

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA

Faculdade de Tecnologia de Mauá

Curso Superior de Tecnologia em Polímeros

Bruno Soares Nascimento

Érick Azevedo Rocha

Gustavo Galves Gomes

**Comparação de parâmetros de injeção de PA66 com percentuais progressivos
de fibra de vidro (0%, 15%, 30% e 50%) via Moldflow.**

Mauá

2026

Bruno Soares Nascimento

Érick Azevedo Rocha

Gustavo Galves Gomes

Comparação de parâmetros de injeção de PA66 com percentuais progressivos de fibra de vidro (0%, 15%, 30% e 50%) via Moldflow: estudo de caso aplicado a um conector do sistema de arrefecimento veicular

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de Mauá, como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Polímeros, sob a orientação do professor Esp. Afonso Henriques Neto

Mauá

2026

Autorizo a reprodução e a divulgação deste trabalho, no todo ou em parte, por qualquer meio convencional ou eletrônico, exclusivamente para fins de estudo e pesquisa, desde que a fonte seja citada.

Catálogo-na-Publicação – Biblioteca Fatec Mauá

668.412

N244c Nascimento, Bruno Soares.

Comparação de parâmetros de injeção de PA66 com percentuais progressivos de fibra de vidro (0%, 15%, 30% e 50%) via Moldflow : estudo de caso aplicado a um conector do sistema de arrefecimento veicular / Bruno Soares Nascimento ; Érick Azevedo Rocha ; Gustavo Galves Gomes. – 2026. – 58 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Esp. Afonso Henriques Neto.

Trabalho de conclusão de curso (Curso Superior de Tecnologia em Polímeros) – Faculdade de Tecnologia de Mauá.

Inclui referências.

1. Poliamida 6.6. 2. Fibra de vidro. 3. Parâmetros de injeção. 4. Simulação computacional. 5. Moldflow Insight (ferramenta). I. Rocha, Érick Azevedo. II. Gomes, Gustavo Galves. III. Henriques Neto, Afonso. IV. Título.

CDD 23. : Plásticos: moldagem 668.412
Elaborada por Tatiana Sambinelli CRB-8 SP-011003/O

Bruno Soares Nascimento

Érick Azevedo Rocha

Gustavo Galves Gomes

Comparação de parâmetros de injeção de PA66 com percentuais progressivos de fibra de vidro (0%, 15%, 30% e 50%) via Moldflow.

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de Mauá, como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Polímeros.

Aprovação em: ____/____/____

Banca examinadora ou pareceristas:

Prof. Esp. Afonso Henriques Neto

Orientador

FATEC Mauá

Prof.(a) Esp. Antonio Jose de Moura Junior

Avaliador

FATEC Mauá

Prof.(a) Dr. Carlos Fernandes da Silva

Avaliador

FATEC Mauá

“Aos nossos familiares e amigos, pelo incentivo, compreensão e apoio durante toda a graduação, e aos profissionais que fizeram parte da nossa trajetória, contribuindo para nosso crescimento pessoal e técnico.”

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Fatec pelo suporte acadêmico e pela estrutura oferecida ao longo da graduação, fundamentais para a realização deste trabalho. Ao professor Esp. Afonso Henriques Neto, orientador deste estudo, pelo acompanhamento, orientações e contribuições ao longo de todas as etapas da pesquisa. Agradecem também aos profissionais que, em diferentes contextos da indústria, compartilharam experiências práticas, conhecimentos técnicos e informações relevantes, enriquecendo o desenvolvimento deste trabalho e contribuindo para a conexão entre teoria e prática.

“Na prática, a teoria é outra.”

Expressão popular

RESUMO

O processo de moldagem por injeção de plásticos de engenharia exige ajustes precisos de processamento, cuja complexidade se eleva com a incorporação de cargas minerais estruturais. Esta pesquisa apresenta um estudo comparativo sistemático, por meio de simulação computacional, sobre o impacto das propriedades térmicas, mecânicas e reológicas da resina poliamida 6.6 (PA66) reforçada com percentuais progressivos de fibra de vidro curta (0%, 15%, 30% e 50% em massa) no processamento por injeção de um conector em L automotivo. A metodologia baseou-se exclusivamente em modelagem numérica bidirecional (Fill e Pack) utilizando o software *Moldflow Insight 2023*, avaliando os cenários de vazão definida automaticamente pelo sistema e de vazão controlada em 30 cm³/s, sob uma malha tridimensional refinada com cerca de 1,2 milhão de elementos tetraédricos. Os resultados indicaram que o padrão geométrico de preenchimento da cavidade permaneceu estável em todas as composições devido à espessura nominal elevada da peça (5,3 mm a 7,2 mm). Contudo, o incremento do teor de fibra gerou um aumento severo na viscosidade do compósito, resultando em elevações de até 60% na pressão máxima de injeção e acréscimos na força de fechamento necessária. Em contrapartida, a presença do reforço mineral reduziu o tempo de congelamento em até 30%, acelerando a solidificação e diminuindo o tempo total de ciclo, enquanto o peso final do produto aumentou cerca de 33% em função da densidade volumétrica. Sob vazão controlada, a taxa de cisalhamento na região do *gate* manteve-se em patamares estáveis e seguros, entre 59k 1/s e 64k 1/s, mitigando riscos de degradação térmica por atrito. Conclui-se que o mapeamento numérico valida as tendências de comportamento do material, fornecendo um guia preditivo eficiente para a otimização de parâmetros industriais e redução de custos de tentativa e erro no setor de autopeças.

Palavras-chave: poliamida 6.6; fibra de vidro; parâmetros de injeção; simulação computacional; moldflow insight.

ABSTRACT

The injection molding process of engineering plastics requires precise processing adjustments, whose complexity rises with the incorporation of structural mineral fillers. This research presents a systematic comparative study, using computer simulation, on the impact of the thermal, mechanical, and rheological properties of polyamide 6.6 (PA66) resin reinforced with progressive percentages of short glass fiber (0%, 15%, 30%, and 50% by weight) in the injection molding of an automotive L-connector. The methodology was exclusively based on bidirectional numerical modeling (Fill and Pack) using *Moldflow Insight 2023* software, evaluating scenarios with flow rate defined automatically by the system and with a controlled flow rate at 30 cm³/s, under a refined three-dimensional mesh with approximately 1.2 million tetrahedral elements. The results indicated that the geometric pattern of cavity filling remained stable across all compositions due to the part's high nominal thickness (5.3 mm to 7.2 mm). However, the increase in fiber content generated a severe rise in the composite's viscosity, resulting in elevations up to 60% in the maximum injection pressure and increases in the required clamp force. On the other hand, the presence of mineral reinforcement reduced the volumetric freezing time by up to 30%, accelerating solidification and decreasing the total cycle time, while the final weight of the product increased by about 33% due to volumetric density. Under controlled flow rate, the shear rate in the gate region remained within stable and safe levels, between 59k 1/s and 64k 1/s, mitigating risks of thermal degradation due to friction. It is concluded that the numerical mapping validates the material's behavior tendencies, providing an efficient predictive guide for the optimization of industrial parameters and reduction of trial-and-error costs in the automotive parts sector.

Keywords: polyamide 6.6; glass fiber; injection parameters; computer simulation; moldflow insight.

LISTA DE SIGLAS

AACR2 – *Anglo-American Cataloguing Rules, Second Edition* (Regras de Catalogação Anglo-Americanas, Segunda Edição).

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

CAD – *Computer-Aided Design* (Desenho Auxiliado por Computador).

CDD – Classificação Decimal de Dewey.

CDU – Classificação Decimal Universal.

CFB – Conselho Federal de Biblioteconomia.

CFD – *Computational Fluid Dynamics* (Dinâmica dos Fluidos Computacionais).

CIP – Catalogação-na-Publicação.

DFM – *Design for Manufacturing* (Design voltado para Manufatura).

DMTA – *Dynamic Mechanical Thermal Analysis* (Análise Térmico-Mecânica Dinâmica).

DSC – *Differential Scanning Calorimetry* (Calorimetria Exploratória Diferencial).

FATEC – Faculdade de Tecnologia.

GF – *Glass Fiber* (Fibra de Vidro).

HDT – *Heat Deflection Temperature* (Temperatura de Deflexão sob Carga).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

ISDB – *International Standard Bibliographic Description* (Descrição Bibliográfica Internacional Normalizada).

L/D – Relação Comprimento/Diâmetro (*Length/Diameter*).

MEF – Método dos Elementos Finitos.

MFI – *Melt Flow Index* (Índice de Fluidez).

Mw – Peso Molecular Médio (*Weight Average Molecular Weight*).

NBR – Norma Brasileira.

PA6 – Poliamida 6.

PA66 ou **PA 6.6** – Poliamida 66 / Poliamida 6.6.

PA610 – Poliamida 610.

PA11 – Poliamida 11.

PA12 – Poliamida 12.

RDA – *Resource Description and Access* (Recurso, Descrição e Acesso).

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso.

UR – Umidade Relativa.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Problema de pesquisa	12
1.2	Objetivos	12
1.3	Justificativa	12
1.4	Delimitação	13
1.5	Estruturação	13
2	DESENVOLVIMENTO	15
2.1	Referencial teórico	15
2.1.1	Estrutura Química e Propriedades das Poliamidas com Ênfase na Poliamida 66	15
2.1.2	Poliamida 66 Reforçada com Fibra de Vidro (PA66-GF)	17
2.1.3	Desafios Reológicos e Microestruturais no Processamento por Injeção	18
2.1.4	Aplicações Industriais	18
2.1.5	Perspectivas Tecnológicas	19
2.1.6	Simulação do Processamento por Injeção	19
3.1.1	Procedimentos metodológicos	20
3.1.2	Materiais	20
3.1.3	Geometria da Peça	21
3.1.4	Procedimentos de Simulação	21
4.1.1	Análise de resultados – Vazão definida pelo MoldFlow	22
4.1.2	Preenchimento	22
4.1.3	Pressão de injeção	23
4.1.4	Força de fechamento	24
4.1.5	Tempo de congelamento	24
4.1.6	Peso do produto	25
4.2.1	Análise de resultados – Vazão controlada	26
4.2.2	Preenchimento	26

4.2.3 Pressão de injeção	27
4.2.4 Força de fechamento	28
4.2.5 Tempo de congelamento	28
4.2.6 Peso do produto	29
4.2.7 Taxa de cisalhamento na região do gate	30
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
REFERÊNCIAS	33
GLOSSÁRIO	34
APÊNDICE	36
ANEXO	55

1 INTRODUÇÃO

A poliamida 66 (PA66) é um dos plásticos de engenharia mais utilizados globalmente, presente em peças automotivas, componentes elétricos, engrenagens e até implantes médicos (BASF, 2023; Huang et al., 2018). Sua popularidade deriva da combinação de resistência mecânica, estabilidade térmica e bom custo-benefício, especialmente quando reforçada com fibra de vidro (GF) em teores de 15%, 30% e até 50% (Nowinka, 2020; Geba, 2024). Esses compósitos permitem substituir metais em aplicações estruturais, reduzindo peso em até 40% e custos de produção em 15–25% (Vem Tooling, 2025).

No entanto, o processo de moldagem por injeção exige ajustes precisos de temperatura, pressão e velocidade conforme o teor de fibra (Atlantis Press, 2021). Um parâmetro mal definido pode gerar deformação (warping), retração excessiva, quebra de fibras ou desgaste prematuro do molde (Silva, 2024; Van der Meer, 2022). Com a indústria buscando peças mais leves, rígidas e sustentáveis, compreender como cada porcentagem de GF afeta o comportamento do material durante a injeção tornou-se essencial (Meraghni et al., 2021).

1.1 Problema de pesquisa

Qual é o impacto das propriedades térmicas, mecânicas e reológicas da resina poliamida 6.6 reforçada em percentuais progressivos de Fibra de Vidro no processamento por injeção e na aplicação industrial de componentes como conectores automotivos?

1.2 Objetivos

Esta revisão sistemática tem como objetivo comparar os parâmetros de injeção (temperaturas de fusão e do molde, pressão, velocidade e recalque) da PA66 não aditivada (0% GF) com as versões reforçadas em 15%, 30% e 50% de fibra de vidro, identificando as melhores práticas para cada composição e os impactos nas propriedades finais da peça.

1.3 Justificativa

Apesar da ampla literatura sobre PA66-GF, poucos estudos reúnem dados comparativos diretos entre todos os teores de reforço em um único protocolo experimental ou de simulação. A maioria foca em um único percentual ou em

propriedades mecânicas finais, deixando lacunas sobre como otimizar o processo de injeção para evitar defeitos e maximizar desempenho (Satha, 2021).

Este trabalho preenche essa lacuna ao:

1. Mapear tendências claras de ajuste de parâmetros com o aumento do teor de GF;
2. Reduzir custos industriais com menos testes de tentativa e erro.

1.4 Delimitação

O presente trabalho delimita-se ao estudo da resina poliamida 6.6 (PA 6.6), pura e reforçada com fibras de vidro em teores de 0%, 15%, 30% e 50% em massa, com ênfase na análise do impacto de suas propriedades térmicas, mecânicas e reológicas no processamento por injeção. A investigação restringe-se à simulação computacional do fluxo de preenchimento, recalque e resfriamento de conectores automotivos, utilizando exclusivamente o software Moldflow Insight, com base em modelos numéricos de elementos finitos (MEF) e dinâmica dos fluidos computacionais (CFD).

Não foram realizados ensaios experimentais físicos, tais como tração, impacto, fadiga, resistência à corrosão, análise de ciclo de vida ou validação em linha de produção. O escopo abrange apenas a previsão de defeitos (linhas de solda, bolhas de ar e tensões residuais) e a otimização de parâmetros de injeção (temperatura, pressão, velocidade e tempo de ciclo), sem considerar variáveis externas como desgaste de molde, variação de umidade ambiental ou diferenças entre fornecedores. A análise térmica limita-se à temperatura de deflexão sob carga (HDT) e à cristalinidade simulada, sem ensaios de DSC ou DMTA.”

1.5 Estruturação

Este trabalho de conclusão de curso está estruturado em cinco capítulos, organizados de forma lógica e progressiva, conforme descrito a seguir:

Capítulo 1 – Introdução - apresenta o contexto industrial, a relevância do tema, o problema de pesquisa, o objetivo geral e específicos, a justificativa e a delimitação do estudo.

Capítulo 2 – Referencial Teórico - fundamenta o trabalho com revisão bibliográfica sobre poliamida 6.6, reforço com fibras de vidro, processamento por injeção e simulação computacional, com suporte em literatura técnica e científica.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos - detalha os materiais utilizados, os procedimentos experimentais, os equipamentos empregados e os métodos estatísticos de análise comparativa.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões - expõe os dados obtidos em ensaios e simulações, com análise crítica dos resultados, comparação entre os materiais estudados e discussão à luz do referencial teórico.

Capítulo 5 – Conclusão e Recomendações - sintetiza os principais achados, responde ao problema de pesquisa, destaca contribuições práticas e acadêmicas, e sugere melhorias para trabalhos futuros.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Referencial teórico

2.1.1 Estrutura Química e Propriedades das Poliamidas com Ênfase na Poliamida 66

As poliamidas configuram uma classe de polímeros termoplásticos de elevado desempenho técnico, caracterizada pela presença recorrente da ligação amida ($-\text{CO}-\text{NH}-$) na cadeia principal. Tal grupo funcional confere polaridade molecular e propicia a formação de pontes de hidrogênio intercatenárias, responsáveis pela coesão supramolecular que sustenta suas notáveis propriedades mecânicas e térmicas (Murase et al., 2002; Bassani et al., 2002; Huang et al., 2008).

Essa família abrange tanto macromoléculas de origem biológica — como proteínas e fibras proteicas — quanto sintéticas, com destaque para os nylons (PA6, PA66, PA610, PA11, PA12), amplamente empregados em aplicações estruturais e têxteis. A resistência mecânica decorre da interação intermolecular entre o oxigênio da carbonila de uma cadeia e o hidrogênio amídico de outra, gerando uma rede tridimensional de ligações secundárias (Canevarolo, 2006).

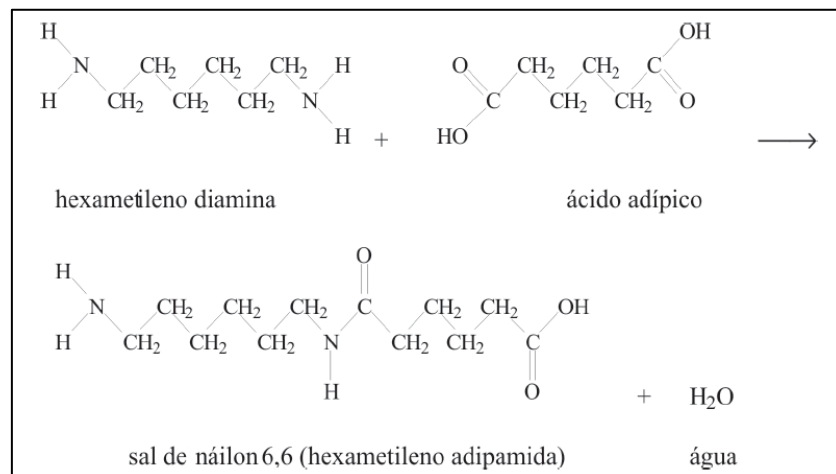
Contudo, essa mesma interação intermolecular facilita a difusão de moléculas de água, que se intercalam entre as cadeias poliméricas, rompendo pontes de hidrogênio preexistentes e estabelecendo novas com o polímero. Esse fenômeno confere às poliamidas caráter higroscópico, com taxas de absorção de umidade variáveis conforme a densidade de grupos amida por unidade de CH_2 . Poliamidas com maior frequência de amida (ex.: PA66) exibem menor equilíbrio de umidade que aquelas com menor densidade (ex.: PA12).

A modulação da densidade de grupos amida impacta diretamente propriedades termomecânicas críticas:

- Temperatura de fusão (T_m): eleva-se com o incremento da densidade de pontes de hidrogênio;
- Módulo elástico: aumenta em função da rigidez da rede supramolecular;
- Resistência ao impacto a baixas temperaturas: melhora com a redução da absorção de umidade;
- Estabilidade química: maior resistência a ácidos e sais em poliamidas de menor higroscopicidade.

A poliamida 66 (PA66) é sintetizada por policondensação estequiométrica entre ácido adípico ($\text{HOOC}-(\text{CH}_2)_4-\text{COOH}$) e hexametilenodiamina ($\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}_2$), resultando em uma unidade repetitiva com duas ligações amida por 12 átomos de carbono. A reação elimina água e forma cadeias lineares de alto peso molecular, dispensando catalisadores externos — o próprio ácido adípico atua como catalisador (Kohan et al., 1995). Esse processo ocorre em etapas: inicialmente, forma-se o sal de náilon (hexametilenodiamônio adipato) em solução aquosa, seguido de aquecimento sob pressão para eliminar água e promover a formação de ligações amida, resultando em cadeias poliméricas lineares longas.

Figura 1: Reação de condensação para a formação do sal de nylon e água como subproduto.



Fonte: Materiais Júnior

Diferentemente da poliamida 6 (PA 6), obtida pela polimerização de abertura de anel da caprolactama, a PA 6.6 oferece maior simetria molecular, o que contribui para uma cristalinidade mais elevada, tipicamente entre 40% e 50%, e uma temperatura de fusão em torno de 260-265°C (CALLISTER, 2012; CANEVAROLO, 2006).

Em comparação com a PA6 (obtida por polimerização por abertura de anel da ϵ -caprolactama), a PA66 apresenta superioridade em:

- Resistência à tração e flexão;
- Elasticidade e ductilidade;
- Menor absorção de umidade ($\approx 2,5\%$ vs. $3,0\%$ em equilíbrio a 23°C/50% UR);
- Uniformidade microestrutural;

- Menor propensão à migração de pigmentos em aplicações biomédicas (evitando efeito “tatuagem”);
- Maior susceptibilidade à biodegradação in vivo, devido à presença de dois grupos amida por unidade, facilitando hidrólise enzimática.

Entre suas propriedades mecânicas, a PA 6.6 exibe alta resistência à tração (cerca de 70-90 MPa em condições secas), módulo de elasticidade na faixa de 2.500-3.500 MPa e excelente tenacidade, permitindo deformações significativas antes da ruptura. Sua resistência ao impacto é moderada, mas pode ser aprimorada com aditivos. Termicamente, destaca-se pela temperatura de deflexão sob carga (HDT) de aproximadamente 80-100°C sem reforço, e boa estabilidade dimensional em faixas de temperatura de -40°C a 150°C (DOMININGHAUS, 1993). No entanto, é higroscópica, absorvendo até 8-9% de umidade, o que pode reduzir sua rigidez em até 50% em ambientes úmidos, embora melhore a ductilidade (KOHAN, 1995). Comparada à PA 6, a PA 6.6 apresenta menor absorção de água (cerca de 1,2% vs. 1,8% em saturação), maior resistência à fadiga e melhor desempenho em aplicações de fricção, devido ao baixo coeficiente de atrito (0,2-0,4) (MARGOLIS, 1985; CALLISTER, 2012).

2.1.2 Poliamida 66 Reforçada com Fibra de Vidro (PA66-GF)

O desenvolvimento da PA66 remonta a 1927, quando a E.I. du Pont de Nemours instituiu um programa de pesquisa em química orgânica aplicada. Sob a direção de Wallace Hume Carothers (1928–1937), os esforços convergiram para a policondensação e a obtenção de fibras sintéticas, culminando na síntese da PA66 em 1935 e sua comercialização como Nylon 66 em 1939 (Johnson, 2002).

A síntese industrial ocorre em reatores autoclave sob condições controladas de pressão e temperatura ($\approx 270^{\circ}\text{C}$), com remoção contínua de água para deslocar o equilíbrio reacional. O polímero fundido é extrudado, resfriado e granulado para posterior transformação por injeção, extrusão ou fiação.

Como termoplástico de engenharia, a PA66 é frequentemente reforçada com fibras para atender exigências estruturais. A fibra de vidro (GF) constitui o reforço mais consolidado, embora fibras de aramida, carbono ou aço inoxidável sejam empregadas em nichos especializados.

O reforço da poliamida 6.6 com fibras de vidro (PA 6.6 GF) eleva suas propriedades a níveis de materiais de alto desempenho, permitindo aplicações em

cenários de alta solicitação mecânica e térmica. Tipicamente, incorporam-se 15-50% de fibras de vidro curtas (comprimento de 0,2-0,5 mm) ou longas (acima de 10 mm), tratadas com silanos para melhorar a adesão interfacial com a matriz polimérica. Esse tratamento químico promove ligações covalentes, reduzindo falhas por delaminação e aumentando a transferência de tensões. Como resultado, o módulo de elasticidade pode alcançar 8.000-12.000 Mpa (CALLISTER, 2012), a resistência à tração 150-250 MPa e a HDT superior a 250°C, representando ganhos de até 300% em rigidez comparado à PA 6.6 pura.

2.1.3 Desafios Reológicos e Microestruturais no Processamento por Injeção

Durante a moldagem por injeção, as fibras são submetidas a cisalhamento intenso, resultando em fragmentação significativa:

- Comprimento inicial (CHOPPED STRAND): 3–6 mm
- Comprimento pós-processamento: 0,2–0,4 mm (GF curta)
- Redução do fator de aspecto (L/D): de 300:1 para 20–40:1

Essa degradação compromete a eficiência do reforço, especialmente em teores elevados ($\geq 40\%$ GF), onde a viscosidade do fundido aumenta exponencialmente (De et al., 1996; Orefice et al., 2001).

2.1.4 Aplicações Industriais

Aplicações industriais abrangem o setor automotivo (coletores de admissão, polias e suportes de motor, reduzindo peso veicular em 30-40%), aeroespacial (componentes leves resistentes a vibrações), elétrico (caixas de disjuntores e conectores) e naval (peças resistentes à corrosão). Estudos indicam que o reforço com fibras longas melhora a processabilidade em injeção, reduzindo empenamento e melhorando o acabamento superficial. Comparativamente à PA 6 reforçada, a PA 6.6 GF oferece maior resistência térmica e mecânica, embora exija cuidados no processamento para evitar degradação das fibras. Avanços recentes incluem hibridizações com fibras de carbono para propriedades ainda superiores, alinhando-se a tendências de sustentabilidade por meio de reciclagem mecânica, onde até 80% do material pode ser reutilizado sem perda significativa de desempenho.

2.1.5 Perspectivas Tecnológicas

Avanços recentes incluem:

- Fibras de vidro de alta integridade com silanos otimizados;
- Compósitos híbridos (GF + nanotubos de carbono ou grafeno);
- Modelagem reológica acoplada (Moldflow® + Digimat®);
- Reciclagem química via depolimerização para recuperação de monômeros.

2.1.6 Simulação do Processamento por Injeção

A simulação computacional do processamento por injeção de polímeros como a PA 6.6 é uma ferramenta indispensável na engenharia de manufatura, permitindo otimizar parâmetros e prever defeitos antes da produção física (CALLISTER, 2012; TADMOR; GOGOS, 2006). Baseada em modelos numéricos como o método dos elementos finitos (MEF) e dinâmica dos fluidos computacionais (CFD), softwares como Moldflow, Ansys ou SolidWorks Plastics simulam o fluxo do polímero fundido, considerando equações de conservação de massa, momento e energia (KENNEDY, 2008; ZHENG et al., 2011). Para a PA 6.6, variáveis chave incluem viscosidade não-newtoniana (decrecendo com taxa de cisalhamento de 10^3 a 10^5 s⁻¹), temperatura de injeção (280–300°C), pressão (50–150 MPa) e tempo de ciclo (20–60 segundos), influenciando o preenchimento da cavidade, recalque e resfriamento (AUTODESK, 2015; KOHAN, 1995).

O processo simula fases como injeção (preenchimento de 90–95% da cavidade), recalque (compensação de contração volumétrica de 5–15%) e ejeção, identificando problemas como linhas de solda, bolhas de ar, empenamento (devido a resfriamento desigual) e tensões residuais (WANG et al., 2010; ARAUJO, 2016). Para PA 6.6 reforçada, a simulação incorpora anisotropia das fibras, prevendo orientação e distribuição que afetam propriedades finais (FOLGAR; TUCKER, 1984; AUTODESK, 2015).

Vantagens incluem redução de custos (até 30% em protótipos), tempo de desenvolvimento (20–50% menor) e otimização de moldes, como posicionamento de canais de refrigeração para minimizar gradientes térmicos (KENNEDY, 2008; BEHALEK et al., 2013). Estudos mostram que ajustes na temperatura do molde (80–120°C) e velocidade de injeção reduzem contração para 0,3–0,8%, melhorando precisão dimensional em peças complexas (ARAUJO, 2016; ZHENG et al., 2011).

Em contextos industriais, a simulação integra-se ao design for manufacturing (DFM), permitindo comparações entre materiais de fornecedores diferentes e validação experimental via ensaios como DSC para cristalização não-isotérmica (CANEVAROLO, 2006; ARAUJO, 2016). Limitações incluem a necessidade de dados reológicos precisos e computação intensiva, mas avanços em IA aceleram previsões (ANSYS, 2023). Para PA 6.6, simulações destacam a importância da secagem prévia para evitar hidrólise, garantindo qualidade em aplicações automotivas e elétricas (KOHAN, 1995; AUTODESK, 2015).

3.1.1 Procedimentos metodológicos

Este capítulo descreve os materiais, equipamentos, softwares e procedimentos utilizados na simulação computacional do processamento por injeção da poliamida 6.6 (PA 6.6), pura e reforçada com fibras de vidro em teores de 0%, 15%, 30% e 50% em massa. A metodologia baseia-se exclusivamente em modelagem numérica, sem realização de ensaios experimentais físicos, conforme delimitado no item 1.4.

3.1.2 Materiais

Foram analisadas quatro composições de PA 6.6, todas com peso molecular médio (Mw) entre 25.000 e 35.000 g/mol e índice de fluidez (MFI) na faixa de 20–40 g/10 min (ASTM D1238, 275°C/2,16 kg):

- PA 6.6 – 0% GF: resina pura, sem reforço;
- PA 6.6 – 15% GF: reforçada com 15% em massa de fibra de vidro curta (L/D $\approx$ 30:1);
- PA 6.6 – 30% GF: reforçada com 30% em massa de fibra de vidro curta (L/D $\approx$ 25:1);
- PA 6.6 – 50% GF: reforçada com 50% em massa de fibra de vidro curta (L/D $\approx$ 20:1).

As fibras de vidro foram consideradas com diâmetro médio de 10–14 μ m, tratadas com silano (γ -aminopropiltrietoxissilano) para adesão interfacial. Os dados reológicos, térmicos e mecânicos foram obtidos da base de dados do software Moldflow Insight 2023 (Autodesk, 2023), com curvas de viscosidade não-newtoniana (modelo Cross-WLF) e propriedades específicas para cada teor de reforço.

3.1.3 Geometria da Peça

A peça simulada foi um conector em L para sistema de arrefecimento automotivo, com as seguintes características:

Volume: 24,77cm³

Espessura nominal: 5,3 – 7,2mm

Número de cavidades: uma

Sistema de alimentação: Aplicação de bucha quente

Canais de refrigeração: Considerado simulação isotérmica (O escoamento é analisado como se fosse “termicamente estável”)

A geometria foi importada em formato STEP a partir de modelagem CAD (TopSolid 7.16), com malha de elementos finitos geradas pelo software MoldFlow composta por ~1,2 milhão de tetraedros, utilizando o refinamento de 10 *layers* na camada da espessura, considerada uma qualidade excelente da malha para execução da análise.

Figura 2 – Qualidade da malha utilizada

Model Details:	
=====	
Mesh Type	= 3D Tetrahedra
Tetrahedral refinement layers (specified minimum)	= 10
Laminates across radius of beam elements	= 12
Total number of part nodes	= 225828
Number of tetrahedron nodes	= 225782
Number of beam nodes	= 45
Number of beam-tetrahedron connection nodes	= 1
Total number of injection location nodes	= 1
The injection location node numbers are:	
	274841
Total number of elements	= 1222159
Number of part elements	= 1222159
Number of tetrahedral elements	= 1222114
Number of sprue/runner/gate elements	= 45
Number of hot sprue/runner/gate elements	= 45
Total volume	= 27.9830 cm ³
Volume of tetrahedral elements	= 24.7652 cm ³
Volume of sprue/runner/gate elements	= 3.2178 cm ³
Volume of hot sprue/runner/gate elements	= 3.2178 cm ³
Volume filled initially	= 3.2178 cm ³
Volume to be filled	= 24.7652 cm ³
Part volume to be filled	= 24.7652 cm ³
Sprue/runner/gate volume to be filled	= 0.0000 cm ³
Parting plane normal	(dx) = 0.0000
	(dy) = 0.0000
	(dz) = 1.0000
Total projected area	= 26.9184 cm ²

Fonte: parâmetros retirados da análise

3.1.4 Procedimentos de Simulação

O fluxo de trabalho seguiu as etapas:

1. **Importação da geometria** (STEP → malha 3D);
2. **Definição do material** (seleção na biblioteca Moldflow, conforme materiais pré-selecionados anteriormente);

3. **Configuração do sistema de injeção** (utilizado aplicação de bico térmico, considerando apenas uma cavidade);
4. **Definição dos parâmetros de processo** (Tabela 1 e 2);
5. **Execução das análises** (Fill + Pack);
6. **Resultados analisados no pós-processamento:**
 - Tempo de preenchimento;
 - Pressão máxima;
 - Força de fechamento;
 - Tempo de congelamento;
 - Peso do produto;
 - Taxa de cisalhamento (apenas nas análises que padronizaram a vazão).

4.1.1 Análise de resultados – Vazão definida pelo MoldFlow

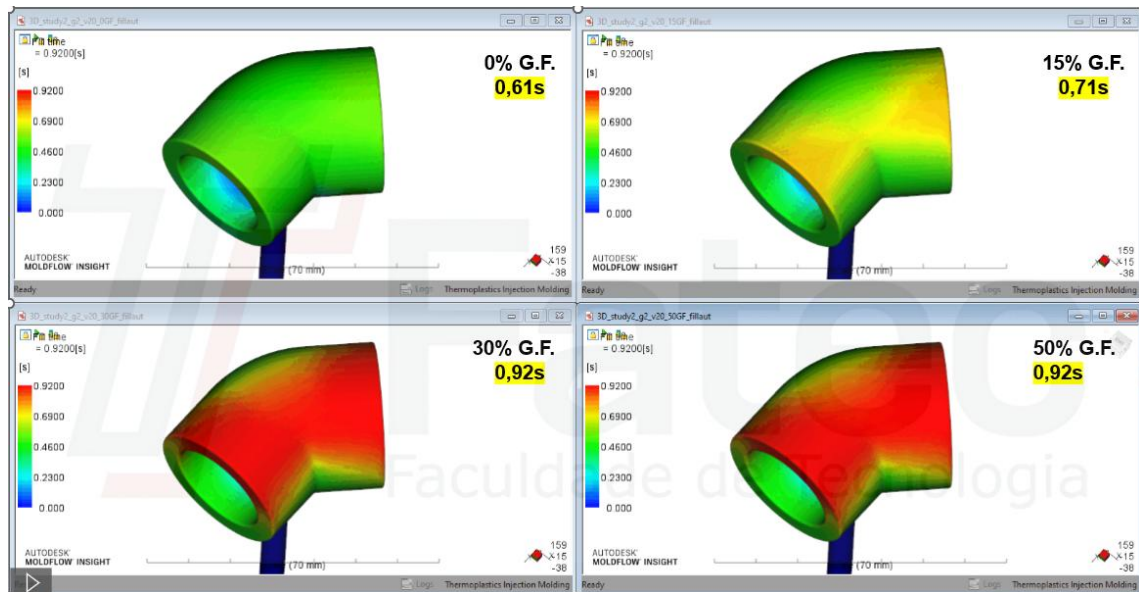
Nas primeiras análises, utilizamos o mesmo momento da comutação, perfil de recalque e temperatura do molde para todos os materiais, deixando o software definir automaticamente a vazão da injeção. Nesse cenário, foi observado alterações em resultados de pressão, força de fechamento, tempo de congelamento e peso do produto.

4.1.2 Preenchimento

O padrão de preenchimento segue igual para todos os materiais, isso já era esperado, independentemente da quantidade de aditivo utilizado, o padrão se comporta igualmente, isso pode acontecer inclusive quando comparado a polímeros de outra família, principalmente pelo fato de a peça possuir grandes espessuras.

Nesse primeiro comparativo de materiais, as análises terminam de preencher a cavidade em instantes diferentes (conforme figura 3), a definição desses tempos de injeção foi calculada pelo software, que definiu diferentes vazões para cada tipo de material. A vazão pode impactar positivamente ou negativamente resultados, entre eles pressão de injeção e força de fechamento.

Figura 3 – Tempo de injeção (vazão definida pelo MoldFlow)

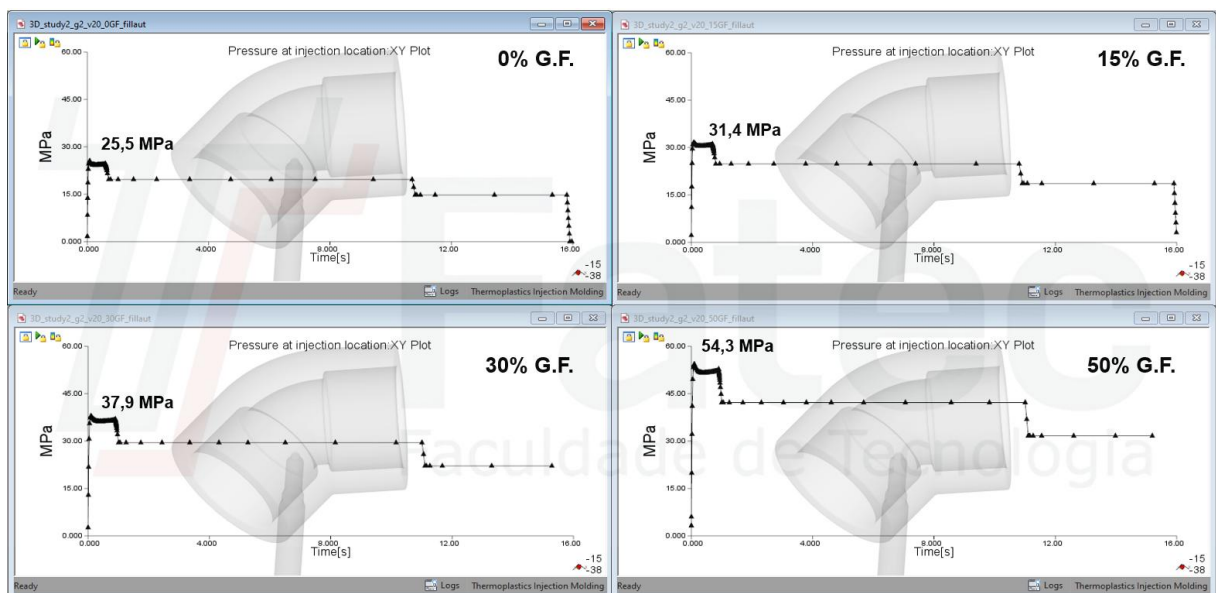


Fonte: parâmetros retirados da análise

4.1.3 Pressão de injeção

Houve aumento significativo na pressão de injeção, quanto maior o teor de fibra de vidro, mais tende a pressão necessária de injeção. Entre as duas extremidades (0% G.F. e 50%G.F.) percebe-se um aumento de 53% na pressão máxima de injeção. Podendo-se presumir que ela interfere diretamente na pressão exigida para a injeção.

Figura 4 – Pressão de injeção (vazão definida pelo MoldFlow)

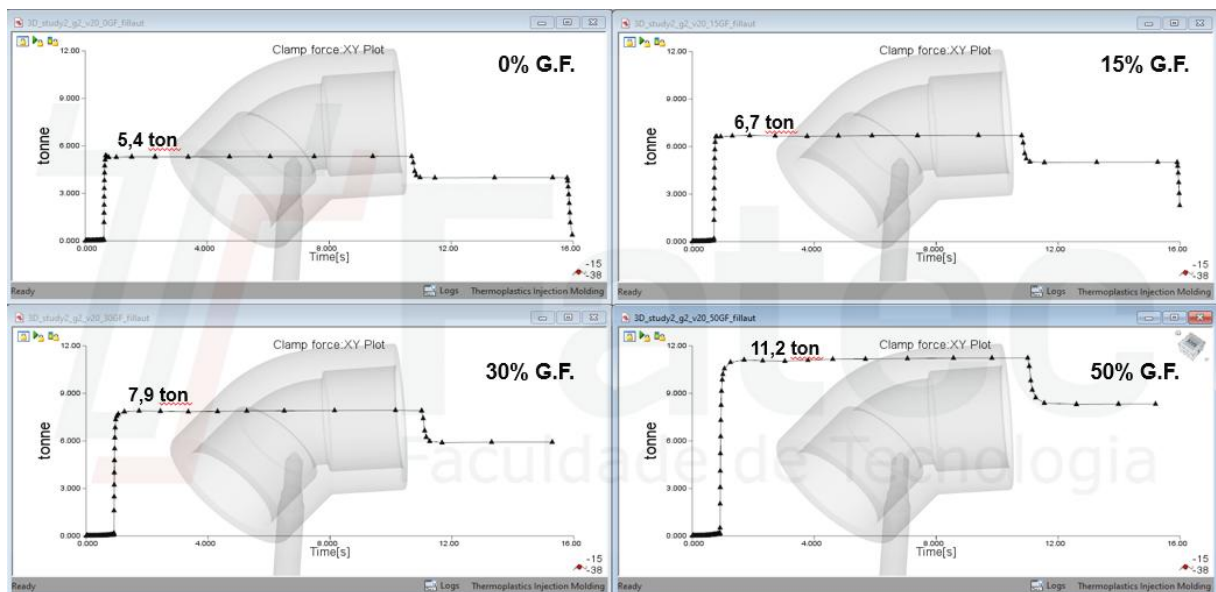


Fonte: parâmetros retirados da análise

4.1.4 Força de fechamento

A análise desse resultado reforça a teoria de que a força de fechamento é impactada pela pressão, ou seja, elas crescem quase que proporcionalmente. A diferença da pressão de injeção no resultado anterior mostra um aumento de 7%, e nesse caso, a força de fechamento teve o mesmo comportamento no gráfico, aumentando em 7% entre as análises com 0 teor de fibra e a análise com 50% de fibra.

Figura 5 – Força de fechamento (vazão definida pelo MoldFlow)

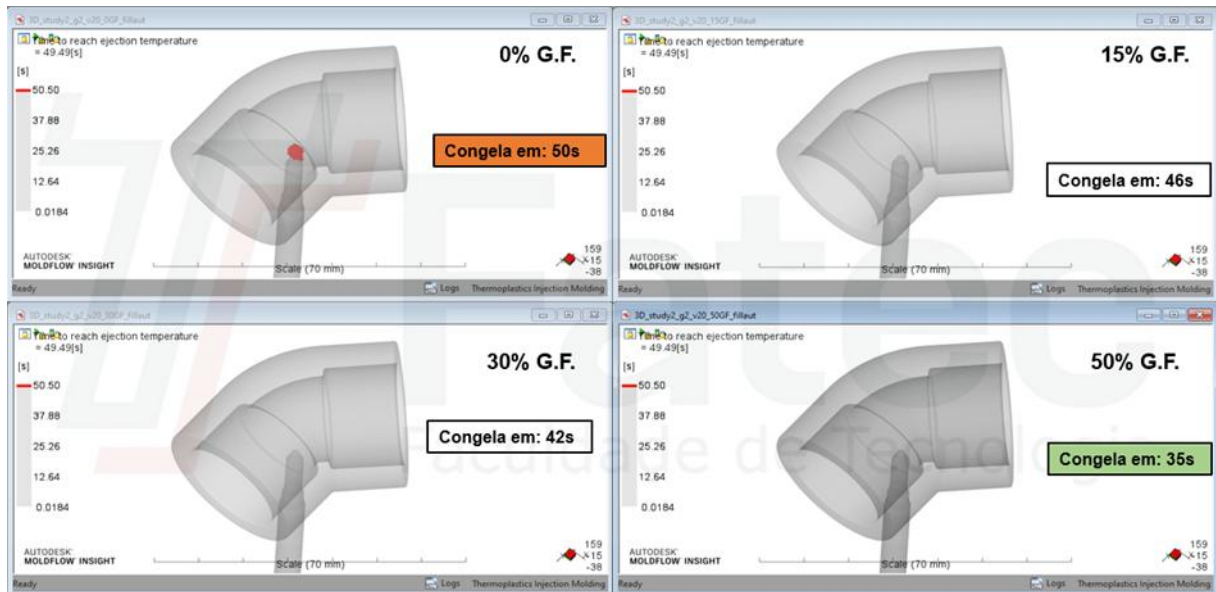


Fonte: parâmetros retirados da análise

4.1.5 Tempo de congelamento

Observando os estudos, é notável uma diferença relevante no tempo de congelamento. As análises que possuem materiais com maior teor de fibra de vidro tendem a congelar primeiro, com uma diferença de até 30%. Como é possível observar na imagem abaixo, quando se considera 50% G.F. o produto congela totalmente com 35s, em contrapartida, quando considerado material sem a adição de fibra o tempo para congelamento estica para 50s.

Figura 6 – Tempo de congelamento (vazão definida pelo MoldFlow)

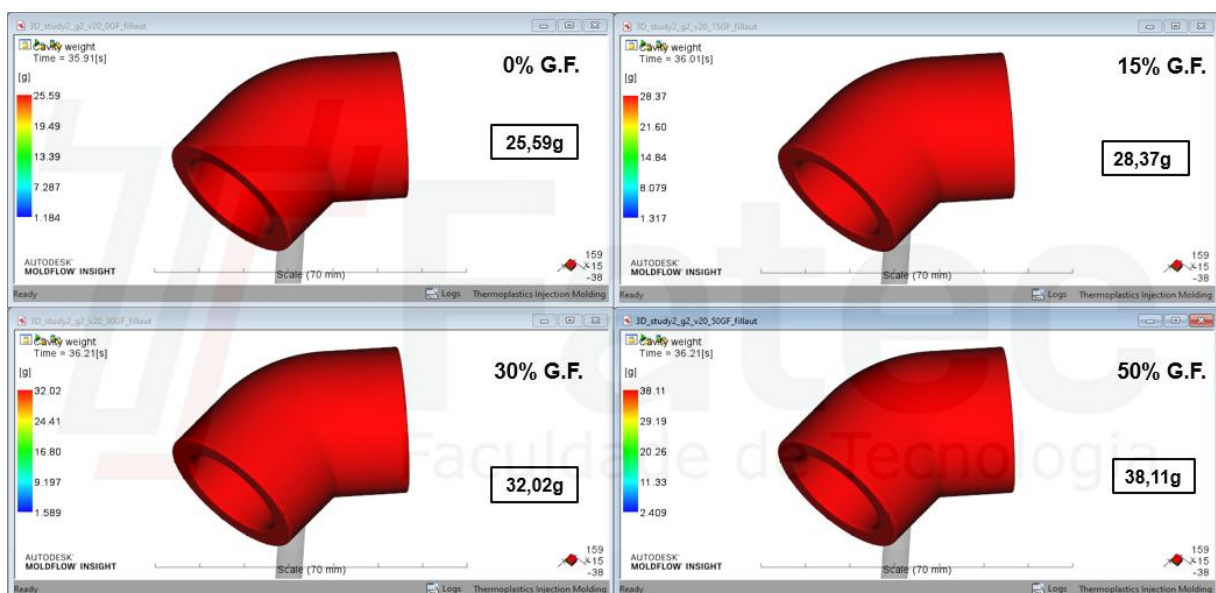


Fonte: parâmetros retirados da análise

4.1.6 Peso do produto

O peso do produto está diretamente ligado a densidade da matéria prima. Valores de tempo e pressão de recalque podem interferir nesse parâmetro também, ainda que levemente. Apesar de todos as análises serem rodadas exatamente com a mesma matemática (ou seja, mesma geometria, mesmo volume), a diferença de peso chega próximo de 33%, como observado na figura 5.

Figura 7 – Peso do produto (vazão definida pelo MoldFlow)



Fonte: parâmetros retirados da análise

4.2.1 Análise de resultados – Vazão controlada

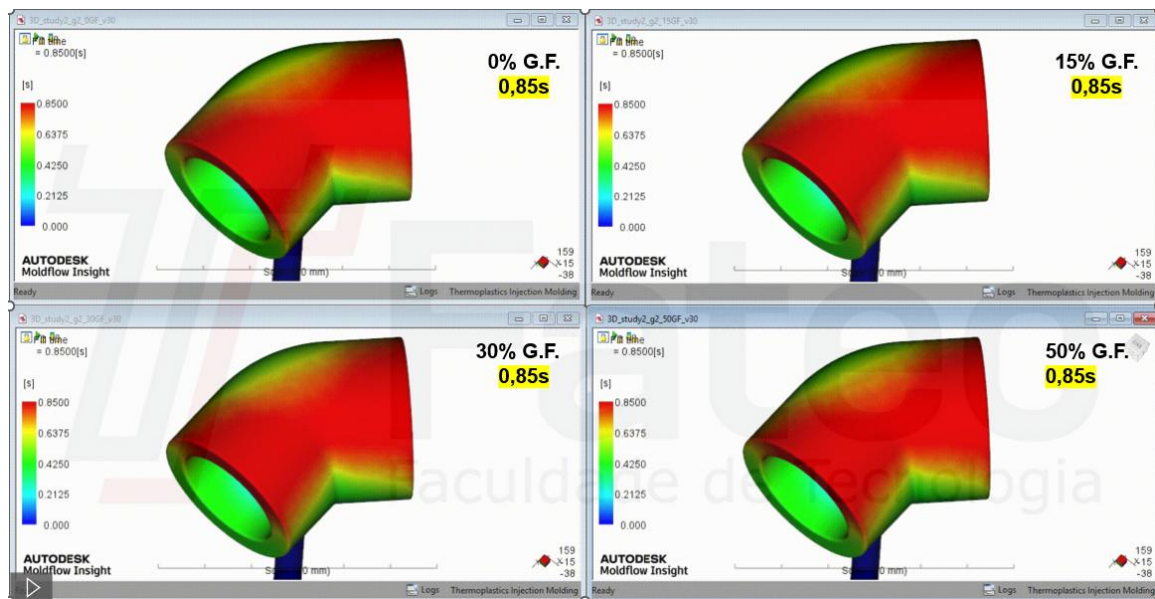
Para níveis de comparação, rodamos novamente as mesmas análises, mas controlando apenas um parâmetro: a vazão. O software Moldflow consegue calcular aproximadamente o tempo necessário de injeção. Por esse motivo, nos estudos anteriores, as análises têm diferentes vazões. Esse parâmetro pode afetar diretamente o resultado quando eles entram no mérito de comparação. Apesar de serem materiais diferentes (com diferentes teores de carga), para algumas pessoas (inclusive especialistas), a vazão e temperatura deve ser mantida a mesma em todos os estudos; dessa forma, torna-se um estudo comparativo mais justo. Por essa razão, foram feitas análises das duas formas, para comprovar a eficácia do estudo sem gerar margem de dúvidas para nenhum público.

Seguindo o conceito de vazão controlada, é possível também utilizar o resultado de taxa de cisalhamento, que foi abordado na figura 10. Nesse cenário, foi observado alterações em resultados de pressão, força de fechamento, tempo de congelamento, peso do produto e na taxa de cisalhamento.

4.2.2 Preenchimento

Apesar da mudança no tempo de preenchimento (agora todos iguais) o padrão de preenchimento segue igual para todos os materiais, isso já era esperado, independentemente da quantidade de aditivo utilizado, o padrão se comporta igualmente, isso pode acontecer inclusive quando comparado a polímeros de outras famílias, principalmente pelo fato de a peça possuir grandes espessuras. Na figura 8, é possível observar padrão de preenchimento (análise visual da cor que define o padrão de preenchimento) e tempo de injeção.

Figura 7 – Tempo de preenchimento (vazão controlada)

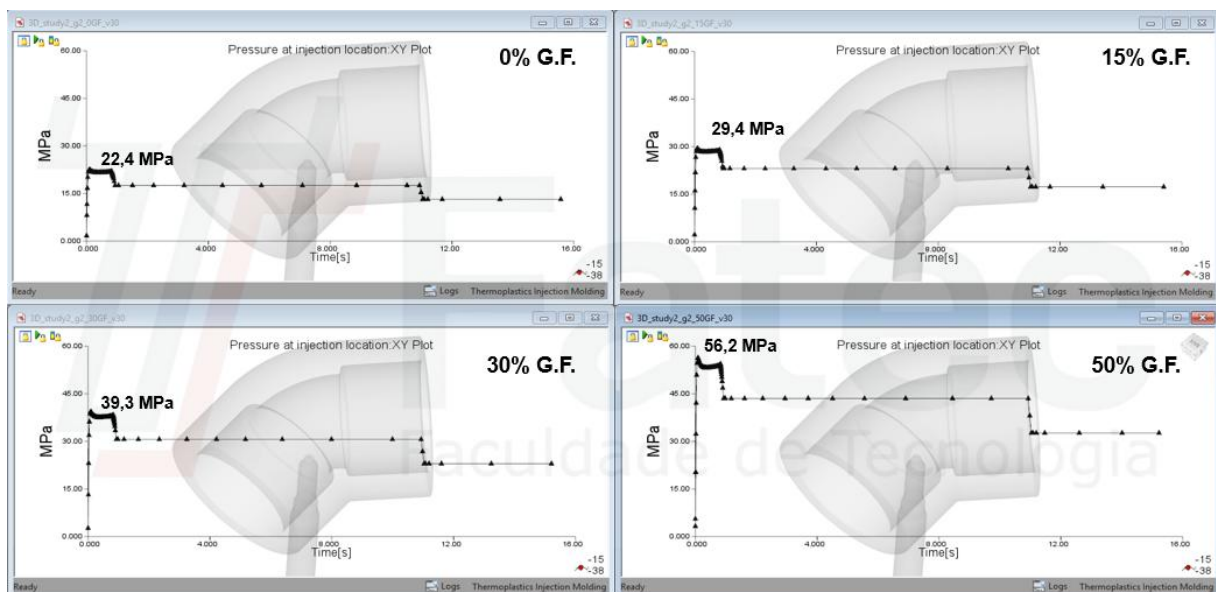


Fonte: parâmetros retirados da análise

4.2.3 Pressão de injeção

Com o estudo controlando as vazões, houve aumento ainda mais significativo na pressão de injeção, quanto maior o teor de fibra de vidro, mais tende a pressão necessária de injeção. Entre as duas extremidades (0% G.F. e 50%G.F.) percebe-se um aumento de 60% na pressão máxima de injeção, 7% a mais do que o estudo anterior. Podendo-se presumir que em ambos os cenários ela interfere diretamente na pressão exigida para a injeção.

Figura 8 – Pressão de injeção (vazão controlada)

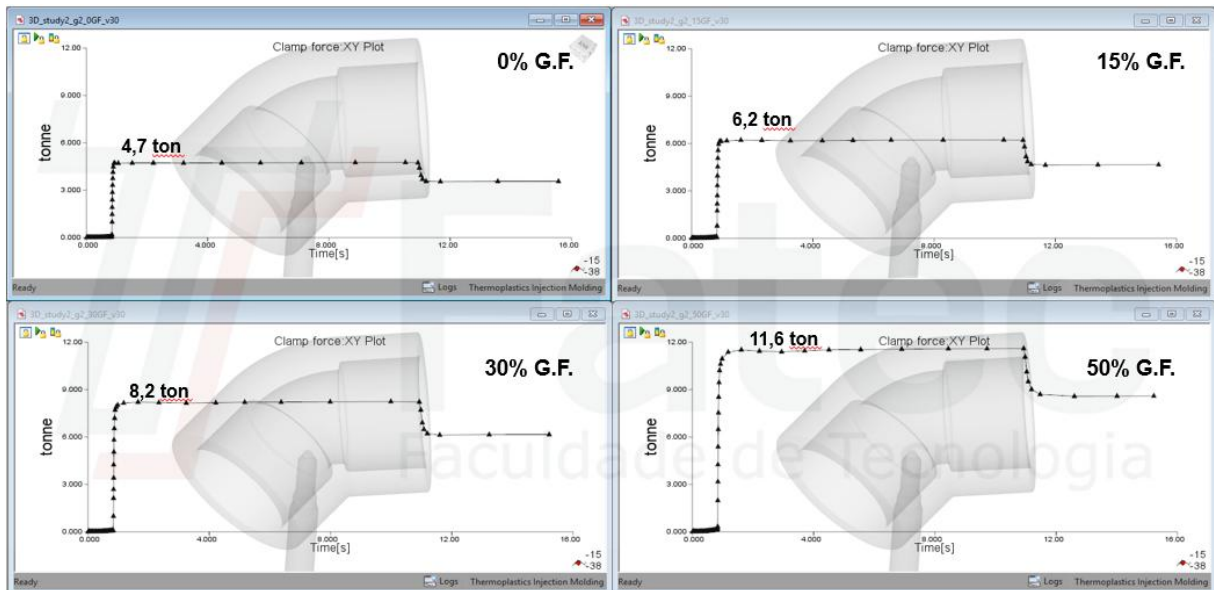


Fonte: parâmetros retirados da análise

4.2.4 Força de fechamento

De modo geral, a força de fechamento é impactada pela pressão, ou seja, elas crescem quase que proporcionalmente. Nesse caso, o crescimento da força é esperado devido ao resultado da pressão de injeção. Percebe-se um pico de força principalmente na análise com teor de 50% G.F.

Figura 5 – Força de fechamento (vazão controlada)

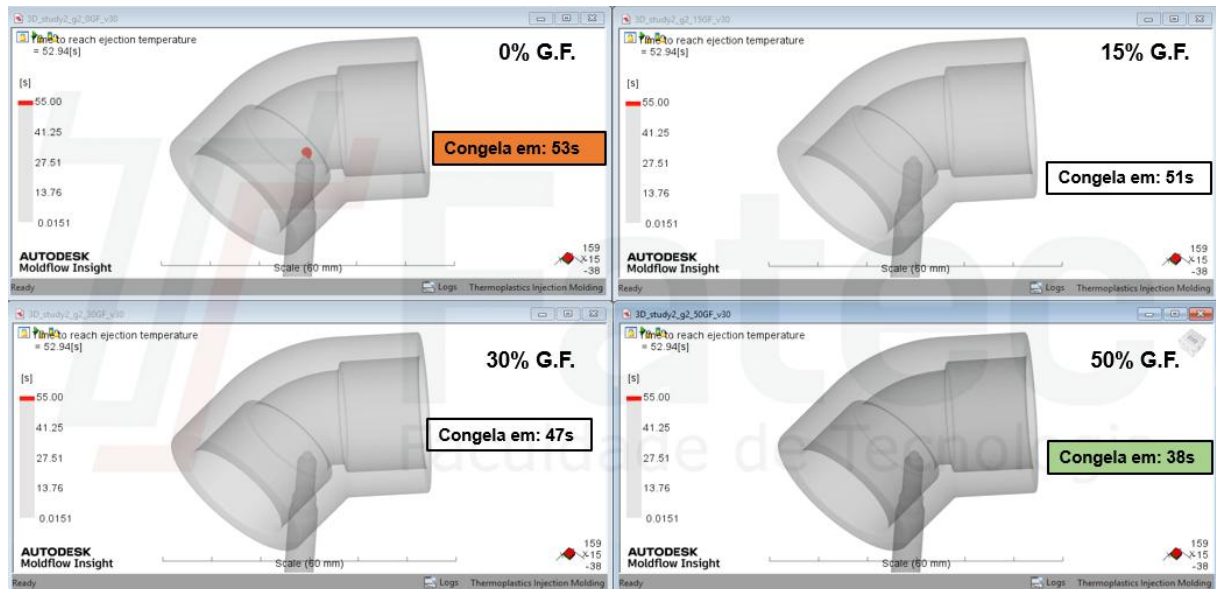


Fonte: parâmetros retirados da análise

4.2.5 Tempo de congelamento

Ainda nessa análise também é notável uma diferença relevante no tempo de congelamento. As análises que possuem materiais com maior teor de fibra de vidro tendem a congelar primeiro, com uma diferença de até 28%. Como é possível observar na imagem abaixo, quando se considera 50% G.F. o produto congela totalmente com 38s, em contrapartida, quando considerado material sem a adição de fibra o tempo para congelamento estica para 53s.

Figura 6 – Tempo de congelamento (vazão controlada)

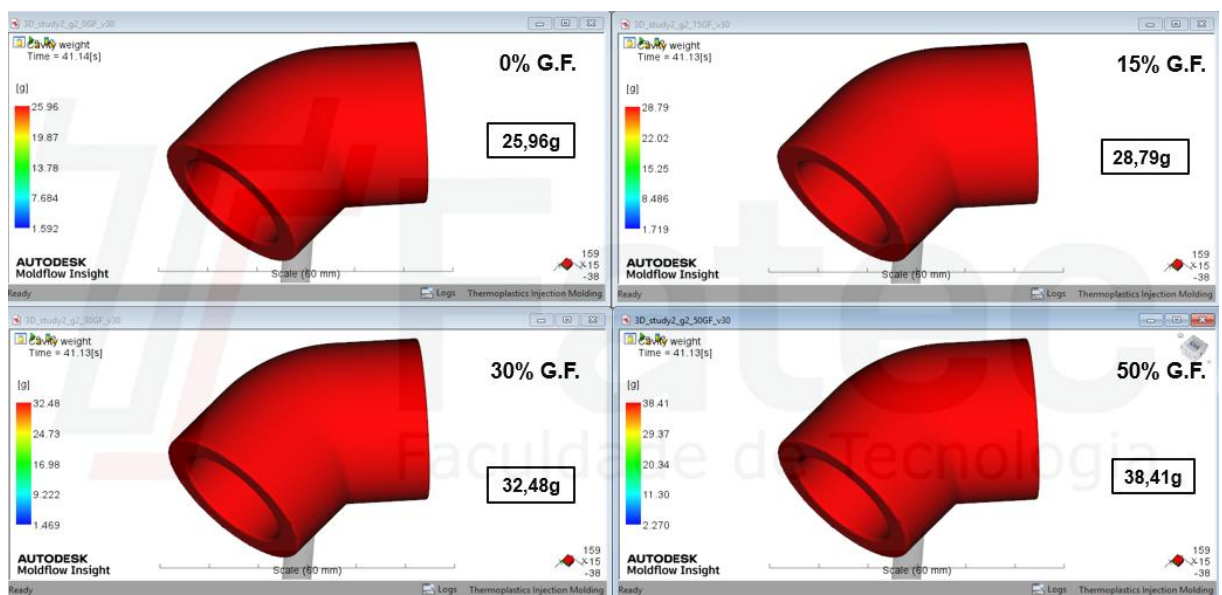


Fonte: parâmetros retirados da análise

4.2.6 Peso do produto

O peso do produto geralmente não tem ligação com vazão, está diretamente ligado a densidade da matéria prima. Valores de tempo e pressão de recalque podem interferir nesse parâmetro também, ainda que levemente. Apesar de todos as análises serem rodadas exatamente com a mesma matemática (ou seja, mesma geometria, mesmo volume), a diferença de peso chega próximo de 33%, como observado na figura 8.

Figura 8 – Peso do produto (vazão controlada)

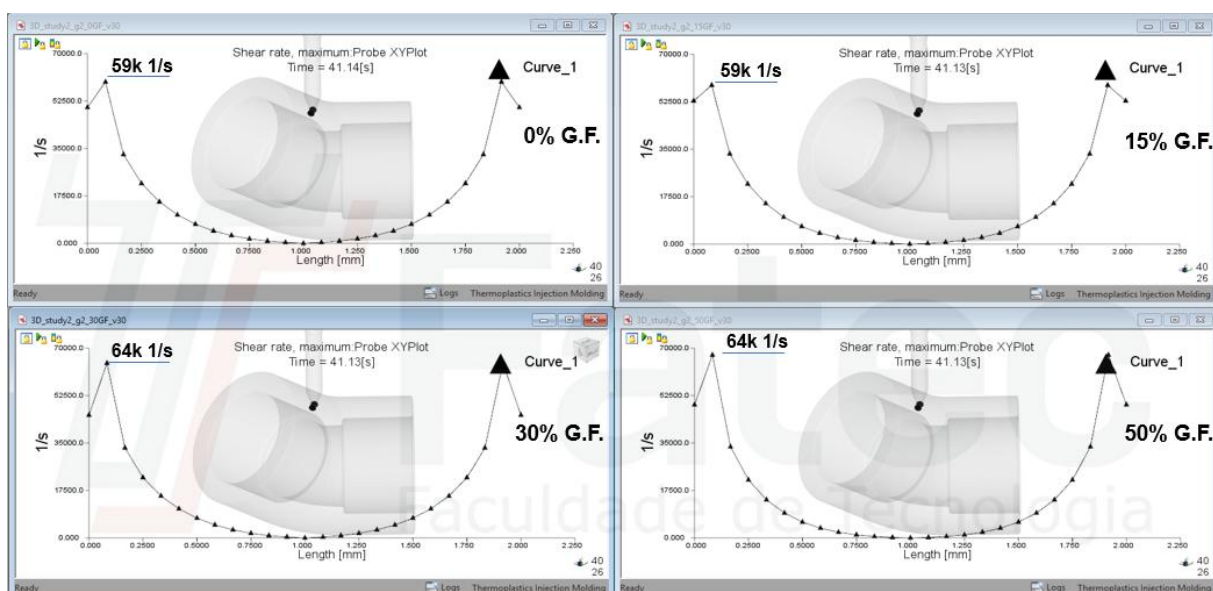


Fonte: parâmetros retirados da análise

4.2.7 Taxa de cisalhamento na região do gate

A taxa de cisalhamento foi considerada nessas análises por fazer sentido a sua comparação com vazões iguais, tendo em vista que esse resultado é totalmente relativo com a velocidade de injeção e com a restrição da passagem de fluxo na região do ponto de entrada na cavidade (gate). Nos gráficos abaixo podemos visualizar que a taxa de cisalhamento tem diferença quase que irrisória. É importante salientar que a vazão definida ($30\text{cm}^3/\text{s}$) foi baseado em resultados da taxa de cisalhamento. Valores de vazão superior a 30cm^3 poderia causar resultados elevados, prejudicando a qualidade da injeção.

Figura 8 – Taxa de cisalhamento na região do gate (vazão controlada)



Fonte: parâmetros retirados da análise

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo realizou uma investigação comparativa sistemática, por meio de simulação computacional no software Moldflow Insight, acerca dos impactos causados pela adição progressiva de fibra de vidro nos teores de 0%, 15%, 30% e 50% em massa nos parâmetros de moldagem por injeção da poliamida 66. Tomando como objeto de análise um conector em L de espessura nominal elevada, variando entre 5,3 mm e 7,2 mm, voltado ao sistema de arrefecimento automotivo, a pesquisa respondeu com êxito ao problema proposto ao mapear o comportamento reológico e térmico do material sob duas condições distintas de contorno, envolvendo a vazão definida automaticamente pelo software e a vazão controlada em $30\text{ cm}^3/\text{s}$. A análise consolidada dos resultados revelou que a frente de fluxo e o padrão visual de

preenchimento da cavidade mantiveram-se idênticos em todas as composições estudadas, independentemente do teor de aditivo ou do controle de vazão. Esse fenômeno é atribuído predominantemente à geometria de grande espessura da peça, a qual mascara sutis variações de fluidez na frente de avanço do polímero fundido.

Por outro lado, o incremento de fibra de vidro elevou drasticamente a viscosidade do compósito, exigindo maior trabalho mecânico no processamento. Na simulação com vazão automática, a pressão máxima necessária saltou 53% ao comparar a resina pura com a de maior teor de reforço. Quando a vazão foi rigidamente controlada e padronizada, essa discrepância tornou-se ainda mais crítica, atingindo um aumento de 60% na pressão de injeção entre as duas extremidades. Como consequência direta e quase proporcional a esse comportamento reológico, a força de fechamento necessária para manter o molde travado escalou de maneira análoga, apresentando picos notáveis na versão com 50% de fibra de vidro, o que reforça a teoria de interdependência direta entre a pressão interna da cavidade e o esforço de travamento da máquina.

Sob a ótica térmica, a presença do reforço mineral atuou reduzindo significativamente o tempo necessário para a solidificação total do canal e da peça. Nas análises de vazão automática, o tempo de congelamento caiu de 50 segundos na resina pura para 35 segundos na composição com máxima carga, representando uma redução de 30%. De forma semelhante, o cenário de vazão controlada repetiu a tendência de contração do tempo de resfriamento, que reduziu de 53 para 38 segundos, gerando um ganho de 28% na velocidade de solidificação. Esse resultado comprova que a incorporação da fibra de vidro acelera a estabilização térmica do produto, permitindo uma ejeção precoce e, conseqüentemente, reduzindo o tempo total de ciclo, o que otimiza expressivamente a produtividade em linhas de produção industrial.

Em relação à massa física do conector, o peso final demonstrou dependência estrita da densidade volumétrica da matéria-prima. Mesmo mantendo a mesma geometria e o mesmo volume matemático de preenchimento em todas as rodadas, a massa da peça saltou de aproximadamente 25,6g na versão sem aditivo para 38,1g na versão com 50% de reforço em ambos os cenários de injeção, gerando um acréscimo de massa de cerca de 33%. Adicionalmente, a imposição metodológica de uma vazão controlada provou-se eficaz para isolar variáveis, resultando em alterações praticamente irrisórias na taxa de cisalhamento na região do gate entre as quatro

composições, as quais oscilaram em uma faixa estável entre 59k 1/s e 64k 1/s. Essa estabilidade garantiu que o material não sofresse degradação por atrito excessivo, validando a escolha da vazão de 30 cm³/s como um limite seguro para a qualidade da injeção do componente.

Em suma, as metas científicas desta monografia foram plenamente atingidas, e os dados construídos oferecem um guia preditivo valioso para o ecossistema industrial de transformação de plásticos, minimizando os dispendiosos processos de tentativa e erro na regulagem de injetoras e no dimensionamento de sistemas de moldes para componentes automotivos estruturais. Como limitação inerente ao escopo delimitado, este estudo baseou-se exclusivamente em modelos numéricos e simulações via elementos finitos, sem a execução de matrizes experimentais físicas. Para dar continuidade e expandir a relevância científica desta pesquisa, recomenda-se, para investigações futuras, a realização da injeção física dos conectores em uma máquina injetora real utilizando os mesmos teores de poliamida com fibra de vidro, com o intuito de confrontar as pressões e tempos de ciclo reais com os dados gerados digitalmente pelo Moldflow. Também se faz aconselhável investigar experimentalmente a quebra mecânica do comprimento das fibras após o severo cisalhamento do processo, mapear a anisotropia de sua orientação ao longo da peça e submeter os conectores injetados a ensaios reais de tração, impacto e pressão hidrostática, correlacionando o ganho de desempenho mecânico e térmico com as tensões residuais previstas pelo software. Por fim, sugere-se avaliar o efeito abrasivo que o composto com elevado teor de fibra exerce a longo prazo nas paredes metálicas dos canais e cavidades do ferramental de moldagem.

REFERÊNCIAS

- BASSANI, A. et al. **Propriedades mecânicas de poliamidas reforçadas com fibras de vidro**. Polímeros, São Carlos, v. 12, n. 3, p. 178–185, 2002.
- CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006.
- DE, S. K. et al. **Short fiber-polymer composites**. Cambridge: Woodhead Publishing, 1996.
- Ferro, V et al. **Pequeno manual do náilon, estrutura, propriedades, Processamento**. São Paulo: Artliber, 2022.
- HARADAJ. **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos**. São Paulo: Artliber, 2004.
- HUANG, X. et al. **Structure-property relationships in glass fiber reinforced polyamide 66**. Journal of Applied Polymer Science, Hoboken, v. 108, n. 4, p. 2345–2353, 2008.
- JOHNSON, M. **The history of nylon: from laboratory to marketplace**. Chemical Heritage, Philadelphia, v. 20, n. 2, p. 14–19, 2002.
- JÚNIOR, M. **Conheça tudo sobre o Nylon e as poliamidas**. Disponível em: <<https://materiaisjr.com.br/conheca-tudo-sobre-o-nylon-e-as-poliamicas/>>.
- KOHAN, M. I. et al. **Nylon plastics handbook**. Munich: Hanser Publishers, 1995.
- MURASE, S. et al. **Thermal and mechanical properties of polyamide 66**. Polymer Journal, Tokyo, v. 34, n. 8, p. 608–614, 2002.
- NASCIMENTO, R. et al. **Aplicações de simulações computacionais para melhorias e redução de custos no processo de injeção de termoplásticos**. Disponível em: <<https://arandu.ufrpe.br/server/api/core/bitstreams/b759da47-d72d-4679-8d1b-9713027cd9ba/content>>. Acesso em: 3 fev. 2026.
- OREFICE, R. L. et al. **Compósitos poliméricos reforçados com fibras: uma revisão**. Polímeros, São Carlos, v. 11, n. 4, p. 185–192, 2001.

GLOSSÁRIO

A **Poliamida 66 (PA66)** consiste em um polímero termoplástico de engenharia sintético, pertencente à família dos nylons e obtido por meio da reação de policondensação estequiométrica entre o ácido adípico e a hexametilenodiamina, resultando em uma estrutura molecular altamente simétrica com forte presença de ligações amida e cristalinidade na faixa de 40% a 50%. Essa estrutura confere ao material um caráter **higroscópico**, que é a capacidade físico-química inerente de absorver umidade do ambiente através da difusão de moléculas de água entre suas cadeias poliméricas, o que altera temporariamente suas propriedades termomecânicas ao romper e reformular pontes de hidrogênio intercatenárias.

Quando essa matriz é associada à **Fibra de Vidro (GF)**, que atua como um reforço estrutural inorgânico adicionado em percentuais de massa na resina termoplástica, o material se transforma em um compósito de alto desempenho, elevando severamente o módulo elástico e a temperatura de deflexão sob carga. Para que essa mistura funcione com eficiência, as fibras recebem um tratamento superficial com **silanos**, agentes de acoplamento químico bifuncionais que promovem a adesão interfacial estável através de ligações covalentes entre a carga mineral e a matriz polimérica, mitigando falhas por delaminação. Durante o processamento desse compósito, ocorre o fenômeno do **cisalhamento**, um esforço mecânico de deformação por escorregamento gerado pelo atrito e velocidade do fluxo do material fundido contra as paredes metálicas, provocando a quebra e a fragmentação física das fibras de vidro e alterando o seu fator de aspecto.

Para prever esse comportamento, utiliza-se a **Simulação Computacional**, uma metodologia baseada em ferramentas de engenharia auxiliada por computador (CAE) que aplica modelos matemáticos e numéricos para reproduzir virtualmente as etapas físicas de preenchimento, recalque e resfriamento do molde, permitindo otimizar variáveis antes da fabricação do ferramental. Essa simulação é sustentada pelo **Método dos Elementos Finitos (MEF)**, uma técnica numérica que consiste na discretização de uma geometria tridimensional complexa em um número finito de subregiões menores e interconectadas, chamadas de elementos ou malha, para a resolução de equações diferenciais parciais de escoamento e transferência de calor. Paralelamente, a **Dinâmica dos Fluidos Computacionais (CFD)** resolve os algoritmos numéricos associados às equações fundamentais de conservação de

massa, momento e energia do polímero fundido em movimento. O comportamento reológico desse fluido é regido pelo **Modelo Cross-WLF**, uma equação matemática que descreve a viscosidade não-newtoniana do polímero em função da taxa de cisalhamento, da temperatura e da pressão, simulando com precisão o comportamento pseudoplástico do material dentro da cavidade. Na dinâmica da injeção, a **vazão** representa o volume de material polimérico fundido que é deslocado por unidade de tempo para dentro do molde, influenciando diretamente a velocidade de preenchimento e as pressões internas.

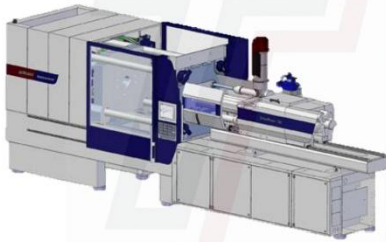
Ao final do preenchimento de 90% a 95% da cavidade, ocorre o momento da **comutação**, que sinaliza a transição do controle da máquina injetora da fase de velocidade (injeção) para a fase de pressão, iniciando o **perfil de recalque**, etapa na qual uma pressão controlada é mantida sobre o fundido para compensar a contração volumétrica inerente ao resfriamento do plástico. Todo esse fluxo penetra na cavidade passando pelo **gate (ponto de entrada)**, que é a região de restrição geométrica e dimensionalmente reduzida que conecta os canais de alimentação à cavidade principal da peça, onde a **taxa de cisalhamento na região do gate** atinge seus valores máximos devido ao estrangulamento do escoamento. À medida que o calor é trocado com o molde, monitora-se o **tempo de congelamento**, que define o intervalo necessário para que o polímero atinja a temperatura de ejeção segura e solidifique completamente em todas as suas seções estruturais.

Caso ocorram falhas nesse equilíbrio térmico ou tensões internas retidas, pode surgir a deformação conhecida como **empenamento (warping)**, um defeito dimensional caracterizado pela distorção geométrica da peça final em relação ao modelo original, causado pela retração volumétrica desigual ou por resfriamento heterogêneo. Por fim, a resistência térmica do produto é balizada pela **Temperatura de Deflexão Sob Carga (HDT)**, um índice que determina a temperatura limite na qual um polímero sofre uma deformação flexural padronizada sob uma solicitação mecânica específica, sendo um parâmetro crítico para componentes do setor automotivo.

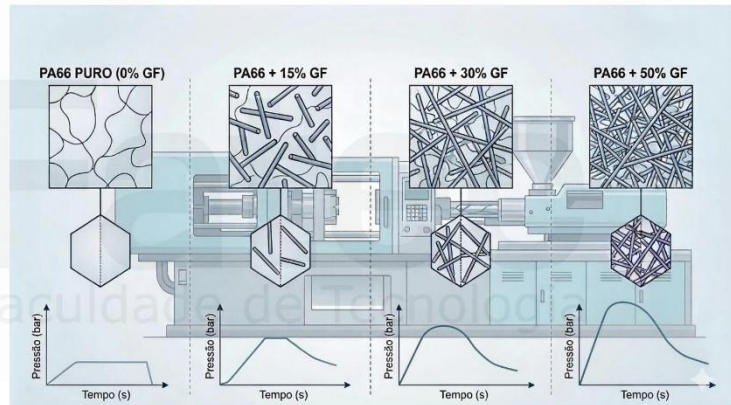
APÊNDICE

APÊNDICE A – APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

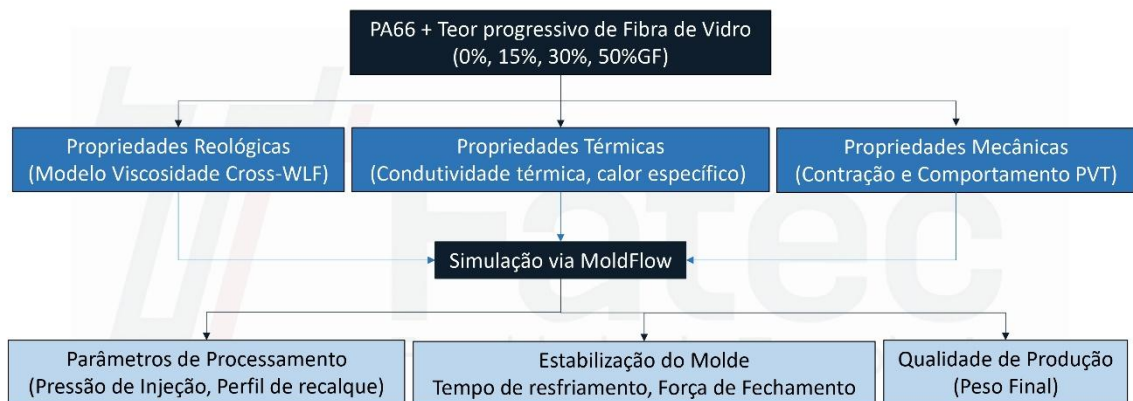
Comparação de parâmetros de injeção de PA66 com percentuais progressivos de fibra de vidro (0%, 15%, 30% e 50%) via Moldflow.



Bruno Soares Nascimento
Érick Azevedo Rocha
Gustavo Galves Gomes



O que será estudado?



Introdução



NYLON

A poliamida 66 (PA66) é um dos plásticos de engenharia mais utilizados globalmente, presente em peças automotivas, componentes elétricos, engrenagens e até implantes médicos.



Esses compósitos permitem substituir metais em aplicações estruturais, reduzindo peso em até 40% e custos de produção em 15–25%.



Fatec
Mauá

Justificativa e relevância industrial

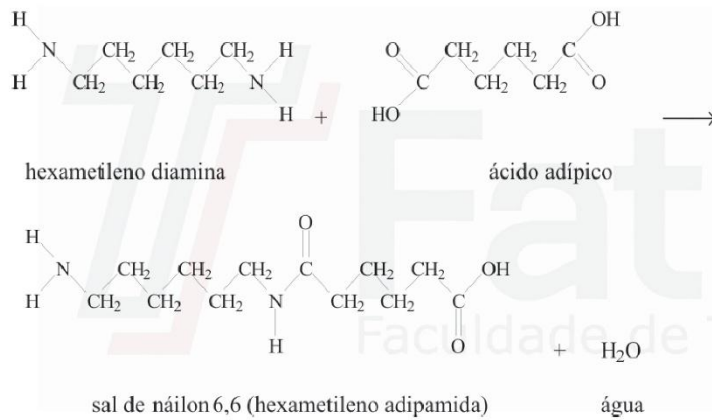
Justificativa

Esse estudo preenche a lacuna sobre como otimizar o processo de injeção para evitar defeitos e maximizar desempenho ao mapear tendências claras de ajuste de parâmetros com o aumento do teor de GF e ao reduzir custos industriais com menos testes de tentativa e erro.

Delimitações

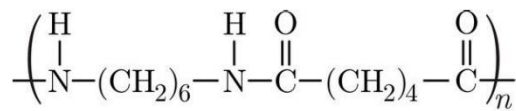
Delimita-se ao estudo da resina poliamida 6.6 (PA 6.6), pura e reforçada com fibras de vidro em teores de 0%, 15%, 30% e 50% em massa, com ênfase na análise do impacto de suas propriedades térmicas, mecânicas e reológicas no processamento por injeção. A investigação restringe-se à simulação computacional do fluxo de preenchimento, recalque e resfriamento de conectores automotivos, utilizando exclusivamente o software **Moldflow Insight** para Análise Numérica Tridimensional.

Fatec
Mauá

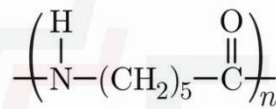


SOBRE O
POLÍMERO
POLIAMIDA 66
(PA66)

Fatec
Mauá



Nylon 66



Nylon 6

POR QUE NÃO
A POLIAMIDA
6 (PA6)?

Característica	PA6	PA66
Temperatura de fusão	220°C	260°C
Absorção de umidade	Maior	Menor
Resistência Mecânica	Inferior em alta temperatura ($\geq 170^\circ\text{C}$)	Superior em alta temperatura ($\geq 170^\circ\text{C}$)

Fatec
Mauá

A PA66 reforçada com Fibra de Vidro (PA66-GF)

- O reforço da poliamida 6.6 com fibras de vidro (PA 6.6 GF) eleva suas propriedades a níveis de materiais de alto desempenho, permitindo aplicações em cenários de alta solicitação mecânica e térmica.

Propriedade Mecânica	PA66 Pura	PA66 Reforçada
Módulo de elasticidade	2.500-3.500 MPa	8.000-12.000 Mpa
Temperatura de deflexão sob carga (HDT)	80-100°C	Superior a 250°C

Procedimentos Metodológicos

MATERIAIS

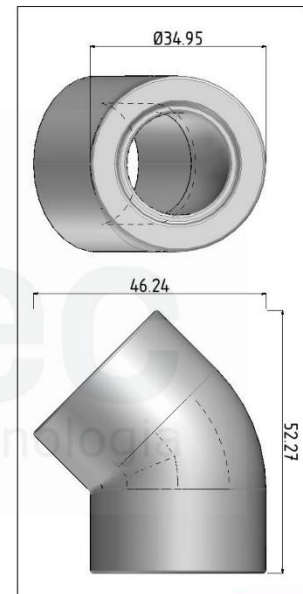
- Foram analisadas quatro composições de PA 6.6.
- PA 6.6 – 0% GF: resina pura, sem reforço;
- PA 6.6 – 15% GF: reforçada com 15% em massa de fibra de vidro curta ($L/D \approx 30:1$);
- PA 6.6 – 30% GF: reforçada com 30% em massa de fibra de vidro curta ($L/D \approx 25:1$);
- PA 6.6 – 50% GF: reforçada com 50% em massa de fibra de vidro curta ($L/D \approx 20:1$).

¹ L/D (Length/Diameter): razão entre o comprimento e o diâmetro da fibra de vidro, utilizada para caracterizar seu fator de aspecto e influência nas propriedades mecânicas do compósito.

Procedimentos Metodológicos

GEOMETRIA DA PEÇA

- Conector em L para sistema de arrefecimento automotivo.
- Volume: 24,77cm³;
- Espessura nominal: 5,3 – 7,2mm;
- Diâmetro do gate: Ø2,0mm;
- Número de cavidades: uma;
- Sistema de alimentação: Aplicação de bucha quente;
- Canais de refrigeração: Considerado simulação isotérmica.



Fatec
Mauá

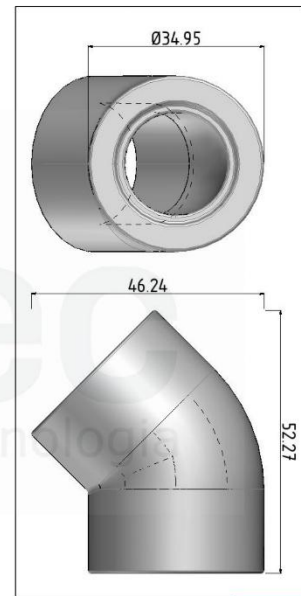
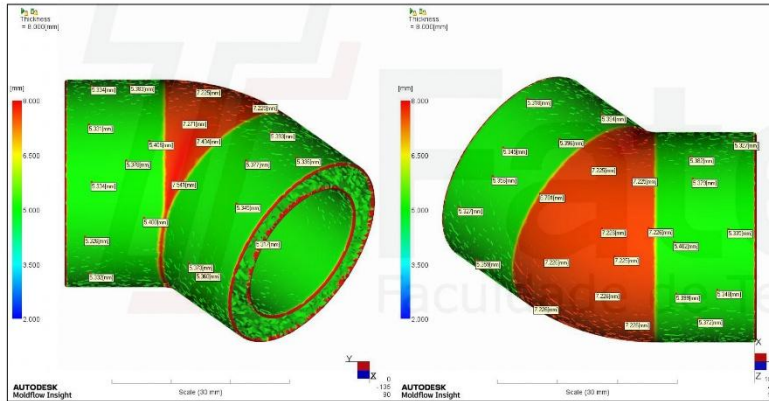


ANÁLISE DE RESULTADOS

Fatec
Mauá

Produto – Objeto de pesquisa

Aplicação: Conexão do sistema de arrefecimento do motor.



Fatec
Mauá

Material 1 – PA66 - 0%G.F.



Ultramid® A 218 Y20 BLACK

Product Information

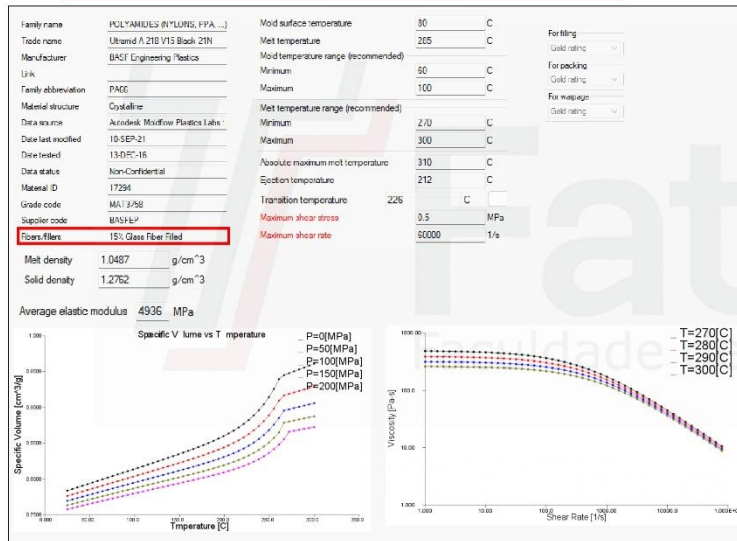
Typical values for uncoloured product at 23 °C¹⁾

	Test method	Unit	Values ²⁾
General Properties			
Asia Pacific	-	-	bk
Colour: black (bk), uncoloured (un), coloured (co), transparent (tr)	-	-	-
Pellets	-	-	-
Physical			
Density	ISO 1183	kg/m ³	1150 / -
Mechanical properties			
Stress at break	ISO 527-1/-2	MPa	75 / -
Strain at break	ISO 527-1/-2	%	25 / -
Flexural modulus	ISO 178	MPa	2600 / -
Flexural strength	ISO 178	MPa	110 / -
Charpy notched impact strength (ISO 17814A (23 °C))	ISO 17814A	kJ/m ²	8 / -
Thermal properties			
HDT A (1.80 MPa)	ISO 75-1/-2	°C	67
Melting temperature, DSC (10 °C/min)	ISO 11357-1/-3	°C	263
Injection			
Pre/post processing: Pre-drying: temperature	-	°C	80
Pre/post processing: max. allowed water content	-	%	0.3
Injection molding cylinder temperature 1 (feed zone)	-	°C	265 - 275
Injection molding cylinder temperature 2 (compression)	-	°C	275 - 285
Injection molding cylinder temperature 3 (metering zone, head run of screw)	-	°C	280 - 285
Injection molding: Mold temperature: range	ISO 294	°C	60 - 80

BASF
We create chemistry

Fatec
Mauá

Material 2 – PA66 - 15%G.F.



Ultramid® A 218 V15 BLACK 21N

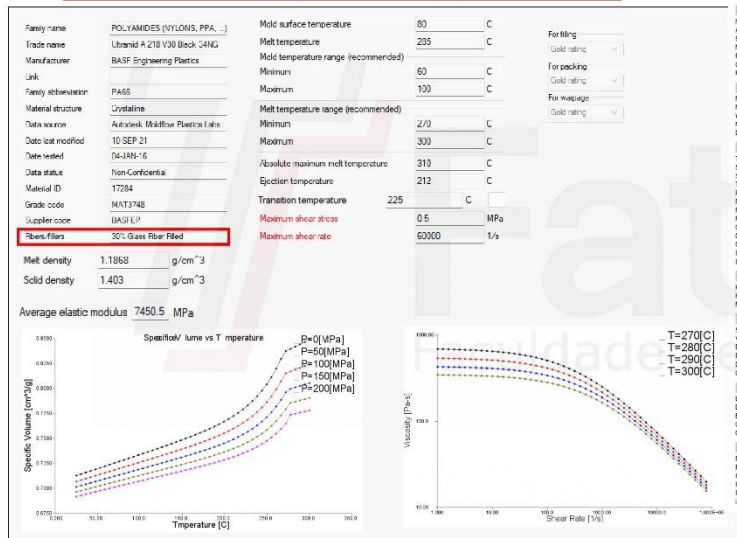
Product Information



Typical values for uncoloured product at 23 °C ¹⁾	Test method	Unit	Values ²⁾
General Properties			
North America	-	-	+
Asia Pacific	-	-	+
South and Central America	-	-	+
Near East/Africa	-	-	+
Processing: Injection moulding (M), Extrusion (E), Blow moulding (B)	-	-	M
Colour: Black (Bk), uncoloured (Un), coloured (Co), transparent (Tr)	-	-	Bk, Un
Pellets	-	-	+
Physical			
Molding shrinkage (parallel)	ISO 294-4	%	0.50
Molding shrinkage (normal)	ISO 294-4	%	1.00
Water absorption, 24 h in water, 23 °C	ISO 185	%	1.1
Density	ISO 1183	kg/m ³	1240
Mechanical properties			
Tensile modulus	ISO 527-1/-2	MPa	6000 / 4300
Stress at break	ISO 527-1/-2	MPa	135 / 80
Strain at break	ISO 527-1/-2	%	2 / 6
Tensile strength	ISO 178	MPa	3500 / 3000
Flexural strength	ISO 178	MPa	1115
Charpy impact strength ISO 179-1A (23 °C)	ISO 179-1A	kJ/m ²	6 / 6.5
Charpy impact strength ISO 179-1A (100 °C)	ISO 179-1A	kJ/m ²	40 / 60
Impact strength ISO 180-A (23 °C)	ISO 180-A	kJ/m ²	5 / 6
Impact strength ISO 180-U (23 °C), MPTS	ISO 180-U	kJ/m ²	40 / 35
Thermal properties			
HDT A (1.85 MPa)	ISO 75-1/-2	°C	245
Melting temperature, DSC (10 °C/min)	ISO 11357-1/-3	°C	263
Electrical properties			
Surface resistivity	IEC 62531-2	Ohm·m	< 10 ¹³
Volume resistivity	IEC 62531-2	Ohm·m	1E15 / 1E15
Dielectric strength (0.2 mm)	IEC 60243-1	kV/mm	270 / 230
Disipation factor (100 Hz)	IEC 60243-1	E-4	0.01 / 0.1
Comparative tracking index, CTI, test liquid A	IEC 60112	-	400 / 3
Flammability			
Burning Behav. at thickness 3.2 mm	IEC 60695-11-10	class	HB
Oxygen index	ISO 4589-2	%	24
Injection			
Pre-Peak processing, Pre-drying, Temperature	-	°C	80
Pre-Peak processing, Pre-drying, Time	-	min	0.5
Injection molding cylinder temperature 1 (heat zone)	-	°C	270 - 290
Injection molding cylinder temperature 2 (compression)	-	°C	275 - 285
Injection molding cylinder temperature 3 (venting zone, head room of screw)	-	°C	260 - 290
Injection molding, Mold temperature, range	ISO 294	°C	70 - 180



Material 3 – PA66 - 30%G.F.



Ultramid® A 218 V30 BLACK 34NG

Product Information

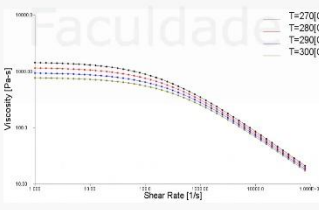
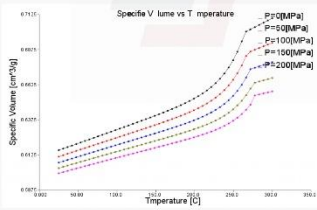


Typical values for uncoloured product at 23 °C ¹⁾	Test method	Unit	Values ²⁾
General Properties			
North America	-	-	+
Asia Pacific	-	-	+
South and Central America	-	-	+
Near East/Africa	-	-	+
Processing: Injection moulding (M), Extrusion (E), Blow moulding (B)	-	-	M
Colour: Black (Bk), uncoloured (Un), coloured (Co), transparent (Tr)	-	-	Bk
Pellets	-	-	+
Physical			
Molding shrinkage (parallel)	ISO 294-4	%	0.43
Molding shrinkage (normal)	ISO 294-4	%	1.13
Water absorption, 24 h in water, 23 °C	ISO 185	%	0.6
Modulus absorption, equilibrium 25 °C/100% v/v	ISO 185	%	1.73
Density	ISO 1183	kg/m ³	1360
Mechanical properties			
Tensile modulus	ISO 527-1/-2	MPa	13000 / 7500
Stress at break	ISO 527-1/-2	MPa	180 / 135
Strain at break	ISO 527-1/-2	%	3 / 7
Tensile strength at break, 2 mm (ASTM)	ASTM D 638	MPa	9 / 7
Flexural strength	ISO 178	MPa	1600 / 1400
Flexural modulus (ASTM)	ASTM D 790	MPa	3000 / 2000
Flexural strength (ASTM)	ASTM D 790	MPa	290 / 100
Charpy impact strength ISO 179-1A (23 °C)	ISO 179-1A	kJ/m ²	11 / 16
Charpy impact strength ISO 179-1A (100 °C)	ISO 179-1A	kJ/m ²	60 / 30
Impact strength ISO 180-A (23 °C)	ISO 180-A	kJ/m ²	10 / 18
Impact strength ISO 180-U (23 °C)	ASTM D 256	kJ/m ²	120 / 1
Thermal properties			
HDT A (1.85 MPa)	ISO 75-1/-2	°C	258
HDT A (1.82 MPa), ASTM	ASTM D 648	°C	265
Melting temperature, DSC (10 °C/min)	ISO 11357-1/-3	°C	263
Electrical properties			
Surface resistivity	IEC 62531-2	Ohm·m	< 10 ¹³
Volume resistivity	IEC 62531-2	Ohm·m	1E15 / 1E15
Dielectric strength (0.2 mm)	IEC 60243-1	kV/mm	24 / 20
Disipation factor (100 Hz)	IEC 60243-1	E-4	0.01 / 0.1
Comparative tracking index, CTI, test liquid A	IEC 60112	-	400 / 3
Flammability			
Burning Behav. at 1.6 mm spec. thickness	IEC 60695-11-10	class	HB
Burning Behav. at thickness 3.2 mm	IEC 60695-11-10	class	HB
Burning Behav. at thickness 3.2 mm	UL-94, IEC 60695	class	HB
Cable Wire Flammability index (1.6 mm)	IEC 60332-1/-2	class	HB
Oxygen index	ISO 4589-2	%	21
Injection			
Pre-Peak processing, Pre-drying, Temperature	-	°C	80
Pre-Peak processing, Pre-drying, Time	-	min	0.5
Injection molding cylinder temperature 1 (heat zone)	-	°C	270 - 290
Injection molding cylinder temperature 2 (compression)	-	°C	275 - 290
Injection molding cylinder temperature 3 (venting zone, head room of screw)	-	°C	260 - 290
Injection molding, Mold temperature, range	ISO 294	°C	70 - 100



Material 4 – PA66 - 50%G.F.

Family name	POLYAMIDES (NYLONS - PPA...)	Mold surface temperature	30 °C	For filling	Gold rating
Trade name	Ultrad® A 218 V50 Black 21N	Melt temperature	285 °C	For packing	Gold rating
Manufacturer	B/SF Engineering Plastics	Mold temperature range (recommended)	Minimum: 50 °C Maximum: 100 °C	For wasteage	Gold rating
Link	PA66	Melt temperature range (recommended)	Minimum: 270 °C Maximum: 300 °C		
Molded structure	Crystalline	Absolute maximum melt temperature	310 °C		
Data source	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Bedding temperature	216 °C		
Date last modified	10 SEP 21	Transition temperature	228 °C		
Date level	07 JAN 15	Maximum shear stress	0.5 MPa		
Data status	Non-Confidential	Maximum shear rate	50000 1/s		
Material ID	17205				
Grade code	MAT3749				
Supplier code	BAU LI				
Fiber/fill	50% Glass Fiber Fibre				
Melt density	1.1868 g/cm ³				
Solid density	1.403 g/cm ³				
Average elastic modulus	11085 MPa				



Ultrad® A 218 V50 BLACK 21N

Product Information



Typical values for uncoloured product at 23 °C ¹⁾	Test method	Unit	Values ²⁾
General Properties			
North America	-	-	+
Asia Pacific	-	-	+
South and Central America	-	-	+
North East Africa	-	-	+
Processing: Injection moulding (IM), Extrusion (E), Blow moulding (B)	-	-	90
Colour: Black (BK), uncoloured (un), coloured (col), transparent (tr)	-	-	38 µm
Pellets	-	-	+
Physical			
Molding shrinkage (parallel)	ISO 294-4	%	0.40
Molding shrinkage (normal)	ISO 294-4	%	0.65
Water absorption, 24 h in water, 23 °C	ISO 62	%	0.6
Water absorption, equilibrium in water at 23°C	similar to ISO 62	%	3.6
Moisture absorption, equilibrium 23°C/50% r.h.	ISO 1183	kg/m ³	1.40
Density	ISO 1183	kg/m ³	1550 / -
Mechanical properties			
Tensile modulus	ISO 527-1/-2	MPa	16200 / 12800
Stress at break	ISO 527-1/-2	MPa	240 / 175
Tensile Strength at Break (ASTM)	ASTM D 638	MPa	225 / -
Break at break	ISO 527-1/-2	%	2.7 / 4
Flexural modulus	ISO 178	MPa	14500 / 10500
Flexural strength (ASTM)	ASTM D 790	MPa	225 / -
Charpy notched impact strength (ISO 179/1e4 (23°C))	ISO 179/1e4	kJ/m ²	14 / 18
Charpy impact strength (ISO 179-1e4 (23 °C))	ISO 179/1e4	kJ/m ²	95 / 95
Notched impact strength (ISO 180A (23 °C))	ISO 180A	kJ/m ²	15 / 17
Notched impact strength (ASTM D 256 (23 °C))	ASTM D 256	J/m	160 / -
Thermal properties			
HDT B (0.45 MPa)	ISO 75-1/-2	°C	260
HDT A (1.10 MPa)	ISO 75-1/-2	°C	255
HDT A (1.82 MPa) ASTM	ASTM D 648	°C	255
Melting temperature, DSC (10°C/min)	ISO 11357-1/-3	°C	262
Electrical properties			
Surface resistivity	IEC 62031-3-2	Ohm	1E12
Volume resistivity	IEC 62031-3-1	Ohm·m	1E15 / 1E13
Electric strength (d = 2.0 mm)	IEC 60243-1	W/mm	35 / 30
Relative permittivity (100Hz)	IEC 62031-3-1	-	3.7 / 4
Dissipation factor (100 Hz)	IEC 62031-3-1	-	0.01 / 0.11
Comparative tracking index, CTI, test liquid A	IEC 60112	-	400 / -
Flammability			
Burning Behavior at 1.6 mm min. thick	IEC 60695-11-10	class	HB
Burning Behavior at thickness 0.8 mm	IEC 60695-11-10	class	HB
Burning Behavior at thickness 3.2 mm	UL-94, IEC 60695	class	HB
Glow Wire Flammability Index (0.8 mm)	IEC 60695-2-12	°C	650
Glow Wire Flammability Index (1.6 mm)	IEC 60695-2-12	°C	650
Glow Wire Flammability Index (3.2 mm)	IEC 60695-2-12	°C	750
Oxygen index	ISO 4589-1/-2	%	25
Injection			
Pre/Post-processing: Pre-drying, Temperature	-	°C	80
Pre/Post-processing: max. allowed water content	-	%	0.3
Injection molding cylinder temperature 1 (feed zone)	-	°C	270 - 280
Injection molding cylinder temperature 2 (compression)	-	°C	280 - 290
Injection molding cylinder temperature 3 (metering zone, head room of screw)	-	°C	280 - 300
Injection (pneumatic): Mold temperature, range	ISO 294	°C	75 - 100



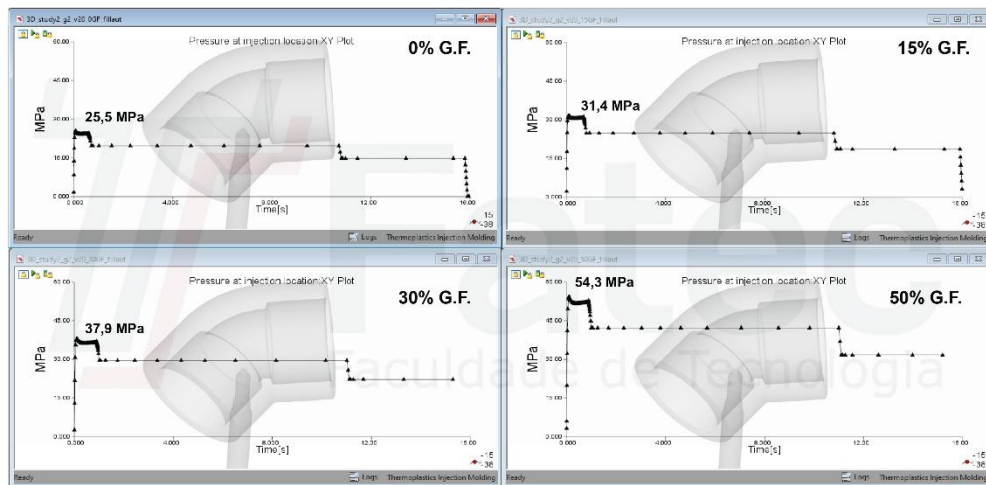
Preenchimento



Foi interpretado que, quanto maior o índice de fibra de vidro no PA66, mais tempo ele precisa para preencher totalmente a cavidade, mas, entre as análises de 30% e 50% de G.F., observa-se que a vazão necessária é a mesma.



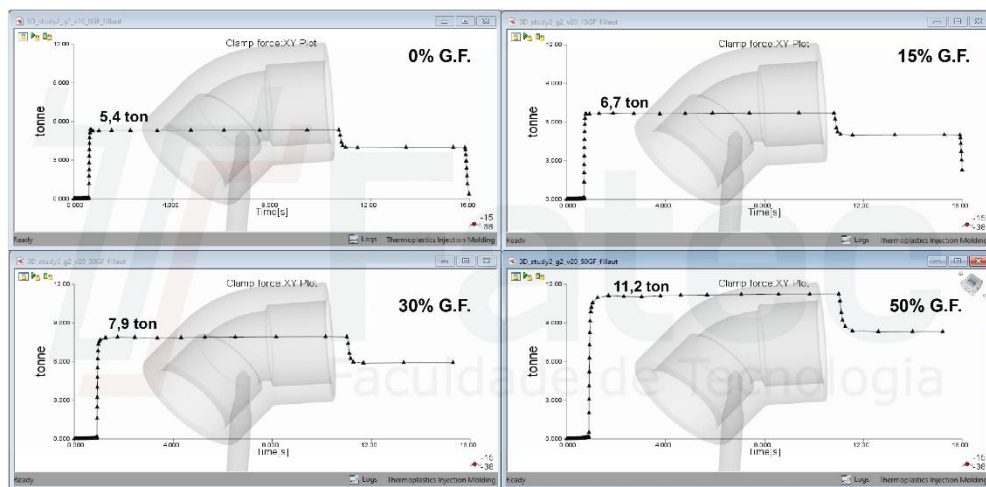
Pressão de injeção



No parâmetro pressão de injeção, pode-se observar o crescimento conforme a quantidade de fibra de vidro, podendo-se presumir que a mesma interfere diretamente na pressão exigida para a injeção.

Fatec
Mauá

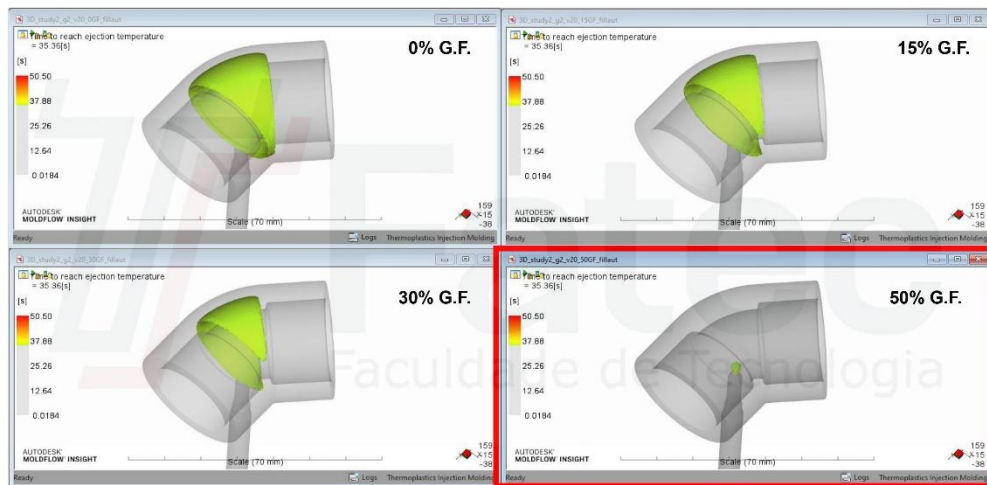
Força de Fechamento



De modo geral, a força de fechamento é impactada pela pressão, ou seja, elas crescem quase que proporcionalmente. Nesse caso, o crescimento da força é esperado devido ao resultado da pressão de injeção. Percebe-se um pico de força principalmente na análise com teor de 50% G.F.

Fatec
Mauá

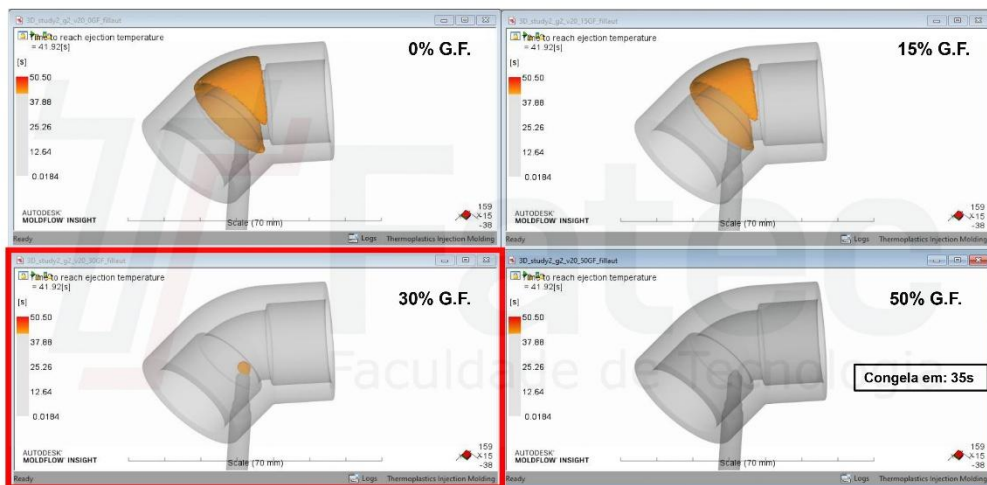
Tempo de congelamento – 35s



Produto com 50% G.F. congela com $\approx 35s$.

Fatec
Mauá

Tempo de congelamento – 42s

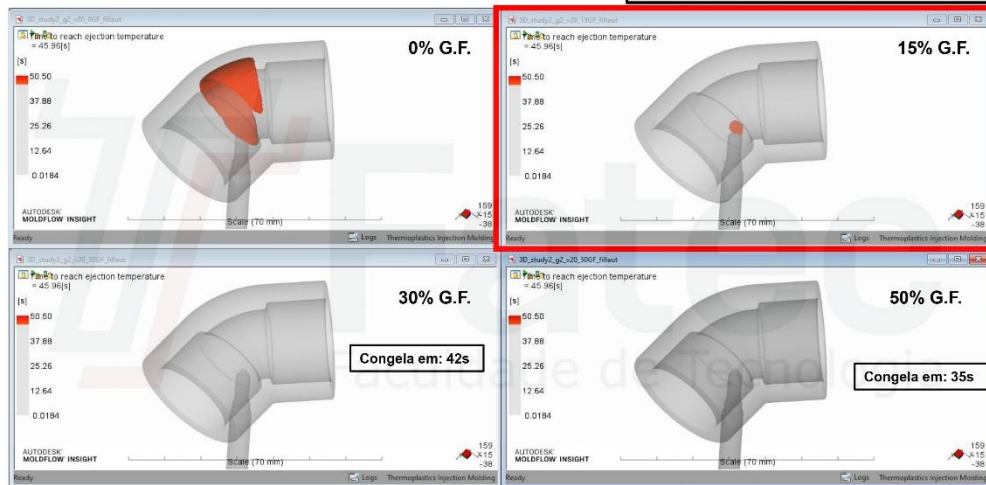


Produto com 30% G.F. congela com $\approx 42s$.

Fatec
Mauá

Tempo de congelamento – 46s

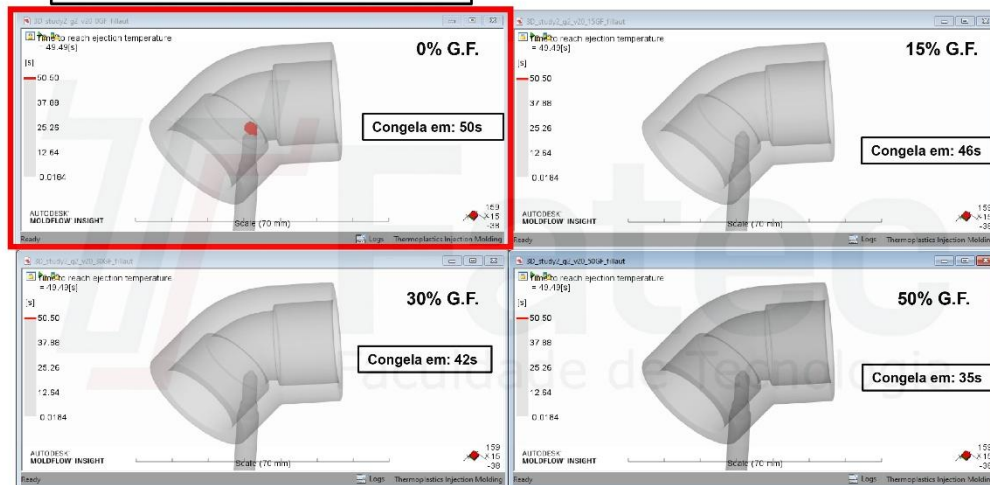
Produto com 15% G.F. congela com $\approx 46s$.



Fatec
Mauá

Tempo de congelamento – 50s

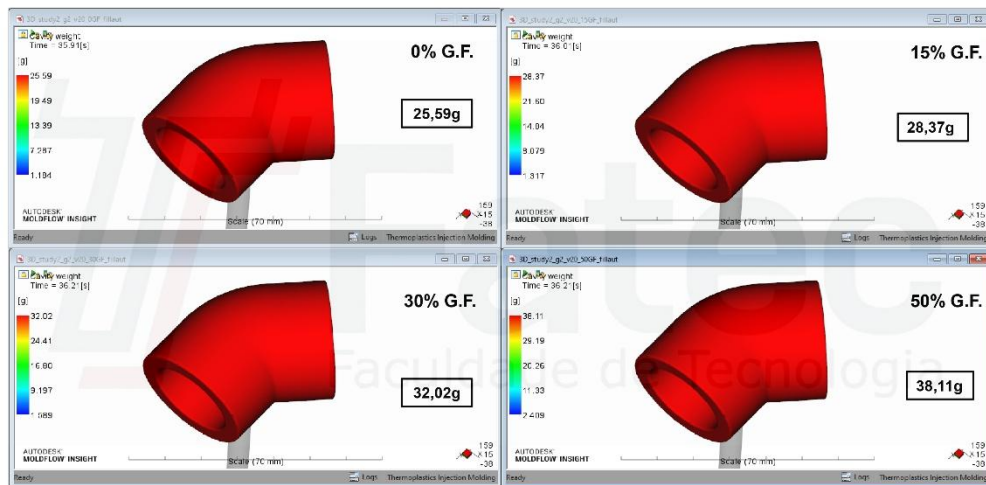
Produto com 0% G.F. congela com $\approx 50s$.



Quanto maior o teor de fibra adicionada à resina PA66, é notável a diferença de tempo para extração do produto, ou seja, pode-se concluir que o tempo de ciclo do material com maior adição de fibra de vidro é menor, mas isso impacta diretamente em maiores valores de pressão e, consequentemente, força de fechamento.

Fatec
Mauá

Peso do produto



No estudo comparativo dos datasheets, é possível identificar diferenças de densidade devido à adição de fibra de vidro. É uma resultante simples: quanto maior a % de fibra, maior a densidade; consequentemente, o produto fica mais pesado, como podemos ver nas imagens dos estudos acima.

Fatec
Mauá

Ficha de processo - Comparativo

Variável	Opção 1 (0% GF)	Opção 2 (15% GF)	Opção 3 (30% GF)	Opção 4 (50% GF)
Preenchimento completo (S/N)	S	S	S	S
Tempo de injeção (s)	0,61	0,71	0,92	0,92
Vazão (cm ³ /s)**	41	35	28	28
Temperatura de injeção (°C)	288	285	285	285
Pressão máxima (MPa)	25,5	31,4	37,9	54,3
Força de fechamento (Toneladas)	5,4	6,7	7,9	11,2
Tempo de congelamento (s)	50	46	42	35
Peso do produto (g)	25,59	28,37	32,02	36,21

Parâmetro de processo	Valor
Momento da comutação (%) (padronizado)*	99
Perfil de recalque (% em relação a pressão máxima) (padronizado)*	10s → 80% 5s → 60%
Temperatura de molde (°C) (padronizado)*	80



*Padronizado = o mesmo parâmetro utilizado em todas as análises.

** Vazão (cm³/s) = Vazão definida automaticamente pelo software (Moldflow)

Fatec
Mauá

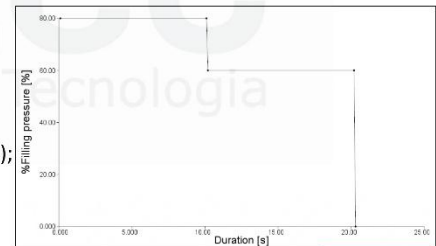
Novos estudos comparativos

Para níveis de comparação, rodamos novamente as mesmas análises, mas controlando apenas um parâmetro: a vazão.

Motivo: o software Moldflow consegue calcular aproximadamente o tempo necessário de injeção. Por esse motivo, nos estudos anteriores, os estudos têm vazões diferentes. Mas esse parâmetro pode afetar diretamente o resultado quando eles entram no mérito de comparação. Apesar de serem materiais diferentes (com diferentes teores de carga), para algumas pessoas (inclusive especialistas), a vazão e temperatura deve ser mantida a mesma em todos os estudos; dessa forma, torna-se um estudo comparativo mais justo. Por essa razão, foram feitas análises das duas formas, para comprovar a eficácia do projeto sem gerar margem de dúvidas para nenhum público.

Parâmetros controlados (iguais em todas as análises a partir de agora):

- **Vazão:** observando os estudos anteriores, definimos a vazão em $30 \text{ cm}^3/\text{s}$;
- **Momento da comutação:** 99% (parâmetro já controlado nas análises anteriores);
- **Temperaturas:** 80°C Tmolde e 285°C Tmelt.
- **Perfil de recalque:** $80\% \times 10 \text{ s} \rightarrow 60\% \times 10 \text{ s}$ (conforme gráfico).



Fatec
Mauá

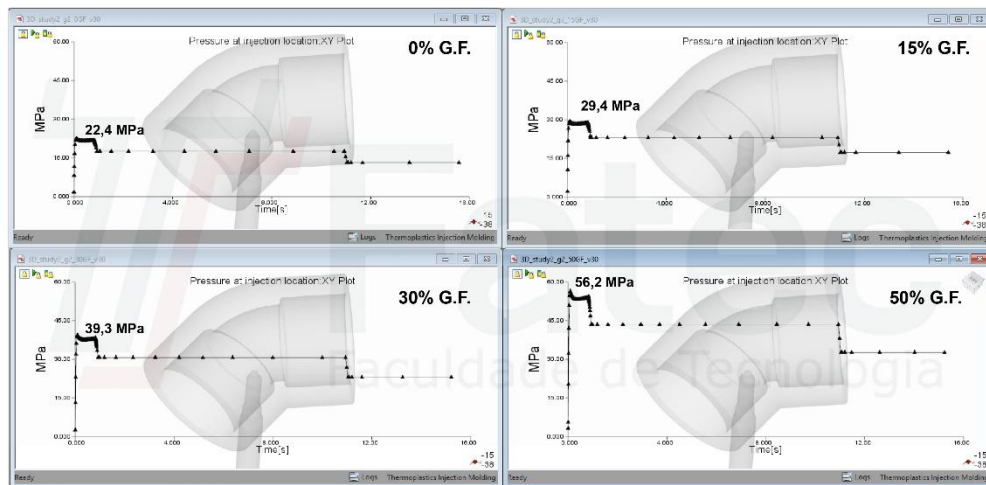
Preenchimento



Nessa análises, foi utilizado a mesma vazão para todos os cenários, sendo assim, todos os materiais preenchem a cavidade com 0,85s.

Fatec
Mauá

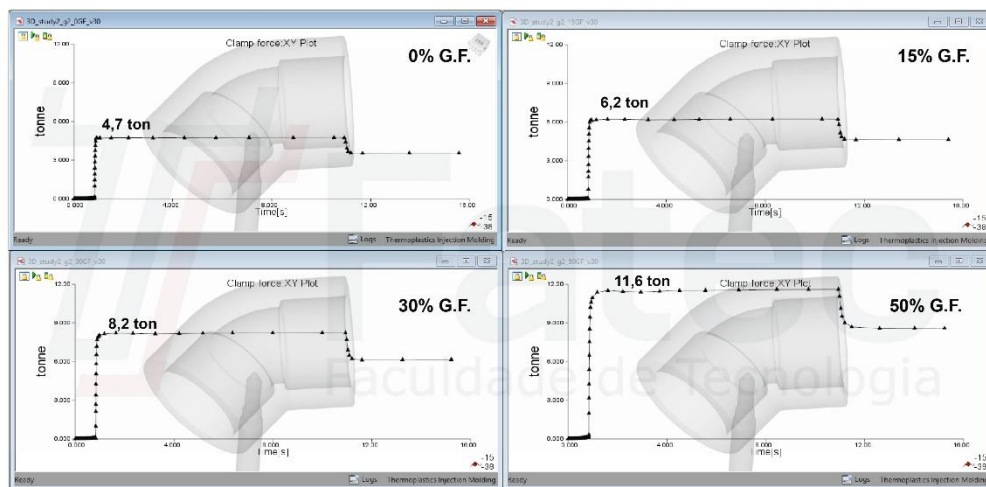
Pressão de injeção



No parâmetro pressão de injeção, pode-se observar o crescimento conforme a quantidade de fibra de vidro, podendo-se presumir que a mesma interfere diretamente na pressão exigida para a injeção.

Fatec
Mauá

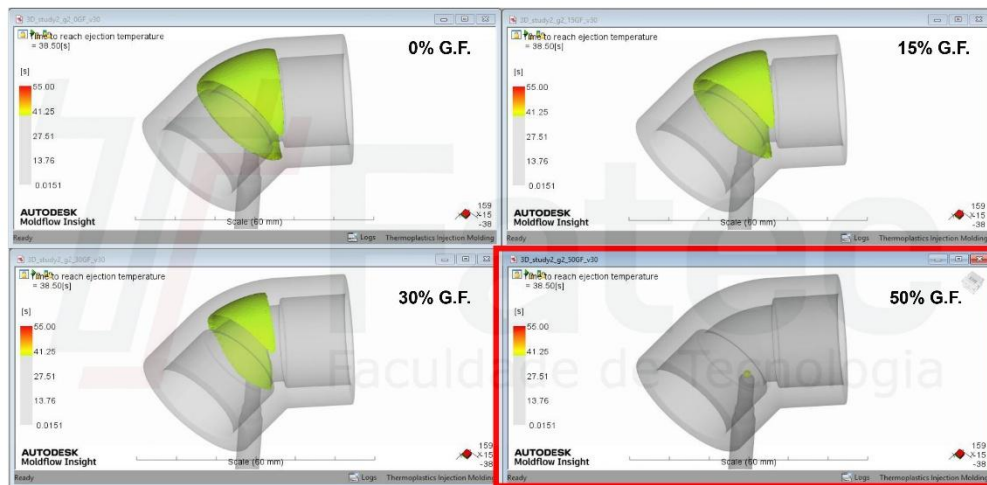
Força de Fechamento



De modo geral, a força de fechamento é impactada pela pressão, ou seja, elas crescem quase que proporcionalmente. Nesse caso, o crescimento da força é esperado devido ao resultado da pressão de injeção. Percebe-se um pico de força principalmente na análise com teor de 50% G.F.

Fatec
Mauá

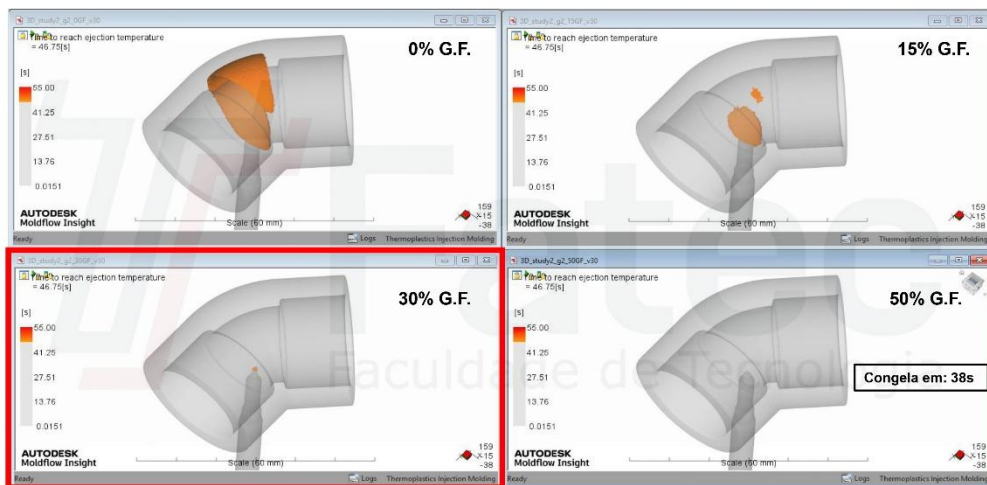
Tempo de congelamento – 38s



Produto com 50% G.F. congela com $\approx 38s$.

Fatec
Mauá

Tempo de congelamento – 47s

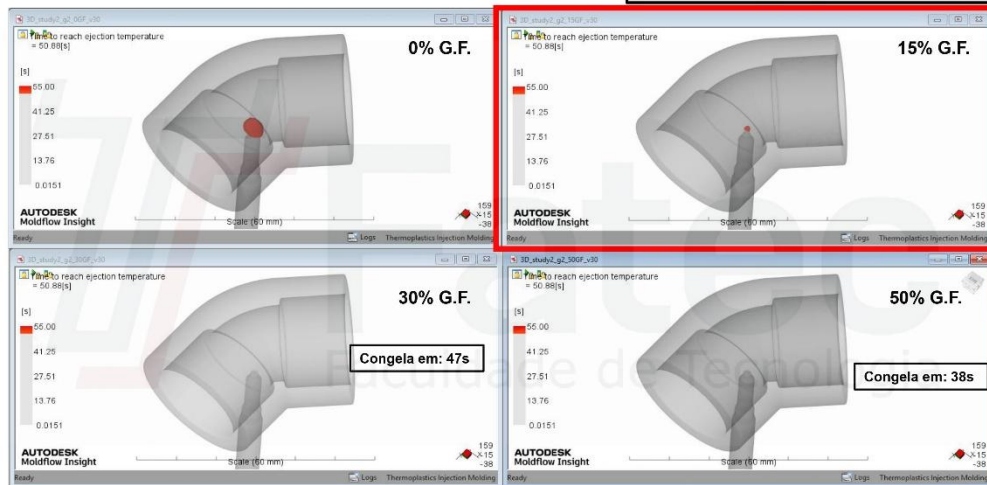


Produto com 30% G.F. congela com $\approx 47s$.

Fatec
Mauá

Tempo de congelamento – 51s

Produto com 15% G.F. congela com $\approx 51s$.



Fatec
Mauá

Tempo de congelamento – 53s

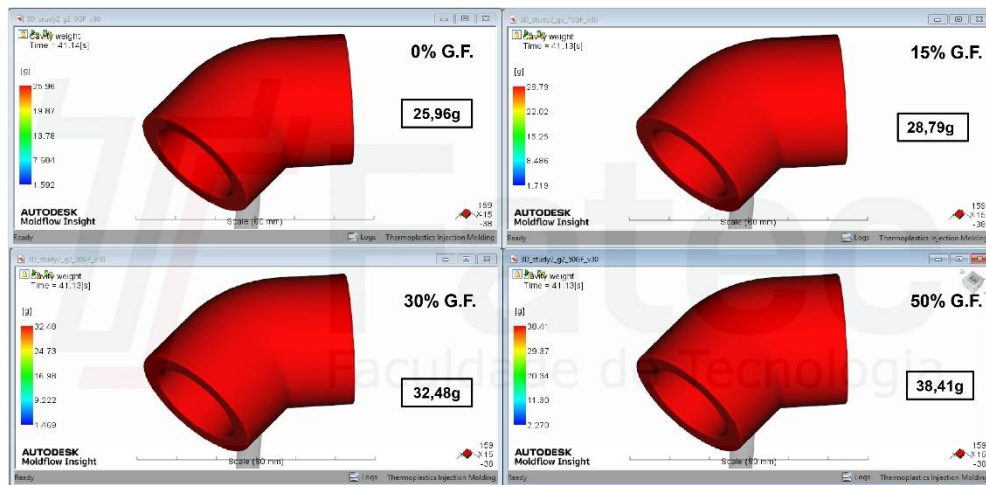
Produto com 0% G.F. congela com $\approx 53s$.



Quanto maior o teor de fibra adicionada à resina PA66, é notável a diferença de tempo para extração do produto, ou seja, pode-se concluir que o tempo de ciclo do material com maior adição de fibra de vidro é menor, mas isso impacta diretamente em maiores valores de pressão e, consequentemente, força de fechamento.

Fatec
Mauá

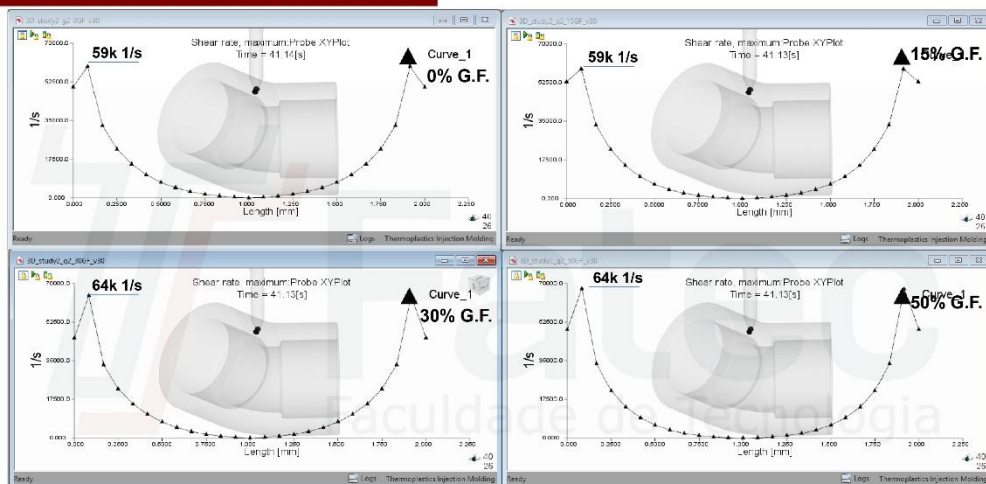
Peso do produto



No estudo comparativo dos datasheets, é possível identificar diferenças de densidade devido à adição de fibra de vidro. É uma resultante simples: quanto maior a % de fibra, maior a densidade; consequentemente, o produto fica mais pesado, como podemos ver nas imagens dos estudos acima.

Fatec
Mauá

Taxa de cisalhamento



Com a vazão padronizada para todos os cenários, é possível comparar a taxa de cisalhamento no ponto de entrada do material na cavidade (gate), os estudos mostram que apesar de manter a velocidade igual, quanto maior a porcentagem de fibra de vidro, maior a taxa de cisalhamento. Cisalhamentos em excessos podem causar diversos danos ao produto, como por exemplo alteração no índice de fluidez, perdas de propriedades mecânicas e marcas de queima no gate.

Fatec
Mauá

Ficha de processo – Comparativo Parametrizado por vazão (30cm³/s)

Variável	Opção 1 (0% GF)	Opção 2 (15% GF)	Opção 3 (30% GF)	Opção 4 (50% GF)
Preenchimento completo (S/N)	S	S	S	S
Tempo de injeção (s) (padronizado)	0,85	0,85	0,85	0,85
Vazão (cm ³ /s) (padronizado)	30	30	30	30
Temperatura de injeção (°C) (padronizado)	285	285	285	285
Pressão máxima (MPa)	25,5	31,4	37,9	54,3
Força de fechamento (Toneladas)	5,4	6,7	7,9	11,2
Tempo de congelamento (s)	50	46	42	35
Peso do produto (g)	25,59	28,37	32,02	36,21

Parâmetro de processo	Valor
Momento da comutação (%) (padronizado)	99
Perfil de recalque (% em relação a pressão máxima) (padronizado)	10s → 80% 10s → 60%
Temperatura de molde (°C) (padronizado)	80

*Padronizado = o mesmo parâmetro utilizado em todas as análises.

Fatec
Mauá



CONCLUSÕES

Fatec
Mauá

Isolando o material puro e comparando com o material de maior teor de reforço (50% G.F.) temos:

Pressão de injeção: 53 a 60% maior na análise com maior percentual de **Fibra de Vidro**.

Força de fechamento: Proporcional a pressão de injeção, 53 a 60% maior.

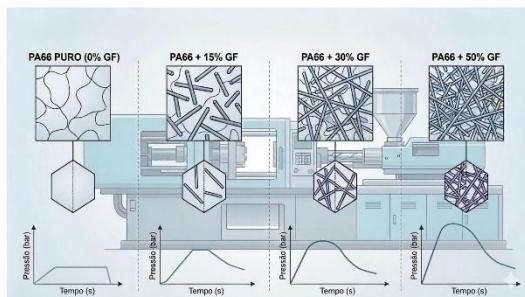
Tempo de congelamento: análise com o material puro necessita de 28 a 30% a mais de tempo comparada a análise com material com 50% G.F.

Peso do produto: Densidade da fibra de vidro é superior ao polímero PA66, com 50% de reforço o produto chega a ficar com 33% mais pesado.

Taxa de cisalhamento: Na região do gate, o material cisalha ligeiramente mais utilizando material com reforço, porém apenas 8%.



Comparação de parâmetros de injeção de PA66 com percentuais progressivos de fibra de vidro (0%, 15%, 30% e 50%) via Molfow.



ANEXO

ANEXO A - 0 G.F. - Ultramid A 218 Y20 Black

Product Information **Ultramid®****A 218 Y20 BLACK**

10/2020

PA66**Product description**

Ultramid® A 218 Y20 is an unreinforced polyamide 66, heat stabilized, self lubricating containing molybdenum disulphide & hybrid anti-wear additives, for injection moulding. This grade offers all of the primary properties of unreinforced polyamide 66 and mainly has excellent surface properties as low coefficient of friction and good resistance to wear.

Injection Notes

The material is supplied in airtight bags, ready for use. In case that the virgin material has absorbed moisture, it must be dried with a dehumidified air drying equipment, dew point mini -20°C. Recommended time 2-4h.

Injection Advice:

- For unfilled polyamides, BASF SE recommends the use of high alloy steel with a low chromium content. For example: X38CrMoV5-1 (EN Norm) - 1.2367 / 1.2343 (DIN Norm). In the case of high requirements on surface quality a mould temperature of up to 120°C can be considered.
- The processing parameters like processing temperatures are a recommendation and can be adjusted in function of injection machine size, part geometry / design.

Disclaimer

The information contained in this document is given in good faith based on our current knowledge. It is only an indication and it is in no way binding. This information must on no account be used as a substitute for necessary prior tests which alone can ensure that a product is suitable for a given use. ANY WARRANTY OF PRODUCT PERFORMANCE, MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE IS EXPRESSLY EXCLUDED. Users are responsible for ensuring compliance with local legislation and for obtaining the necessary certifications and authorizations. Users are requested to check that they are in possession of the latest version of this document, and BASF SE is at their disposal to supply any additional information.

Safety Information

Detailed information regarding safety are available on the safety data sheet (MSDS). MSDS is sent with the first material order or available by contacting our customer services

Regulations Compliance

This product is not intended to be used for the following regulated market: food contact, drinking water, toys, cosmetics or medical devices.

This grade complies with RoHS Directive 2011/65/EU, 2015/863 and local regulations as amended.

Grades produced or imported in Europe comply with REACH directive 1907/2006/EC as amended.

Customer Services

Our customer services are not only concerned with manufacturing and supply of Engineering Plastics products. We are available to assist our customers in finding technical solutions that meet their requirements. Specific support is in particular offered on:

- Material selection
- Material testing
- Parts design advice, training for design engineers
- Part testing
- Design simulation
- Processing through different technologies
- Assembly and post-processing technology expertise
- Parts optimization through Computer Aided Design



BASF SE
67056 Ludwigshafen, Germany

塑料数据专家 www.ponci.com.cn/wxb/ +13538586433 +18816996168



ANEXO B - 15 G.F. - Ultramid A 218 V15 Black 21N

Product Information **Ultramid®**

A 218 V15 BLACK 21N

08/2020

PA66-GF15



Product description

Ultramid® A 218 V15 Black 21N is a polyamide 66, reinforced with 15% of glass fibre, heat stabilized, for injection moulding. This grade offers an excellent combination between thermal and mechanical properties.

Injection Notes

The material is supplied in airtight bags, ready for use. In case that the virgin material has absorbed moisture, it must be dried with a dehumidified air drying equipment, dew point mini -20°C. Recommended time 2-4h

Injection Advice:

- For reinforced polyamides, BASF SE recommends the use of steel with a high content of carbon, and purified for polishing, to avoid or limit the abrasion. For example: X38CrMoV5-1 (EN Norm) - 1.2367 /1.2343 (DIN Norm) or X160CrMoV12 (EN Norm) - 1.2601 /1.2379 (DIN Norm). In the case of high requirements on surface quality a mould temperature of up to 120°C can be considered.
- The processing parameters like processing temperatures are a recommendation and can be adjusted in function of injection machine size, part geometry / design.

Disclaimer

The information contained in this document is given in good faith based on our current knowledge. It is only an indication and it is in no way binding. This information must on no account be used as a substitute for necessary prior tests which alone can ensure that a product is suitable for a given use. ANY WARRANTY OF PRODUCT PERFORMANCE, MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE IS EXPRESSLY EXCLUDED. Users are responsible for ensuring compliance with local legislation and for obtaining the necessary certifications and authorizations. Users are requested to check that they are in possession of the latest version of this document, and BASF SE is at their disposal to supply any additional information.

Safety Information

Detailed information regarding safety are available on the safety data sheet (SDS). SDS is sent with the first material order or available by contacting our customer services

Regulations Compliance

This product is not intended to be used for the following regulated market: food contact, drinking water, toys, cosmetics or medical devices.

This grade complies with ROHS Directive 2011/65/EU and 2015/863 as amended.

Grades produced or imported in Europe comply with REACH directive 1907/2006/EC as amended.

Customer Services

Our customer services are not only concerned with manufacturing and supply of Engineering Plastics products. We are available to assist our customers in finding technical solutions that meet their requirements. Specific support is in particular offered on:

- Material selection
- Material testing
- Parts design advice, training for design engineers
- Part testing
- Design simulation
- Processing through different technologies
- Assembly and post-processing technology expertise
- Parts optimization through Computer Aided Design

ANEXO C - 30 G.F. - Ultramid A 218 V30 Black 34NG

Product Information **Ultramid®**

A 218 V30 BLACK 34NG

08/2020

PA66-GF30



Product description

Ultramid® A 218 V30 Black 34 NG is a polyamide 66, reinforced with 30% of glass fiber, heat stabilized, for injection moulding. This grade has been specially designed to improve its resistance to automotive cooling liquids, increasing lifetime of parts in permanent contact with such liquids.

Injection Notes

The material is supplied in airtight bags, ready for use. In case that the virgin material has absorbed moisture, it must be dried with a dehumidified air drying equipment, dew point mini -20°C. Recommended time 2-4h

Injection Advice:

- For reinforced polyamides, BASF SE recommends the use of steel with a high content of carbon, and purified for polishing, to avoid or limit the abrasion. For example: X38CrMoV5-1 (EN Norm) - 1.2367 /1.2343 (DIN Norm) or X160CrMoV12 (EN Norm) - 1.2601 /1.2379 (DIN Norm). In the case of high requirements on surface quality a mould temperature of up to 120°C can be considered.
- The processing parameters like processing temperatures are a recommendation and can be adjusted in function of injection machine size, part geometry / design.

Disclaimer

The information contained in this document is given in good faith based on our current knowledge. It is only an indication and it is in no way binding. This information must on no account be used as a substitute for necessary prior tests which alone can ensure that a product is suitable for a given use. ANY WARRANTY OF PRODUCT PERFORMANCE, MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE IS EXPRESSLY EXCLUDED. Users are responsible for ensuring compliance with local legislation and for obtaining the necessary certifications and authorizations. Users are requested to check that they are in possession of the latest version of this document, and BASF SE is at their disposal to supply any additional information.

Safety Information

Detailed information regarding safety are available on the safety data sheet (SDS). SDS is sent with the first material order or available by contacting our customer services

Regulations Compliance

This product is not intended to be used for the following regulated market: food contact, drinking water, toys, cosmetics or medical devices.

This grade complies with ROHS Directive 2011/65/EU and 2015/863 as amended.

Grades produced or imported in Europe comply with REACH directive 1907/2006/EC as amended.

Customer Services

Our customer services are not only concerned with manufacturing and supply of Engineering Plastics products. We are available to assist our customers in finding technical solutions that meet their requirements. Specific support is in particular offered on:

- Material selection
- Material testing
- Parts design advice, training for design engineers
- Part testing
- Design simulation
- Processing through different technologies
- Assembly and post-processing technology expertise
- Parts optimization through Computer Aided Design

ANEXO D - 50 G.F. - Ultramid A 218 V50 Black 21N

Product Information **Ultramid®**

A 218 V50 BLACK 21N

08/2020

PA66-GF50



Product description

Ultramid® A 218 V50 Black 21N is a polyamide 66, reinforced with 50% of glass fibre, heat stabilized, for injection moulding. This grade offers an excellent combination between thermal and mechanical properties.

Injection Notes

The material is supplied in airtight bags, ready for use. In case that the virgin material has absorbed moisture, it must be dried with a dehumidified air drying equipment, dew point mini -20°C. Recommended time 2-4h

Injection Advice:

- For reinforced polyamides, BASF SE recommends the use of steel with a high content of carbon, and purified for polishing, to avoid or limit the abrasion. For example: X38CrMoV5-1 (EN Norm) - 1.2367 /1.2343 (DIN Norm) or X160CrMoV12 (EN Norm) - 1.2601 /1.2379 (DIN Norm). In the case of high requirements on surface quality a mould temperature of up to 120°C can be considered.
- The processing parameters like processing temperatures are a recommendation and can be adjusted in function of injection machine size, part geometry / design.

Disclaimer

The information contained in this document is given in good faith based on our current knowledge. It is only an indication and it is in no way binding. This information must on no account be used as a substitute for necessary prior tests which alone can ensure that a product is suitable for a given use. ANY WARRANTY OF PRODUCT PERFORMANCE, MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE IS EXPRESSLY EXCLUDED. Users are responsible for ensuring compliance with local legislation and for obtaining the necessary certifications and authorizations. Users are requested to check that they are in possession of the latest version of this document, and BASF SE is at their disposal to supply any additional information.

Safety Information

Detailed information regarding safety are available on the safety data sheet (SDS). SDS is sent with the first material order or available by contacting our customer services

Regulations Compliance

This product is not intended to be used for the following regulated market: food contact, drinking water, toys, cosmetics or medical devices.

This grade complies with ROHS Directive 2011/65/EU and 2015/863 as amended.

Grades produced or imported in Europe comply with REACH directive 1907/2006/EC as amended.

Customer Services

Our customer services are not only concerned with manufacturing and supply of Engineering Plastics products. We are available to assist our customers in finding technical solutions that meet their requirements. Specific support is in particular offered on:

- Material selection
- Material testing
- Parts design advice, training for design engineers
- Part testing
- Design simulation
- Processing through different technologies
- Assembly and post-processing technology expertise
- Parts optimization through Computer Aided Design