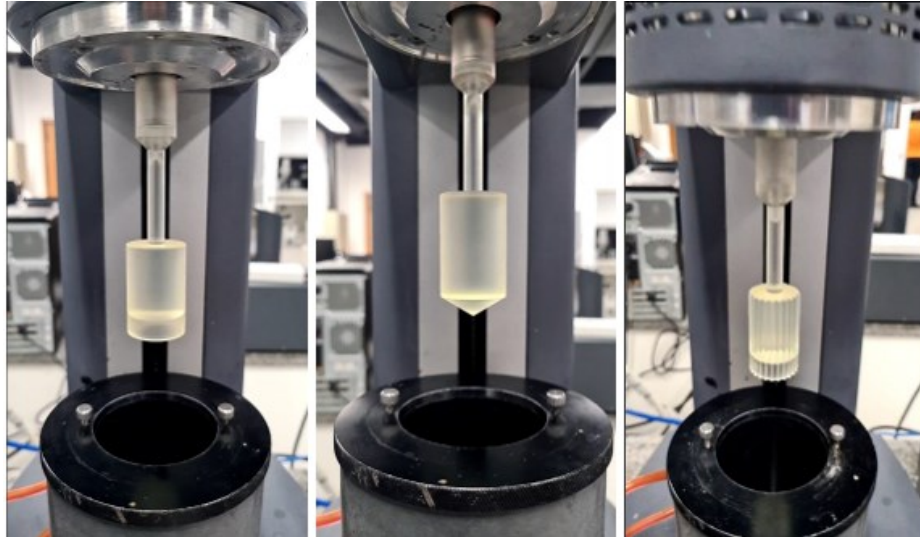


Figura 2.22 Geometrias sendo avaliadas para verificação de precisão de encaixe e detecção visual de oscilações durante a rotação.

Caso haja alguma falha nesse processo, repete-se o procedimento a partir do passo **iii**.

x. Erros e soluções encontradas

Durante o desenvolvimento inicial, o furo especificado como M4 X 0.7 - 6H, na modelagem original, não era corretamente reconhecido pelo software PreForm. Para contextualizar, "M4" indica um diâmetro nominal de 4 mm, "0.7" é o passo da rosca (distância entre os filetes), e "6H" refere-se à tolerância da rosca interna, garantindo precisão no encaixe. Diante da incapacidade do PreForm em reconhecer a rosca da forma que estava sendo feita, a solução foi usiná-la manualmente no torno após a impressão. Essa solução deu resultados, porém realizar esse processo no torno trouxe algumas imperfeições para a peça, deixando-a desalinhada, o que afetava o seu desempenho. Portanto, essa solução foi descartada.

Após diversas tentativas, conseguiu-se que o software reconhecesse a rosca, mas de forma inadequada. O PreForm identificava a rosca como helicoidal, e não passante, Figura 2.24, resultando em um acúmulo indesejado de resina dentro do furo.

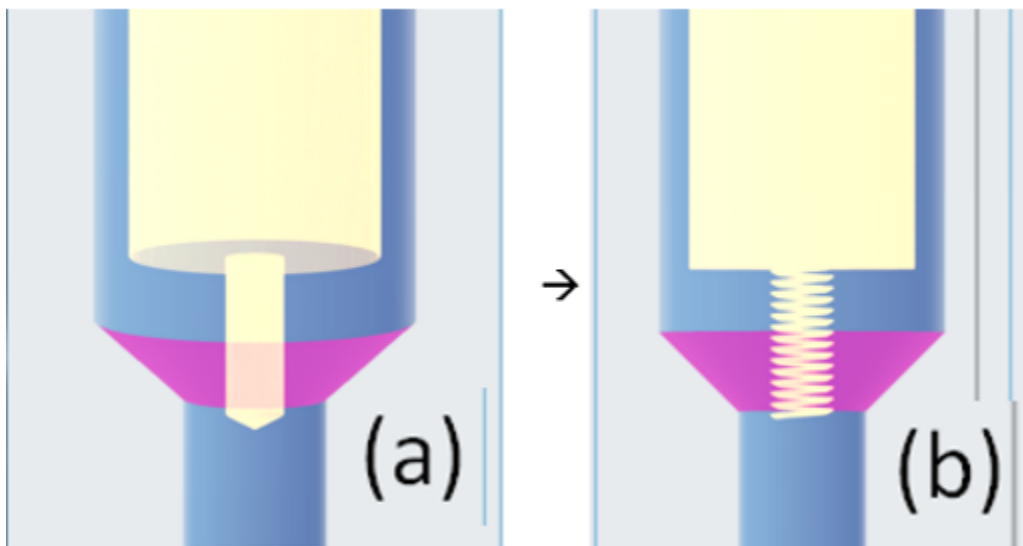


Figura 2.23 Correção do erro no furo roscado da geometria.

Para economizar resina e melhorar a funcionalidade, desenvolveu-se vários modelos de bases, Figura 2.25, na tentativa de fazer as correções necessárias.

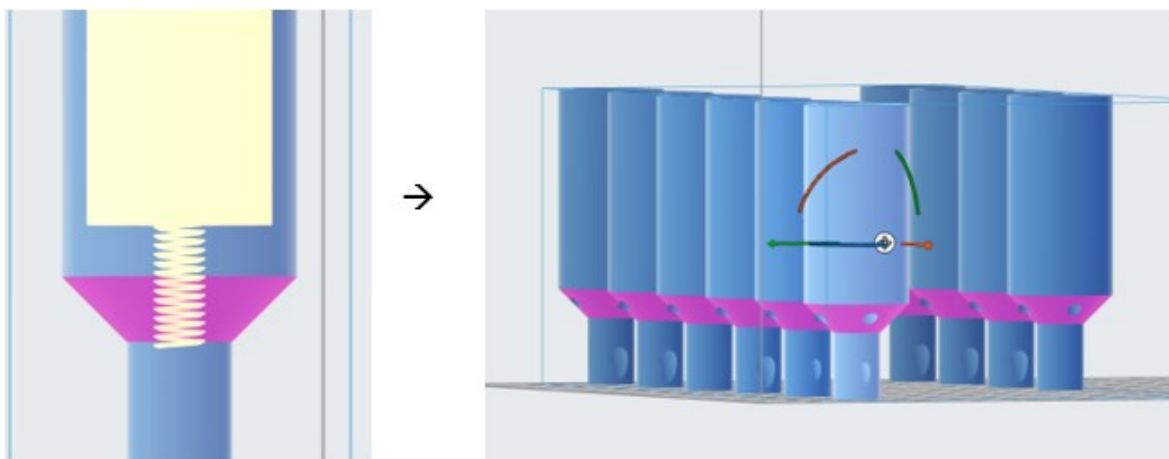


Figura 2.24 Correção do erro na base do furo da geometria.

Após várias iterações, como mostrado na figura acima, alcançou-se duas soluções simultâneas. Primeiramente, conseguiu-se que o furo roscado fosse integralmente reconhecido pelo software da impressora. Em segundo lugar, resolveu-se o problema do acúmulo de resina na base durante a impressão, ao introduzir inicialmente quatro furos passantes na base para permitir o escoamento do excesso de resina, conforme Figura 2.26. Posteriormente, adicionamos dois furos passantes conectados ao furo roscado, evitando o acúmulo de resina no próprio furo.

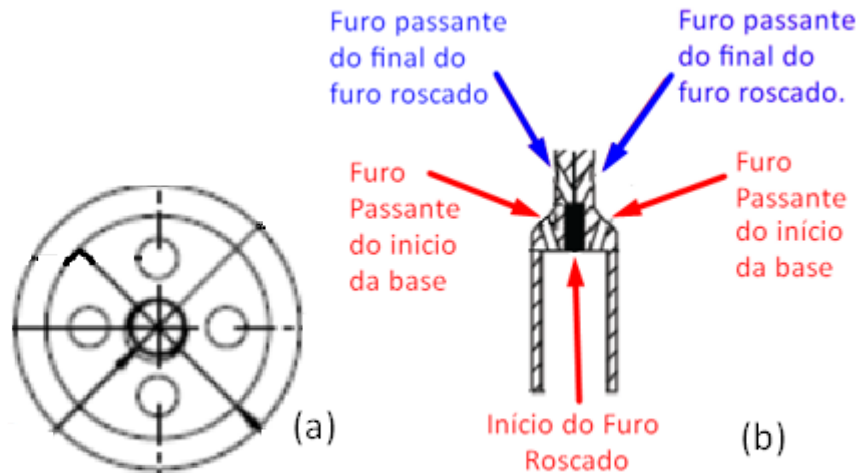


Figura 2.25 Adição dos quatro furos (a) Adição dos furos no final do furo roscado (b).

Com essas correções, ajustou-se o diâmetro do furo roscado para facilitar o encaixe da geometria no reômetro, já que anteriormente estava muito justo, dificultando o manuseio.

Apesar de solucionar os problemas de encaixe da base, a geometria ainda apresentava oscilações que impediam a aprovação na inspeção visual. Identificou-se que a causa estava no método de suporte da geometria. O suporte automático, que não era simétrico, foi substituído por suportes simétricos, corrigindo as oscilações e permitindo a realização dos testes de calibração e, futuramente, dos testes de eficiência da análise de viscosidade.

Ao mudar para a resina Rigid 10K, novos desafios surgiram. Após o processo de lavagem e cura, a resina deixava uma fina camada branca na superfície da geometria, que parecia soltar um tipo de pó branco. Essa camada reduzia o ajuste da peça, impossibilitando seu encaixe no reômetro, pois as dimensões estavam muito menores. Além disso, houve a preocupação de que essa camada pudesse se misturar com o fluido em análise, potencialmente alterando os resultados. Para solucionar esses problemas, lixou-se a superfície para remover completamente a camada externa, conforme Figura 2.27.

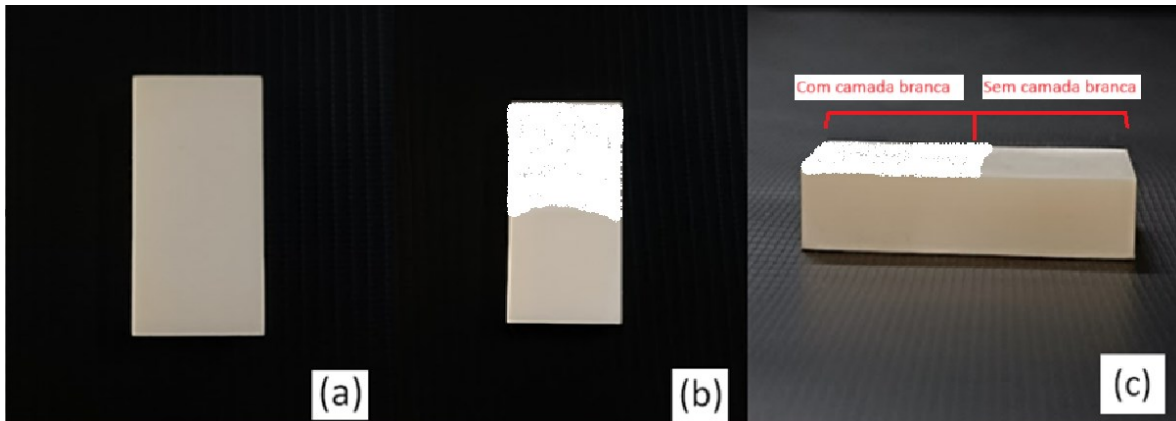


Figura 2.26 Face da amostra completamente lixada (a) Face da amostra evidenciada em branco na parte superior e parcialmente lixada na parte inferior (b) Desnível da amostra ao exibir o seu tamanho original sem a camada branca(c).

No entanto, chegar em todos os cantos estreitos da peça com uma lixa manual para resolver o problema não era possível. A solução adotada foi aumentar a tolerância dos valores de entrada do furo para encaixar com o reômetro, tanto do diâmetro interno do furo roscado, quanto do interno do furo principal.

2.3 Fase III: Seleção das geometrias.

Após análise do encaixe e rotação visual das geometrias, e visto que não haviam grandes oscilações, demos sequência à calibração da geometria diante dos seus valores de inércia e fricção no reômetro, e posteriormente foram selecionadas as geometrias que aparentavam ter os melhores resultados.

Tabela 2.4 Geometrias aprovadas no teste de inércia e fricção.

Clear V4	Rigid 10K
Lisa V4	Ranhurada V6.1
Lisa V7	Lisa V6.1
Ranhurada V3	
Ranhurada V3.1	
Ranhurada V6	

As geometrias selecionadas fazem parte de diferentes desenvolvimentos do design. A nomenclatura “V” significa a versão do desenvolvimento que ela participou. Dito isso,

entende-se que, mesmo elas não sendo as últimas versões desenvolvidas, elas apresentaram um desempenho superior às demais.

3. Resultados

Para realização dos testes de comparação da viscosidade encontradas pelas geometrias desenvolvidas com o valor de referência, optou-se pela utilização do Óleo Padrão IPT84 OP150. A partir dele, foram feitos testes com duas das geometrias originais (a Cilíndrica Lisa e a Cilíndrica Cônica) para efeito de comparação com as outras geometrias, visto que, todas deveriam atingir um único valor de viscosidade, este estipulado pela tabela de acordo com a respectiva temperatura.

O processo de realização dos testes seguiu a seguinte configuração:

I. Calibração das geometrias selecionadas.

Neste processo, é adicionado os dados das dimensões da parte da geometria que realiza o experimento, para calibração. Os valores a serem calibrados são por meio do teste de calibração da Inercia e da Fricção da geometria, conforme todos os dados presentes na Figura 3.1.

The screenshot displays the 'Geometria Lisa V4' software window. It features a 'Geometry Settings' section with radio buttons for 'DIN', 'Recessed/Standard' (selected), and 'Vane'. Below this, several input fields are shown with their respective units: Bob diameter (28.0 mm), Bob length (42.0 mm), Cup diameter (30.4 mm), Operating gap (4000.0 μm), and Loading gap (90000.0 μm). There is a 'Disposable' checkbox and dropdown menus for 'Bob material' (Acrylic), 'Environmental system' (Peltier), and 'Surface finish' (Standard). A note states 'Minimum sample volume is 7.52675 mL'. The 'Constants' section includes fields for 'Geometry Inertia' (3.06822 $\mu\text{N.m.s}^2$), 'Friction' (0.283659 $\mu\text{N.m/(rad/s)}$ with an 'Enabled' checkbox), 'End-effect factor' (1), 'Stress Constant' (17867.6 Pa/N.m), 'Strain Constant' (12.1872 1/rad), and 'Fluid Density Constant' (2.8945e-10). A 'Notes' section is at the bottom.

Figura 3.1 Dados Inseridos da Geometria e Valores dos testes de Calibração.

II. Setup do experimento no programa do reômetro no computador:

Etapas 1: Condicionamento da Amostra

Decidiu-se trabalhar com o óleo na temperatura ambiente, devido a facilidade de realização do teste, visto que, caso utilizasse uma temperatura superior, tornaria o teste mais longo. O tempo imersão foi estabelecido conforme as práticas padrões, já utilizadas em outros testes do laboratório. Dados apresentados na Figura 3.2.

Procedure: temperature ramp

1: Conditioning Sample

Environmental Control

Temperature °C ☐ Inherit Set Point

Soak Time s ☐ Wait For Temperature

Sample relaxation

☐ Wait for axial relaxation

Preshear options

☐ Perform preshear

Equilibration

☐ Perform equilibration

Figura 3.2 Definição da temperatura do Sistema e tempo de espera para atingir regime permanente.

Etapas 2: Varredura de Fluxo

Valores de taxa de cisalhamento, tempo de equilíbrio, período de amostra e tolerância de dados foram pré estabelecidos conforme as práticas padrões, já utilizadas em outros testes do laboratório. Os dados estão apresentados na Figura 3.3.

2: Flow Sweep

Environmental Control	
Temperature	25 °C <input type="checkbox"/> Inherit Set Point
Soak Time	0,0 s <input type="checkbox"/> Wait For Temperature

Test Parameters	
Logarithmic sweep	
Shear rate	100,0 1/s to 1,0e-3 1/s
Points per decade	4
<input checked="" type="checkbox"/> Steady state sensing	
Max. equilibration time	1000,0 s
Sample period	30,0 s
% tolerance	0,1
Consecutive within	3
<input type="checkbox"/> Scaled time average	

Figura 3.3 Valor mínimo e máximo de análise da taxa de cisalhamento, tempo de equilíbrio, período de amostra e tolerância dos dados.

III. Depósito de 25ml da amostra do óleo, dentro do volume de controle do experimento, e inicialização:

O volume da amostra mínimo para a realização dos testes era de 7,5ml. Para que a geometria ficasse completamente submersa, utilizou-se 25ml de amostra, cobrindo totalmente a peça, conforme modelo apresentado na Figura 3.4.

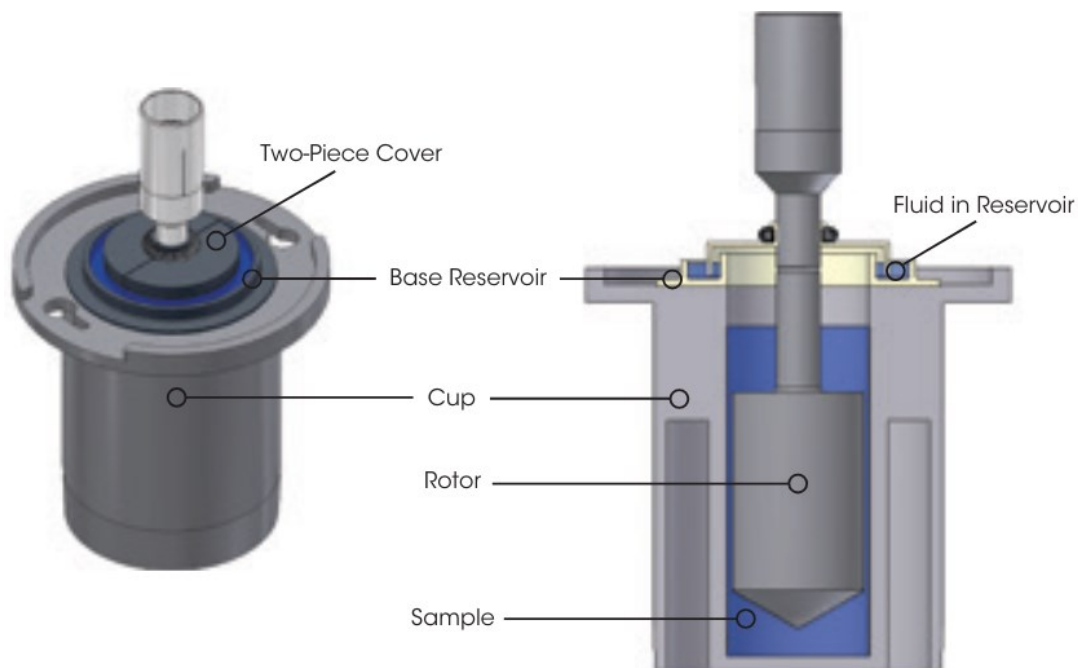


Figura 3.4 Vista do experimento montado e pronto para ser executado.²²

²² <https://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/BROCH-DHR-Accessories.pdf>, Página 23.

Para a realização do experimento, que foi feito na temperatura de 25°C, comparou-se os valores das viscosidades obtidas com o valor informado pela fabricante do óleo padrão (IPT84 OP150), conforme dados apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Dados do Óleo Padrão IPT84 OP150 referente a diferentes temperaturas.

<i>T</i>	<i>Cinemática</i>	<i>Dinâmica</i>	<i>Massa Específica</i>
°C	mm ² /s	mPa.s	g/cm ²
20	542,5	480,7	0,8862
25	381,4	336,8	0,8831
30	274,9	241,9	0,88
37,8	172,4	150,9	0,8751
40	152,5	133,3	0,8738
50	9,93	78,89	0,8676
60	57,83	49,81	0,8614
70	38,83	33,21	0,8551
80	27,3	23,18	0,8489
90	19,96	16,82	0,8427
98,9	15,53	13,00	0,8372
100	15,08	12,62	0,8365

As geometrias que obtiveram os melhores resultados (valores de viscosidade encontrados que mais se assemelham ao valor padrão do óleo) estão apresentadas nos gráficos a seguir:

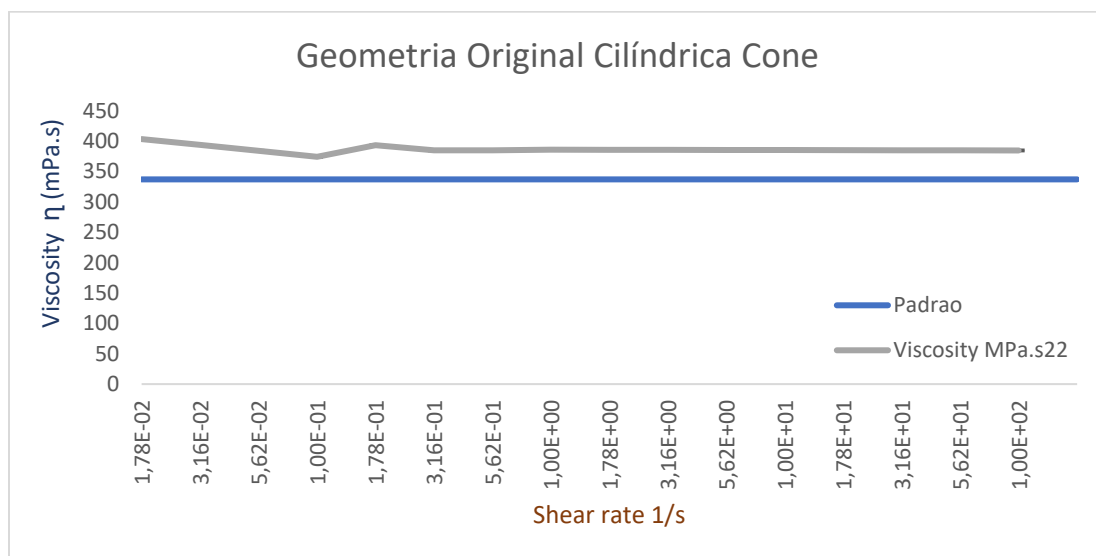


Figura 3.5 Gráfico Viscosidade Geometria Original Cone.

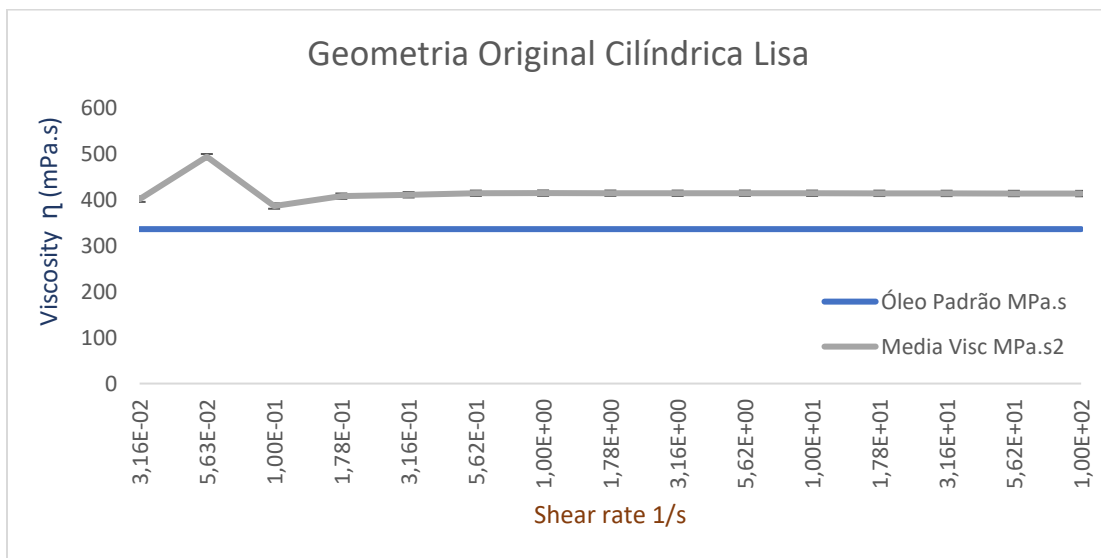


Figura 3.6 Gráfico Viscosidade Geometria Original Lisa.

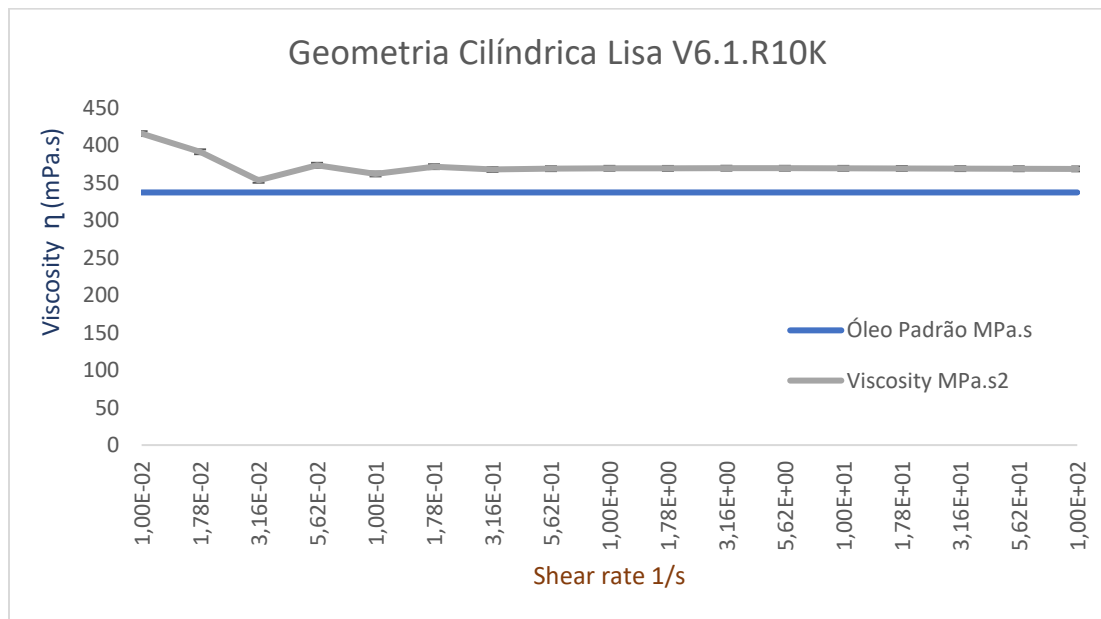


Figura 3.7 Gráfico Viscosidade Geometria Lisa Rigid 10K.

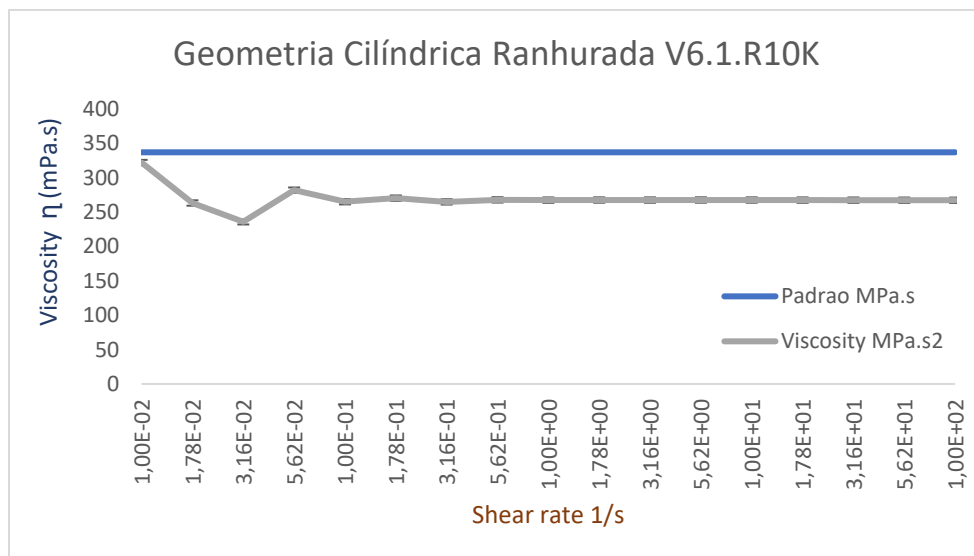


Figura 3.8 Gráfico Viscosidade Geometria Ranhurada Rigid 10K.

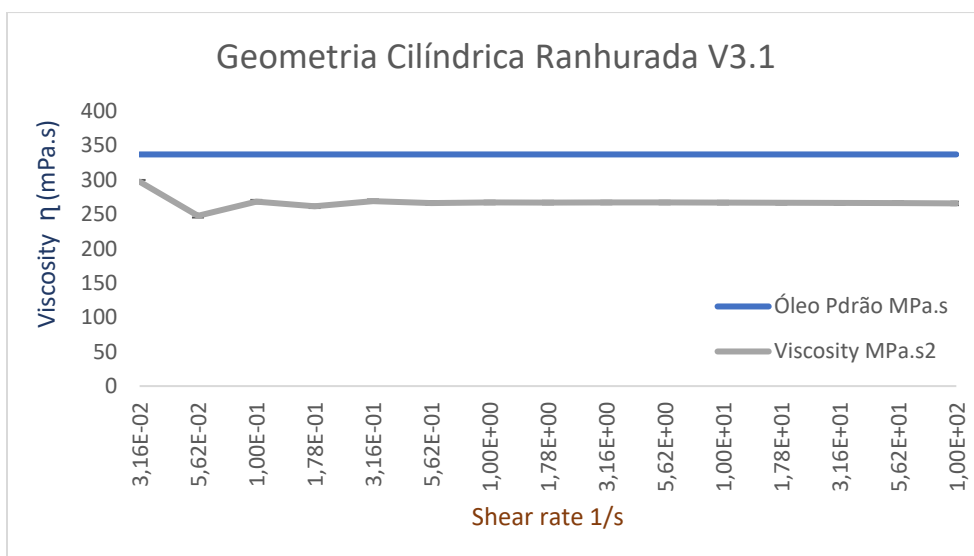


Figura 3.9 Gráfico Viscosidade Geometria Ranhurada V3.1 Clear V4.

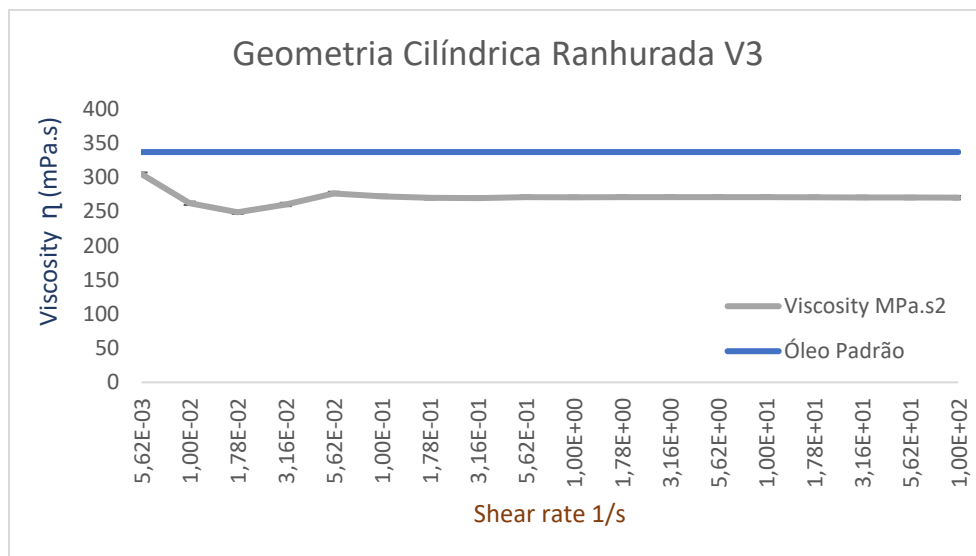


Figura 3.10 Gráfico Viscosidade Geometria Ranhurada V3 Clear V4.

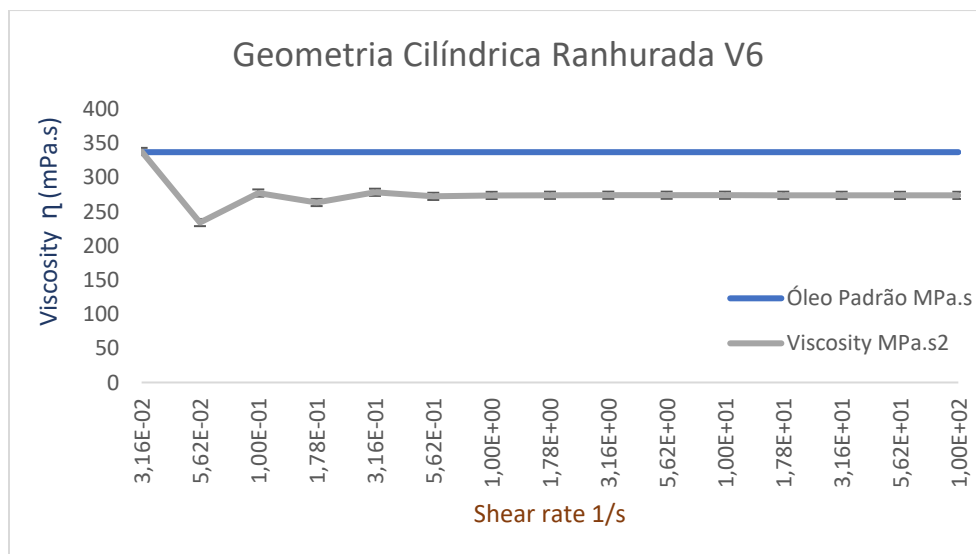


Figura 3.11 Gráfico Viscosidade Geometria Ranhurada V6 Clear V4.

3.1 Cálculo do erro percentual

Para calcular a precisão dos resultados do experimento, calculou-se o Erro Percentual da seguinte forma:

- **Valor Padrão Real (Vp):** Este é o valor do Óleo Padrão à 25°C.
- **Valor Médio Experimental (Vm):** Este é o valor calculado pela Média dos valores dos pontos da viscosidade dos gráficos.

Com isso, temos:

$$\text{Erro Percentual} = \left(\frac{V_m - V_p}{V_p} \right) \times 100$$

De acordo com os dados dos gráficos, as geometrias com os melhores resultados foram a Lisa V4 e a Lisa V6.1.R10K com erros aproximadamente iguais a 10,48% e 9,52%, respectivamente, Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Dados do Erro percentual de cada Geometria.

	Erro %
Original	
Cone	-15,88
Lisa	23,77
Clear V4	
Lisa V4	10,48
Lisa V7	17,23
Ranhurada V3	-20,66
Ranhurada V3.1	-19,69
Ranhurada V6	-18,33
Rigid 10K	
Ranhurada V6.1	-20,08
Lisa V6.1	9,52

Esses dados demonstram o avanço da eficiência na produção da geometria, a qual pode ou não ser justificada pela mudança na resina utilizada, onde a primeira utilizou-se a resina Clear V4 e a segunda a Rigid 10K. No entanto, percebe-se o progresso na evolução dos modelos das geometrias ranhuradas, que usaram a resina Clear V4, visto que, com o aumento do número da versão (V3 → V3.1 → V6), houve uma melhora de 2,33%.

Um fato alarmante é o erro encontrado pelas geometrias originais, Cone e Lisa, as quais apresentaram erros de -15,88% e 23,77%, respectivamente.

4. Conclusão

4.1 Conclusões e avanços no design da modelagem da base do furo

Durante o desenvolvimento inicial, o furo especificado como M4 X 0.7 - 6H na modelagem original não era corretamente reconhecido pelo software PreForm. Para contextualizar, "M4" indica um diâmetro nominal de 4 mm, "0.7" é o passo da rosca (distância entre os filetes), e "6H" refere-se à tolerância da rosca interna, garantindo precisão no encaixe. Diante da incapacidade do PreForm em reconhecer a rosca, a solução foi usiná-la manualmente no torno após a impressão.

Após diversas tentativas, conseguimos que o software reconhecesse a rosca, mas de forma inadequada. O PreForm identificava a rosca como helicoidal, e não passante, resultando em um acúmulo indesejado de resina dentro do furo.

Para economizar resina e melhorar a funcionalidade, desenvolvemos vários modelos de bases. Após várias iterações, alcançamos duas soluções simultâneas. Primeiramente, conseguimos que o furo roscado fosse integralmente reconhecido pelo software da impressora. Em segundo lugar, resolvemos o problema do acúmulo de resina na base durante a impressão, introduzindo inicialmente quatro furos passantes na base para permitir o escoamento do excesso de resina. Posteriormente, adicionamos dois furos passantes conectados ao furo roscado, evitando o acúmulo de resina no próprio furo.

Com essas correções, ajustamos o diâmetro do furo roscado para facilitar o encaixe da geometria no reômetro, já que anteriormente estava muito justo, dificultando o manuseio.

Apesar de solucionar os problemas de encaixe da base, a geometria ainda apresentava oscilações que impediam a aprovação na inspeção visual. Identificamos que a causa estava no método de suportes da geometria. O suporte automático, que não era simétrico, foi substituído por suportes simétricos, corrigindo as oscilações e permitindo a realização dos testes de calibração e, futuramente, dos testes de eficiência da análise de viscosidade.

Ao mudar para a resina Rigid 10K, novos desafios surgiram. Após o processo de lavagem e cura, a resina deixava uma fina camada branca na superfície da geometria, que

parecia soltar um tipo de pó branco. Essa camada reduzia o ajuste da peça, impossibilitando seu encaixe no reômetro, pois as dimensões estavam muito apertadas. Além disso, houve a preocupação de que essa camada pudesse se misturar com o fluido em análise, potencialmente alterando os resultados. Para solucionar esses problemas, lixamos a superfície para remover completamente a camada externa e aumentamos os diâmetros dos furos de entrada do reômetro e do furo roscado.

4.2 Integração com resultados dos testes

Para a realização dos testes, foi utilizado o Óleo Padrão IPT84 QP150. A partir dele, foram feitos testes com duas das geometrias originais (Cilíndrica Recessed End e Cônica) para efeito de comparação com as outras, visto que todas devem atingir um único valor de viscosidade (336,8 Mpa.s). De acordo com os dados dos gráficos, as geometrias com os melhores resultados foram a Lisa V4 e a Lisa V6.1 R10K com erros de aproximadamente 10,52% e 9,52%, respectivamente. Pelo estudo e projeto desenvolvido, pode-se perceber que existe a possibilidade de criação de uma geometria por meio da impressão 3D em resina que possa chegar perto de um erro inferior a 10%.

Possíveis melhorias para elevar o desempenho das peças impressas incluem o aprimoramento do acabamento das regiões superiores das geometrias, que podem causar correntes no fluido ao passar pelos pequenos picos de restos de suporte. Além disso, a calibração dos reômetros utilizados é crucial, assim como a confiabilidade do valor de viscosidade do óleo padrão em 25°C. As geometrias originais apresentaram resultados elevados, sugerindo possível descalibração ou dano devido ao uso prolongado. Outro ponto de melhoria é o processo de lavagem e cura dos materiais impressos, que pode beneficiar-se de novas técnicas ou modificações no padrão atual.

Após várias tentativas e melhorias, verificou-se que é possível desenvolver geometrias impressas em 3D que atendam aos requisitos com erros mínimos. A inclusão de suportes simétricos na impressão ajudou a corrigir oscilações, permitindo a viabilidade dos testes de calibração e eficiência de análise de viscosidade. No caso da resina Rigid 10K, o problema da camada branca foi mitigado com lixamento e ajustes nos furos de encaixe.

4.3 Análise comparativa de resultados e de custo

Com base nas soluções desenvolvidas e testadas, o projeto demonstra que é possível atingir alta precisão e funcionalidade em geometrias impressas em 3D para reômetros. A figura a seguir ilustra as melhorias implementadas, enquanto a tabela resume os resultados dos testes comparativos.

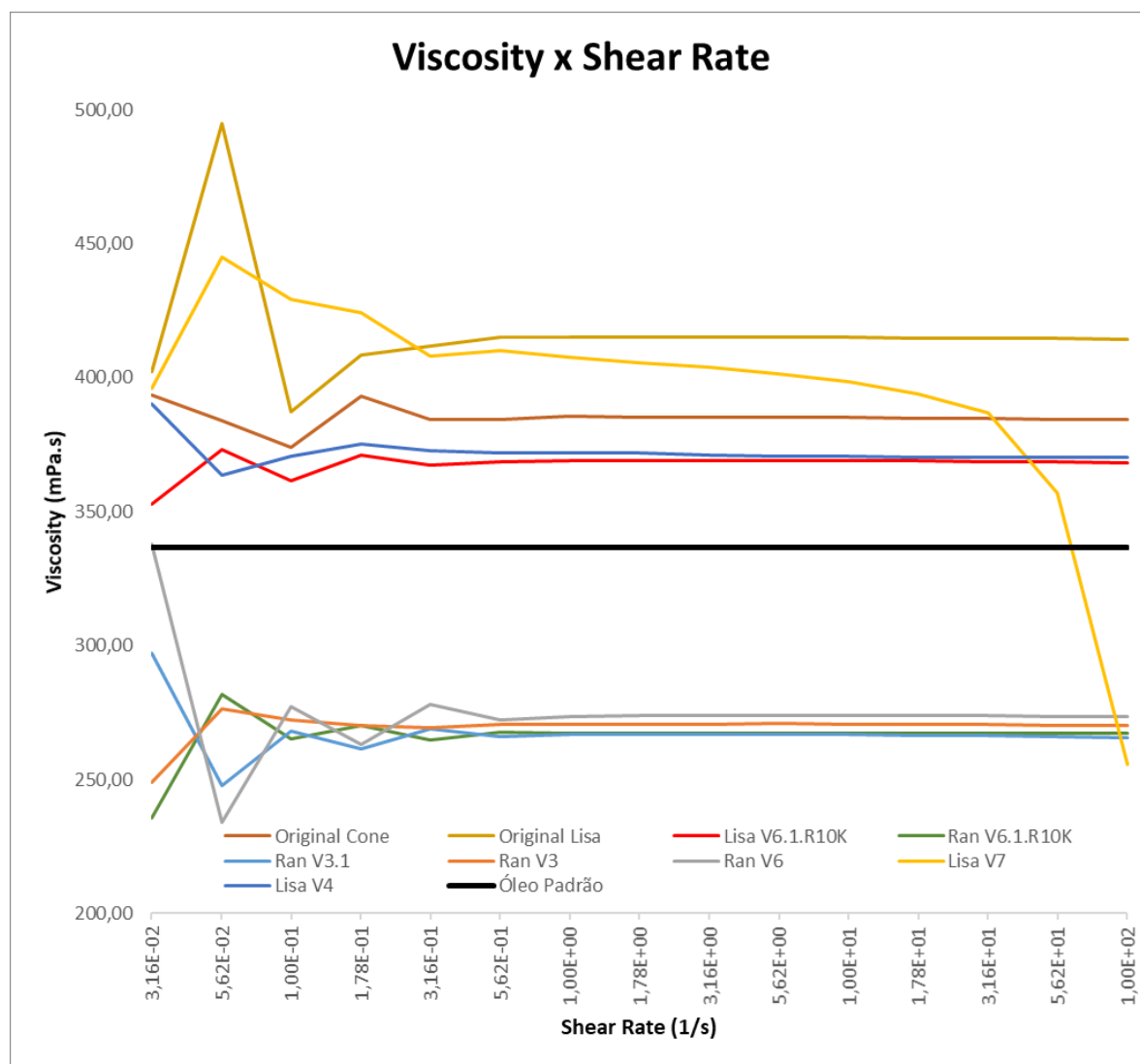


Figura 3.12 Gráfico de resultados compilados da viscosidade.

As melhorias sugeridas e implementadas mostram que o projeto traz benefícios significativos, incluindo precisão aprimorada e redução de custos, conforme detalhado na tabela anexa.

Tabela 3.3 Tabela comparativa de preço da geometria original com a de melhor resultado (na resina Rigid 10K).

Preço	Cilindrica Lisa
Geometria Original	R\$ 67.080,00
Impressora Form3B	R\$ 30.186,00
FormWash	R\$ 4.018,09
FormCure	R\$ 5.031,00
Resina Rigid 10K 1L	R\$ 2.782,22
Resina Clear V4 1L	R\$ 1.155,27
Volume Total da Geometria	35ml
Geometria Impressão 3D	R\$46,21 - R\$111,29

4.3.1 Custos da geometria original

A geometria original tem um custo bastante elevado, em torno de R\$ 67.080,00, refletindo o valor de aquisição e importação. Este custo alto pode ser uma barreira significativa para laboratórios e indústrias que precisam de múltiplas unidades ou substituições frequentes das geometrias.

4.3.2 Custos da impressão 3D

Ao optar pela impressão 3D com a Form3B e seus acessórios, os custos iniciais de equipamento (impressora, em torno de R\$ 30.000,00) são significativos, mas a longo prazo, podem representar uma economia substancial.

4.3.3 Custos da geometria impressa

Considerando que o volume total da geometria é de 35 ml, o custo por geometria impressa varia de acordo com a resina utilizada:

- **Custo com Resina Rigid 10K:** A resina Rigid 10K é mais cara, mas oferece alta rigidez e durabilidade. Com um custo de R\$ 2.782,22 por litro, e considerando o

volume de 35 ml, o custo por geometria é aproximadamente entre R\$ 97,38 e R\$ 111,29, dependendo de desperdícios e ajustes específicos no processo de impressão.

- **Custo com Resina Clear V4:** A resina Clear V4 é mais barata, com um custo de R\$ 1.155,27 por litro. Para o volume de 35 ml, o custo por geometria é aproximadamente entre R\$ 46,21 e R\$ 50,44, também dependendo de desperdícios e ajustes.

4.3.4 Comparação geral

Ao comparar os custos, a impressão 3D apresenta uma economia significativa em relação à geometria original. Mesmo considerando o custo inicial dos equipamentos (Impressora Form3B, FormWash e FormCure), a longo prazo, a impressão 3D é muito mais econômica, especialmente para produções em escala ou substituições frequentes.

A impressão 3D não só oferece flexibilidade no design e personalização das geometrias, mas também proporciona uma economia substancial em custos, tornando-se uma alternativa viável e econômica em comparação com a fabricação tradicional de geometrias para reômetros. Além disso, os investimentos iniciais em equipamentos são rapidamente amortizados pelo baixo custo por unidade impressa, incentivando a adoção desta tecnologia.

5. Referências Bibliográficas

- [1] <https://www.tainstruments.com/pdf/brochure/BROCH-DHR-Accessories.pdf>
- [2] https://naccache.mec.puc-rio.br/Cursos/FNNIP_files/rotacional.pdf
- [3] Denise S. S. Nunes¹, Elisabeth E. C. Monteiro^{1*}, Regina C. Nunes¹, Diego N. Jacob¹, Raphael C. Pinto¹ Luiz C. F. Barbosa² e Priscila Moczydlower²; **AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS DE FLUIDOS AQUOSOS OBTIDOS COM SISTEMAS À BASE DE LIGNOSSULFONATO DE SÓDIO**; outubro 2009; Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2009/PDF/669.pdf>
- [4] <https://www.braseq.com.br/reometro-cone-placa>
- [5] <https://formlabs.com/store/materials/white-resin/>
- [6] <https://formlabs.com/store/materials/rigid-10k-resin/>
- [7] <https://formlabs.com/store/materials/flexible-80a-resin/>
- [8] <https://formlabs.com/store/materials/dental-lt-comfort-resin/>
- [9] <https://formlabs.com/store/materials/biomed-clear-resin/>
- [10] <https://3dlab.com.br/produto/resina-3d-calcinavel/>
- [11] <https://formlabs.com/store/materials/high-temp-resin/>
- [12] <https://formlabs.com/store/form-3-resin-tank/>
- [13] https://support.formlabs.com/s/article/Leveling-Formlabs-SLA-printers?language=en_US
- [14] <https://fesmo.com.br/produto/form-cure-formlabs/>
- [15] <https://fesmo.com.br/artigos/formlabs-form-wash-automatiza-a-limpeza-de-impressao-para-resultados-consistentes/>
- [16] <https://cgferramentas.com.br/produtos/microretificadremel3000/>
- [17] <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001479-TDS-ENUS-0.pdf>
- [18] <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/1801089-TDS-ENUS-0.pdf>
- [19] <https://s3.amazonaws.com/servicecloudassets.formlabs.com/media/Finishing/Washing/115001347744-Form+Wash+Time+Settings/FormWashSettings.pdf>
- [20] <https://s3.amazonaws.com/servicecloudassets.formlabs.com/media/Finishing/Post-Curing/115001414464-Form%20Cure%20Time%20and%20Temperature%20Settings/FormCurePost-CureSettings.pdf>
- [21] https://naccache.mec.puc-rio.br/Cursos/FNNIP_files/rotacional.pdf
- [22] <https://s3.amazonaws.com/servicecloudassets.formlabs.com/media/Finishing/Post-Curing/115001414464-Form%20Cure%20Time%20and%20Temperature%20Settings/FormCurePost-CureSettings.pdf>
- [23] <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/1801089-TDS-ENUS-0P.pdf>
- [24] https://support.formlabs.com/s/topic/0TO1Y000000IxnqWAK/form-3b?language=en_US
- [25] <https://www.crystalowens.com/research/3d-printed-rheometry-tooling>
- [26] <https://pucriobr.sharepoint.com/sites/Impressora3D/Documentos%20Compartilhados/General/Literatura/beginners-guide-to-3d-printing.pdf?CT=1701959321571&OR=ItemsView>

- [27] [https://pucriobr.sharepoint.com/sites/Impressora3D/Documentos%20Compartilhados/General/Literatura/Richard%20Horne%20-%203D%20Printing%20For%20Dummies%20\(For%20Dummies%20\(Computer_Tech\)\)-For%20Dummies%20\(2023\).pdf?CT=1701959330829&OR=ItemsView](https://pucriobr.sharepoint.com/sites/Impressora3D/Documentos%20Compartilhados/General/Literatura/Richard%20Horne%20-%203D%20Printing%20For%20Dummies%20(For%20Dummies%20(Computer_Tech))-For%20Dummies%20(2023).pdf?CT=1701959330829&OR=ItemsView)
- [28] <https://pucriobr.sharepoint.com/sites/Impressora3D/Documentos%20Compartilhados/General/Literatura/Owens-hart-mckinley-19/Owens-hart-mckinley-19.pdf?CT=1701959336971&OR=ItemsView>
- [29] <https://pucriobr.sharepoint.com/sites/Impressora3D/Documentos%20Compartilhados/General/Literatura/Maldonado-Rosas%20et%20al-22.pdf?CT=1701959326657&OR=ItemsView>
- [30] <https://fesmo.com.br/artigos/estereolitografia-em-impressora-3d-de-resina-formlabs/#:~:text=O%20termo%20estereolitografia%20foi%20cunhado,material%20cur%C3%A1vel%20por%20luz%20ultravioleta.>