

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DAPHENE MARQUES SOLIS

ANÁLISE DE MOLDE-PROTÓTIPO FABRICADO EM DIGITAL ABS
POR MANUFATURA ADITIVA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(Tcc2 - Nº de Inscrição -17)

CURITIBA

2015

DAPHENE MARQUES SOLIS

ANÁLISE DE MOLDE-PROTÓTIPO FABRICADO EM DIGITAL ABS
POR MANUFATURA ADITIVA

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Neri Volpato, Ph.D.

CURITIBA

2015

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa “Análise de Molde-Protótipo Fabricado em Digital ABS por Manufatura Aditiva”, realizado pela aluna Daphene Marques Solis, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica do Paraná.

Orientador: Prof. Neri Volpato, Ph.D.

UTFPR - DAMEC

Curitiba, 23 de fevereiro de 2015.

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa " Análise de Molde-Protótipo Fabricado em Digital ABS por Manufatura Aditiva", realizado pela aluna Daphene Marques Solis, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Neri Volpato, Ph.D.

UTFPR - DAMEC

Orientador

Prof. Dr. José Aguiomar Foggiatto

UTFPR - DAMEC

Avaliador

Prof. Me. David Kretschek

UTFPR - DAMEC

Avaliador

Curitiba, 23 de fevereiro de 2015.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Eunice, pelo amor incondicional, suporte e incentivo nas horas difíceis. Ao meu namorado Antonio Verguetz que carinhosamente me obrigou a rescrever este trabalho inúmeras vezes, pela paciência e auxílio com a apresentação em cada detalhe, e ainda em me transmitir calma nos momentos difíceis.

Ao meu orientador, Neri Volpato pelas valiosas sugestões, diversas correções e suporte.

A Gustavo Takehara, pela calma, o perfeccionismo nas medições de rugosidade, e o esmero com a ortografia. Ao laboratório de metrologia da UTFPR pela disponibilidade e realização das análises. Ao laboratório de polímero da universidade de Caxias do Sul, em especial Damiani Paludo Budcke, pela realização dos ensaios mecânicos.

A meus amigos, Edson Joly e Bianca Bassetto pelo apoio.

Aos professores José Aguiomar Foggiatto e David Kretscheck pelas sugestões de melhorias.

A todos meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

SOLIS, Daphene Marques. Análise de Molde-Protótipo Fabricado em Digital ABS por Manufatura Aditiva. 2015. 76 f. Monografia (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Os sistemas atuais de produção de moldes-protótipo, específicos para injeção de protótipos e de baixas tiragens de peças, ainda têm custo e tempo de fabricação elevados. Propõe-se nesse trabalho a análise de uma nova tecnologia de produção direta, o ferramental rápido (RT – *rapid tooling*) pela impressão 3D (Polyjet™), e de um novo material (Digital ABS) para fabricação destes moldes. As vantagens deste método são o baixo tempo de produção e custo reduzido em comparação com os processos tradicionais, tais como a usinagem e o RT indireto. O estudo consiste na injeção de corpos de prova normalizados em polipropileno (CP 204 - Braskem) e na caracterização de suas propriedades mecânicas em comparação aos corpos injetados em moldes-protótipo tradicionais, fabricados em alumínio, zamac e aço. Para a análise, executaram-se ensaios de tração, flexão, dureza e impacto. Também analisou-se a rugosidade superficial e a variação dimensional do inserto em Digital ABS para verificar sua integridade. Os resultados demonstram que as peças obtidas pelo inserto em Digital ABS apresentam características mecânicas equivalentes as fabricadas em moldes metálicos. O inserto não apresentou variações dimensionais ou de rugosidade superficial relevantes.

Palavras-chave: Injeção. Molde. Digital ABS. Polyjet.

ABSTRACT

SOLIS, Daphene Marques. Analysis of prototype-tool manufactured in Digital ABS by additive manufacturing. 2015. 76 f. Monograph (Mechanical Engineering) - Academic Department of Mechanics, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2015.

The actual prototype-mould production systems, specific for prototype injection and low edition of parts, still has high cost and time of fabrication. It is proposed in this paper the analysis of a new direct production technology, the rapid tooling (RT) by 3D printer (Polyjet™) and a new material (Digital ABS) for mould manufacture. This method advantages are the low time production, low cost in comparison with the traditional production ways, such as machining and indirect RT. This paper consists at the injection of specimens in polypropylene (CP 204- Braskem) and in the characterization of its mechanicals properties in comparison with the traditional prototype-mould, manufactured in aluminium, zamak and steel. For it were ran tensile, bending, hardness and impact tests. Also was analysed the superficial roughness and dimensional measurement of the Digital ABS insert for verify its integrity. The result show that the samples obtained by the Digital ABS insert present equivalent mechanical characteristics of the manufactured metallic molds. The insert showed no dimensional or relevant surface roughness variations.

Keywords: Injection. Prototype-mould. Digital ABS. Polyjet.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Peça e modelo STL.....	21
Figura 2.2 – Esquema do processo de SL	22
Figura 2.3 – Diferenças de parâmetros entre moldes metálicos e de SL	23
Figura 2.4 – Esquema do processo FDM.....	24
Figura 2.5 – Esquema do processo Polyjet.....	25
Figura 2.6 – Demanda mundial dos termoplásticos mais utilizados	27
Figura 2.7 – Configurações PP (a) isotático (b) sindotático e (c) atático	29
Figura 3.1 – Fluxograma	30
Figura 3.2 – Corpo de prova de tração.....	31
Figura 3.3 - Corpo de prova de flexão.....	32
Figura 3.4 – Inseto metálico (a) Digital ABS (b)	32
Figura 3.5 – Banho criostático.....	33
Figura 3.6 – Canais de refrigeração	33
Figura 3.7 – Medição da temperatura do inserto.....	33
Figura 3.8 - Injetora Haitian HTF58-X	35
Figura 3.9 – Diferenciação dos CPs.....	36
Figura 3.10 - Câmera Climática Superohm CC 302H/010	37
Figura 3.11 – Máquina para ensaio de impacto RESIL 25	38
Figura 3.12 – Região das medições de dureza	38
Figura 3.13 – Posicionamento para medição de rugosidade	39
Figura 3.14 – Regiões de medição da rugosidade	39
Figura 3.15 – Fixação do inserto	40
Figura 4.1 – Regiões de medição.....	43
Figura 4.2 – Rugosidade da cavidade de tração em estado de fornecimento.....	57

Figura 4.3 – Representação 3D da rugosidade da cavidade de tração em estado de fornecimento	59
Figura 4.4 - Rugosidade da cavidade de tração após 25 ciclos	59
Figura 4.5 - Representação 3D da rugosidade da cavidade de tração após 25 ciclos	61
Figura 4.6 - Rugosidade da cavidade de tração após 50 ciclos	61
Figura 4.7 - Representação 3D da rugosidade da cavidade de tração após 50 ciclos	63
Figura 4.8 – Distribuições Sku.....	64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Variação do comprimento dos CPs de tração.....	42
Gráfico 4.2 – Variação do comprimento dos CPs de flexão	42
Gráfico 4.3 – Variação da largura dos CPs de tração	42
Gráfico 4.4 – Variação da largura dos CPs de flexão.....	42
Gráfico 4.5 – Variação da espessura dos CPs de tração.....	43
Gráfico 4.6 – Variação da espessura dos CPs de flexão	43
Gráfico 4.7 – Curvas das médias de tração	50
Gráfico 4.8 – Curvas médias de flexão	53
Gráfico 4.9 - Perfil 2D transversal estado de fornecimento em $x = 0,20$ mm	58
Gráfico 4.10 – Perfil 2D transversal estado de fornecimento em $x = 1,80$ mm.....	58
Gráfico 4.11 – Perfil 2D transversal estado de fornecimento em $x = 3,60$ mm.....	58
Gráfico 4.12 - Perfil 2D transversal após 25 ciclos em $x = 0,20$ mm	60
Gráfico 4.13 - Perfil 2D transversal após 25 ciclos em $x = 1,80$ mm	60
Gráfico 4.14 – Perfil 2D transversal após 25 ciclos em $x = 3,60$ mm	60
Gráfico 4.15 - Perfil 2D transversal após 50 ciclos em $x = 0,20$ mm	62
Gráfico 4.16 - Perfil 2D transversal após 50 ciclos em $x = 1,80$ mm	62
Gráfico 4.17 - Perfil 2D transversal após 50 ciclos em $x = 3,60$ mm	62
Gráfico 4.18 – Comparação da rugosidade entre estado de fornecimento, após 25 ciclos e após 50 ciclos.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Condutividade térmica dos materiais empregados.....	34
Tabela 3.2 – Parâmetros para injeção	34
Tabela 4.1 - Dimensões dos CPs (mm)	41
Tabela 4.2 – Dimensões das cavidades em estado de fornecimento	44
Tabela 4.3 – Dimensões das cavidades após 25 ciclos	45
Tabela 4.4 – Dimensões das cavidades após 50 ciclos	46
Tabela 4.5 – Comparativo dimensional	47
Tabela 4.6 - Ensaio de tração para CPs injetados em Aço 1045	48
Tabela 4.7 - Ensaio de tração para CPs injetados em Alumínio 7075	48
Tabela 4.8 - Ensaio de tração para CPs injetados em Zamac 8	49
Tabela 4.9 - Ensaio de tração para CPs injetados em Digital ABS	49
Tabela 4.10 – Comparação entre os valores médios obtidos para ensaio de tração	50
Tabela 4.11 – Ensaio de flexão para CPs injetados em Aço 1045.....	51
Tabela 4.12 - Ensaio de flexão para CPs injetados em Alumínio 7075.....	51
Tabela 4.13 - Ensaio de flexão para CPs injetados em Zamac 8.....	51
Tabela 4.14 - Ensaio de flexão para CPs injetados em Digital ABS.....	52
Tabela 4.15 – Comparação das médias de flexão	52
Tabela 4.16 - Ensaio de dureza	54
Tabela 4.17 - Ensaio de impacto para CPs injetados em Aço 1045.....	55
Tabela 4.18 - Ensaio de impacto para CPs injetados em Alumínio 7075.....	55
Tabela 4.19 - Ensaio de impacto para CPs injetados em Zamac 8.....	56
Tabela 4.20- Ensaio de impacto para CPs injetados em Digital ABS.....	56
Tabela 4.21 – Comparativo das médias de impacto	57
Tabela 4.22 – Parâmetros de rugosidade	64

LISTA DE SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AM	Manufatura Aditiva (<i>Additive Manufacturing</i>)
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CP	Corpo de Prova
EPM	Borracha de Etileno Propileno
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição (<i>Fused Deposition Modeling</i>)
HDPE	Polietileno de Alta Densidade (<i>High-Density Polyethylene</i>)
LDPE	Polietileno de Baixa Densidade (<i>Low-Density Polyethylene</i>)
LDPE	Polietileno Linear de Baixa Densidade (<i>Linear Low-Density Polyethylene</i>)
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PET	Politereftalato de etileno
POM	Poliacetal
PP	Polipropileno
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produtos
PPP	Proposta de Projeto de Pesquisa
PVC	Policloreto de Vinila
PS	Poliestireno
RT	Ferramental Rápido (<i>Rapid Tooling</i>)
STL	<i>StereoLithograpy</i>
SL	Estereolitografia
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD	Projeto Auxiliado por Computador (<i>Computer Aided Design</i>)
CV	Coeficiente de Variação
DP	Desvio padrão
UV	Ultravioleta

LISTA DE ACRÔNIMOS

NUFER	Núcleo de Prototipagem e Ferramental
-------	--------------------------------------

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Contexto do Tema.....	15
1.2	Caracterização do Problema.....	17
1.3	Objetivos.....	18
1.4	Justificativa.....	18
1.5	Organização do trabalho.....	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	Materiais para moldes-protótipo.....	20
2.2	Processos de manufatura aditiva para ferramental rápido.....	21
2.2.1	Estereolitografia (SL).....	22
2.2.2	Modelagem por Fusão e Deposição (Fused Deposition Modeling - FDM).....	23
2.2.3	PolyJet™.....	24
2.3	Moldes poliméricos.....	26
2.4	Polipropileno (PP).....	27
2.5	Influência do material do inserto no moldado.....	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1	Fluxograma experimental.....	30
3.2	Geometria dos Corpos de Prova e dos Insertos de injeção.....	31
3.3	Parâmetros de injeção.....	34
3.4	Processo de Injeção.....	35
3.5	Ensaio.....	36
3.6	Rugosidade.....	38
3.7	Dimensional.....	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1	Dimensional.....	41
4.2	Ensaio.....	48
4.2.1	Tração.....	48
4.2.2	Flexão.....	50
4.2.3	Dureza.....	54
4.2.4	Impacto.....	54
4.3	Rugosidade das cavidades de Digital ABS.....	57
5	CONCLUSÕES.....	66
	REFERÊNCIAS.....	67
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DE TRAÇÃO.....	70
	APÊNDICE B – GRÁFICOS DE FLEXÃO.....	72
	ANEXO A – POLIPROPILENO CP 204.....	74
	ANEXO B – MÉTODO SHORT SHOT.....	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema

O sucesso de uma empresa está ligado a sua competência em entender e realizar os desejos de seus clientes, para isto a fabricação de protótipos atua como elo entre os setores envolvidos (CARVALHO; VOLPATO, 2007).

Os protótipos são importantes para identificar possíveis falhas de projeto e evitar que estas se propaguem para a produção final, acarretando prejuízos com retrabalho, desperdício, danos à imagem da empresa, perda de confiança do fabricante e até mesmo severas medidas legais (VOLPATO *et al.*, 2007).

A principal função de um protótipo, (do grego *proto* = primeiro, *typus* = tipo), é sanar ao máximo as dúvidas durante o processo de desenvolvimento de um produto (PDP), integrando o conhecimento de clientes, equipe de produção e projetos.

Hoje em dia, grande parte dos produtos que consumimos são de plástico: carcaça de celulares, interior de automóveis, brinquedos, armação de óculos, canetas e muitos mais. Uma das principais formas de produção destes produtos é por injeção de plástico.

Atualmente os veículos possuem cerca de 15% de seu peso em produtos de plásticos injetados ou termoformados, o que proporciona uma acentuada redução de peso que se reflete na economia de consumo de combustível. Além disso, a questão ambiental tem sido cada vez mais interiorizada pelas empresas, que tendem a produzir o interior de seus veículos com 100% de polipropileno (PP) injetado, o que facilita o posterior processo de reciclagem (AZEVEDO, 2014).

O processo de injeção de plástico representa atualmente mais de 30% da produção de peças de plástico no Brasil. Algumas vantagens que justificam o extenso uso do processo de injeção são: boa precisão dimensional, possibilidade de gerar peças com geometrias complexas, elevadas características funcionais das peças fabricadas, alta produtividade e o baixo custo de produção (DOW CHEMICAL COMPANY, 2014).

Sandvik (2000) salienta que o maior custo do processo de fabricação por injeção é a obtenção do molde, sendo que 65% de seu valor corresponde a usinagem das cavidades, 20% se refere a matéria-prima e 15% demais custos. O valor de um molde de injeção varia com o seu material, tamanho, geometria, modo de extração, quantidades de peças obtidas por ciclo de injeção, existência de canais de resfriamento, existência de gavetas, entre outros.

No caso da fabricação de protótipos ou baixas tiragens de peças, o molde utilizado passa a ser chamado de molde-protótipo. Para que seja viável este tipo de molde possui vida útil menor em relação a um molde de produção, e deve ter custo e tempo de fabricação inferiores aos moldes tradicionais.

Os moldes-protótipo servem à fabricação de protótipos funcionais, que são protótipos de um produto como um todo ou de um componente, em escala real e operacional do produto. Os protótipos funcionais são obtidos pelo mesmo processo e material empregado na produção final, sendo utilizados para testes funcionais ou de engenharia (VOLPATO *et al.*, 2007).

A fabricação de moldes-protótipo para injeção atua na eliminação de erros de medição, erros do operador, erros dos instrumentos e auxilia na implantação de melhorias para os moldes de produção.

Atualmente os moldes-protótipo são produzidos por usinagem em máquinas operantes com comando numérico computadorizado (CNC) ou convencional, utilizando como matéria-prima resinas poliméricas (a base de epóxi ou poliuretano) ou alumínio. Estes materiais são empregados por apresentar vantagens sobre os demais nos quesitos tempo de fabricação e custo (CARVALHO *et al.*, 2007).

Novos estudos vêm buscando minimizar ainda mais os tempos e custos de fabricação de protótipos funcionais, para isso tem-se trabalhado na integração de dois processos: a manufatura aditiva (AM - *additive manufacturing*), também conhecida como impressão 3D, e a injeção de plástico. A AM pode ser definida como um processo de fabricação através da adição de material em forma de camadas planas sucessivas. A possibilidade de integrar estes processos na fabricação de moldes-protótipo permite a fabricação com tempos menores e isenta a

injeção de seu maior obstáculo, que é a exigência de elevadas tiragens (AHRENS *et al.*, 2003).

1.2 Caracterização do Problema

Atualmente o alumínio é tido como uma opção de matéria prima para produção de moldes-protótipo. Este possui fácil usinabilidade, o que representa diminuição nos tempos de fabricação.

Os moldes em zamac (uma liga de zinco com 8% de alumínio) são incomuns, e apresentam como vantagem a melhor usinabilidade, permitindo redução de 34% no tempo de obtenção do molde em relação a um molde feito em aço, e um custo de matéria-prima inferior ao do aço na ordem de 1 para 2,5 (GRYZINSKI, 2011).

O processo mais utilizado para obtenção de moldes metálicos é a usinagem. Alguns custos inerentes a este processo são: matéria-prima, hora máquina, software de programação CNC (CAM), mão de obra, lubrificantes, fluido refrigerante e ferramentas, que devem ser específicas para o material trabalhado.

Somando todos estes custos de produção o processo de usinagem pode se tornar inviável para produção de moldes-protótipo, uma vez que estes moldes gerarão baixas quantidades de peças e não amortizarão os custos de produção.

Outra opção é a fabricação de moldes-protótipo por vazamento de resinas sobre um modelo positivo, o chamado: ferramental rápido indireto. Neste processo o material mais empregado é o compósito de alumínio com epóxi. Uma limitação deste processo é que a cura do epóxi é uma reação exotérmica, e nem sempre é possível “moldar” adequadamente o modelo. Com isso é necessário utilizar um modelo resistente, e sua fabricação recai nos processos de usinagem (AHRENS *et al.*, 2007).

Neste sentido, pode-se afirmar que existe a necessidade de obtenção de moldes-protótipo por um processo capaz de facilitar e baratear sua fabricação mantendo as propriedades da peça final.

1.3 Objetivos

Analisar o comportamento do molde-protótipo fabricado em Digital ABS por impressão 3D (Polyjet™) e as propriedades do moldado em PP, comparando-as aos obtidos na injeção em moldes-protótipo convencionais.

Como objetivos específicos:

- Avaliar a injeção de PP em insertos de Digital ABS em comparação a outros materiais de moldes-protótipo (alumínio 7075, zamac 8 e aço 1045);
- Comparar as propriedades mecânicas das peças injetadas por meio de ensaios de tração, flexão, dureza e impacto;
- Analisar o desgaste do molde de Digital ABS por meio de análises de rugosidade e dimensional.

1.4 Justificativa

A produção de moldes-protótipo diretamente pela AM diminui fontes de erros por ser um processo de única etapa. O tempo e o custo de produção são reduzidos pela simplificação do processo. Além disso, geometrias complexas impossíveis de serem fabricadas pelo processo de usinagem se tornam simples, quando construídas por adição de camadas.

A produção de molde-protótipo feito em Digital ABS pelo processo de AM permitirá a ampliação do uso do processo de injeção de plástico na fabricação de protótipos pela diminuição de custos, tempos de fabricação e melhora das propriedades dimensionais.

Por meio dos ensaios mecânicos, se identificará a possibilidade de utilizar o molde em Digital ABS para fabricação de protótipos funcionais, e com isso agilizar o PDP.

A realização deste trabalho abrirá um leque de possibilidades para agilizar o processo de desenvolvimento de produtos injetados.

1.5 Organização do trabalho

Este documento é dividido em cinco capítulos:

Capítulo 1 - Introdução: se refere à introdução à área do conhecimento e contexto do trabalho. São apresentados os problemas inerentes do processo de injeção relacionado a moldes-protótipo, exposta a justificativa para buscar solucioná-los e os objetivos a serem alcançados para sua execução.

Capítulo 2 – Fundamentação teórica: revisa o conhecimento acerca de materiais que compõe moldes-protótipo e aborda os processos de manufatura aditiva já utilizados na fabricação destes.

Capítulo 3 – Materiais e métodos: aborda os métodos utilizados na obtenção e ensaios dos Corpos de Provas e os demais materiais a serem empregados para realização deste trabalho, tais como: a injetora de plástico e máquinas de medição.

Capítulo 4 – Resultados e discussões: resultados obtidos.

Capítulo 5 – Conclusões: são descritas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Materiais para moldes-protótipo

O aço é atualmente um dos materiais mais utilizado na fabricação de moldes para injeção. Mesmo sendo um material de custo elevado, que exige um processamento (usinagem) caro, é um material robusto que fornece uma longa vida ao molde, uma característica importante quando se tem uma tiragem elevada (GRYZINSKI, 2011).

Os tipos de aço utilizados variam ainda com a necessidade de tiragem, o tipo de polímero a ser injetado (clorado ou não clorado), a necessidade de texturização, entre outros aspectos (VILLARES METAIS, 2013).

Gryzinski (2011) estudou a viabilidade de se utilizar zamac 8 para fabricação de moldes-protótipo, por ser um produto comercial, de fácil acesso, visando a redução de custos, onde comparativamente ao molde de aço houve uma redução do tempo de produção em 34% e redução de 71% na aquisição de matéria-prima.

Outro material amplamente empregado para injeções em baixa tiragem e protótipos é o alumínio, ele possui melhor usinabilidade, maior condutividade térmica e menor massa específica comparada ao aço. Estes fatores geram aumento de produtividade e redução nos tempos de usinagem e conseqüentemente ganhos na redução de custos. Sua desvantagem é o elevado custo de aquisição do material (ARAÚJO *et al.*, 2010).

O Digital ABS por sua vez é uma combinação de RGD515 e RGD535 (materiais produzidos pela Stratasys Ltd.) que tem em sua composição: monômero acrílico, oligômero de uretano, monômero de metacrilato, acrilato de isobornilo, acrilato, acrilato de epóxi e fotoiniciador. Este material foi desenvolvido para simular plásticos ABS combinando resistência a alta temperatura e dureza (STRATASYS LTD, 2014 a).

Este material é indicado para fabricação de protótipos funcionais, moldes, compartimento para peças elétricas e peças de encaixe para utilização em baixas e altas temperaturas (STRATASYS LTD, 2014 a).

2.2 Processos de manufatura aditiva para ferramental rápido

O ferramental rápido (RT – do inglês *rapid tooling*) consiste da obtenção de moldes através da tecnologia de AM, que se baseia no empilhamento em camadas subsequentes do material (líquido, sólido ou pó) que geram o produto final. Esta se contrapõe em relação a manufatura subtrativa, que a partir de uma matéria-prima (tarugo, bloco ou pré-forma) é retirado material até a obtenção do produto final.

O RT pode ainda ser dividido em direto ou indireto. No processo direto, fabrica-se os insertos dos moldes diretamente pelo processo de AM. No indireto, por sua vez, fabrica-se um modelo com o qual, por meio de processos secundários, é fabricado o inserto final (NAGAHANUMAIA *et al.*, 2007).

O surgimento da AM aconteceu no final dos anos 80, porém, segundo Wohlers (2004), até o ano de 2003 havia pouco mais de onze mil máquinas instaladas em todo o mundo. Houve uma grande expansão nos últimos anos, e atualmente a AM já é um processo mais difundido.

Para gerar um protótipo por AM, em todos os processos é necessário um modelo CAD 3D (projeto auxiliado por computador, do inglês *computer aided design*) que deverá ser transformado em um modelo STL (*STereoLithography*), inteiramente feito por triângulos, como mostra a Figura 2.1.

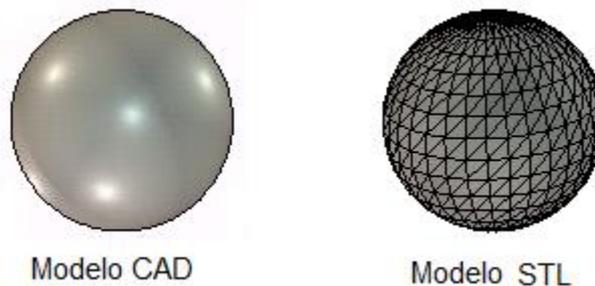


Figura 2.1 – Peça e modelo STL

Fonte: <http://www.key3d.com/information/create-stl/>

O modelo STL é transferido para o programa de planejamento de processo da máquina em que se deseja criar o protótipo, que irá fatiar o modelo em camadas que

serão impressas sequencialmente, sempre adicionando material acima da camada anterior até a finalização do protótipo.

2.2.1 Estereolitografia (SL)

A estereolitografia (SL) foi o primeiro processo de AM disponível comercialmente, apresentado em 1988. Este processo é baseado na cura de uma resina polimérica por meio de um feixe de laser.

O processo começa com uma cuba de resina polimérica líquida fotocurável e uma mesa de elevação posicionada na superfície da resina. O computador controla um conjunto de espelhos que direciona o foco do laser sobre a resina que cura e solidifica, gerando uma camada 2D referente a base da peça. A mesa desce e uma nova camada de resina líquida cobre a parte já solidificada. O processo se repete até completar todas as camadas. A Figura 2.2 mostra esquematicamente o processo SL.

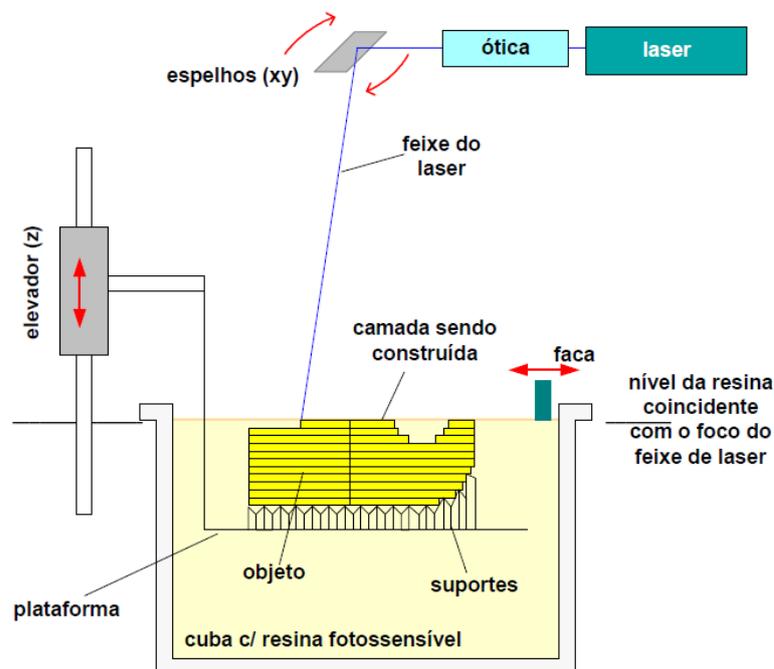


Figura 2.2 – Esquema do processo de SL
Fonte: Ahrens, 2003.

Ahrens (2003) produziu moldes para injeção pelo processo de SL e, segundo ele, uma importante diferença entre os moldes convencionais e os fabricados por SL

é a condutividade térmica dos materiais empregados. Esta diferença na taxa de resfriamento do volume mássico moldado durante o ciclo de injeção deve ser compensada com a alteração dos parâmetros do processo de injeção, tais como temperaturas, pressões e velocidades.

A Figura 2.3 apresenta a variação de parâmetros identificada por Ahrens (2003) entre moldes metálicos e os fabricados por SL. O autor concluiu com seu estudo que as propriedades mecânicas dos corpos injetados são afetadas pelo tempo de resfriamento. Tempos maiores de resfriamento geram peças mais frágeis, e menores tempos de resfriamento geram peças capazes de sofrer maiores deformações.

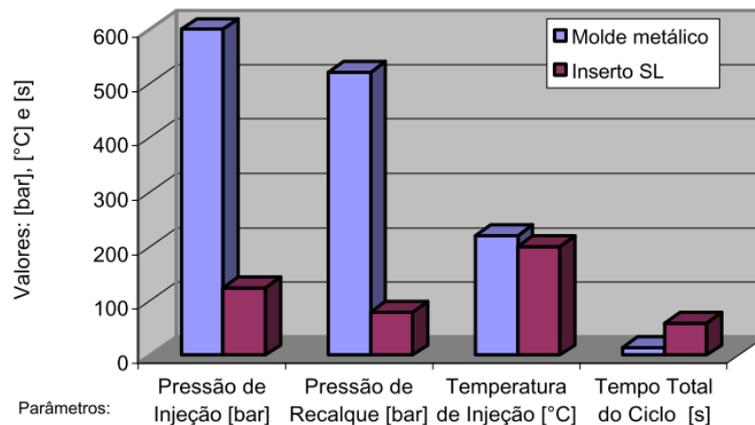


Figura 2.3 – Diferenças de parâmetros entre moldes metálicos e de SL

Fonte: Ahrens, 2003.

2.2.2 Modelagem por Fusão e Deposição (Fused Deposition Modeling - FDM)

Diferentemente do processo SL, o processo FDM se utiliza de filamentos sólidos ao invés de materiais líquidos.

O processo FDM combina a ação de uma plataforma que se desloca verticalmente com o movimento do cabeçote extrusor que se movimenta no plano horizontal. O cabeçote traça o perímetro da seção transversal e o preenche construindo assim o modelo camada a camada até que a peça seja finalizada (FOGGIATTO, 2005).

Para partes suspensas, a máquina se utiliza de um bico extrusor específico que constrói camadas de suporte que podem ser removidas manualmente ou quimicamente. A Figura 2.4 mostra esquematicamente o processo.

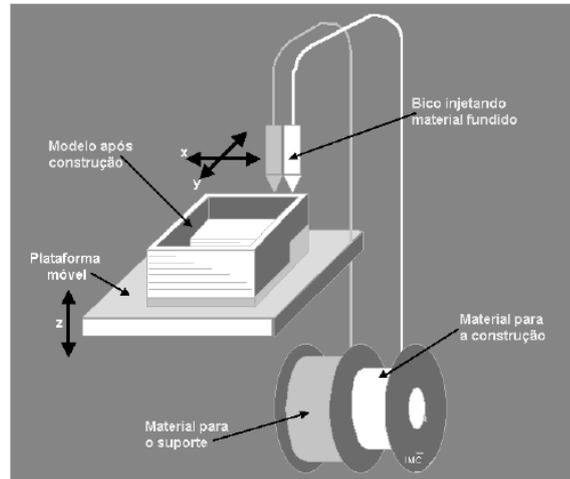


Figura 2.4 – Esquema do processo FDM

Fonte: Foggiatto, 2005.

Foggiatto (2005) desenvolveu moldes produzidos por FDM em ABS, onde constatou que há a possibilidade de injetar pequenos lotes de peças em polipropileno, e que as propriedades mecânicas das peças injetadas são similares às injetadas em moldes metálicos.

2.2.3 PolyJet™

A empresa Objet introduziu sua tecnologia original PolyJet™ no início de 2000. Em 2012 a empresa Stratasys, que também atuava no ramo de maquinário para AM adquiriu a Objet, tornando-se assim a maior empresa de AM do mundo (STRATASYS LTD., 2012 b).

A tecnologia PolyJet™ é capaz de gerar protótipos com alta resolução fora de um ambiente fabril em um processo semelhante à impressão de um documento a jato de tinta. Porém, ao invés de jatear gotas de tinta sobre o papel, as impressoras 3D PolyJet™ jateiam camadas ultra finas de 16µm ou 32µm de um fotopolímero

líquido sobre uma bandeja de montagem, onde elas são curadas instantaneamente por luz ultravioleta (UV) (STRATASYS LTD, 2014 c).

As opções de espessura de camada afetam na qualidade das peças. As camadas de 16 μ m geram peças com uma qualidade melhor, enquanto a espessura de 32 μ m torna o processo mais rápido.

A cabeça de impressão se move apenas no plano horizontal (eixos x-y) e cada camada de construção da peça é uma seção transversal organizada pelo programa de planejamento de processo da máquina. Terminada uma camada a plataforma de construção desce para receber a próxima camada. O deslocamento em z é correspondente à altura de uma camada.

Para partes suspensas a impressora utiliza um material de suporte que dará sustentação para as camadas de material subsequentes que também é curado por exposição da luz UV. Depois de curado, este suporte pode ser removido a mão ou com jato de água. Um esquema do processo é apresentado na Figura 2.5.

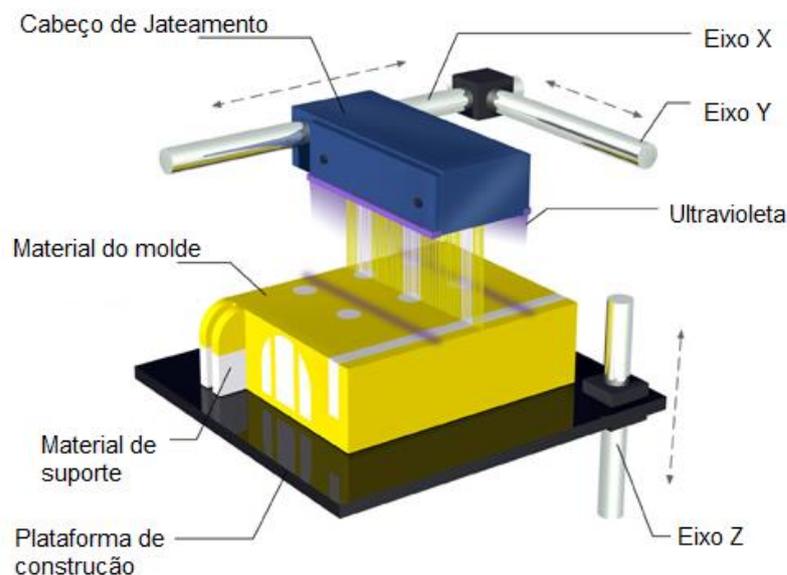


Figura 2.5 – Esquema do processo Polyjet

Fonte: Objet, 2012.

A empresa Whale que também trabalha na área de fabricação de moldes conseguiu com a tecnologia Polyjet™ reduzir riscos e reengenharia, diminuindo tempos de produção de moldes-protótipo em 97%. Em moldes de Digital ABS foi

injetado PP para protótipos automotivos e aeroespaciais. Tradicionalmente, o tempo de fabricação de moldes metálicos era de 4 a 5 semanas, além de altos custos de produção, na casa das dezenas de milhares de dólares, com a nova tecnologia este tempo diminuiu para menos de 24 horas e apenas uma fração dos custos (STRATASYS LTD, 2014 d).

2.3 Moldes poliméricos

No processo de injeção é importante que ocorra uma troca de calor eficiente, que garanta um resfriamento uniforme na peça. O resfriamento inicia-se no instante em que o termoplástico tem contato com as paredes da cavidade e sua principal forma de transferência de calor é por condução (SALMORIA *et al.*, 2008).

Quando se utiliza moldes não metálicos (como os em Digital ABS) a transferência de calor é mais lenta devido à baixa condutividade térmica deste material, e por isso devem-se empregar velocidades de injeção e pressões (de injeção e recalque) menores, comparado a um molde metálico, uma vez que isto diminui o risco do material fundido solidificar antes da peça estar totalmente preenchida (ABREU, 2012).

Cada polímero tem uma faixa de temperatura na qual pode ser injetado. A menor temperatura que pode ser utilizada é a qual o material está completamente fluido e homogeneizado, e a temperatura mais elevada é a em que ele mantém suas propriedades sem degradar. No caso dos moldes poliméricos, recomenda-se utilizar a menor temperatura possível, uma vez que a condutividade térmica do molde é baixa.

Mateus *et al.* (2007) cita que resinas são as melhores opções para moldes de injeção de pequenas tiragens, fundamentalmente por duas razões:

- 1 – Estes materiais são adequados para manufatura aditiva utilizando processos diretos e indiretos para redução dos tempos de fabricação;
- 2 – O baixo custo dos materiais não metálicos.

Outra vantagem relatada por Zonder e Sella (2014) é a redução dos tempos de fabricação que nos moldes poliméricos são de algumas horas contra dias ou semanas nos moldes tradicionais.

No caso de retrabalho no inserto, nos moldes poliméricos, em especial os fabricados por AM, a correção pode ser feita em minutos com custos mínimos, enquanto que em moldes metálicos correções são demoradas e geralmente não geram bons resultados, como marcas nas peças finais.

2.4 Polipropileno (PP)

Apesar de ser o mais jovem dos termoplásticos, o PP é atualmente o termoplástico mais utilizado no mundo (PETRY, 2011). Em 2002 sua produção mundial era de 40 milhões de toneladas, 15% de todo plástico produzido. No Brasil ele representa 23% da produção em termoplásticos (LIMA, 2011).

A Figura 2.6 apresenta graficamente a demanda mundial dos termoplásticos mais utilizados. Sendo polietileno de baixa densidade (LDPE - *low-density polyethylene*), polietileno linear de baixa densidade (LLDPE - *linear low-density polyethylene*), polietileno de alta densidade (LDPE - *high-density polyethylene*), policloreto de polivinila (PVC) e poliestireno (PS).

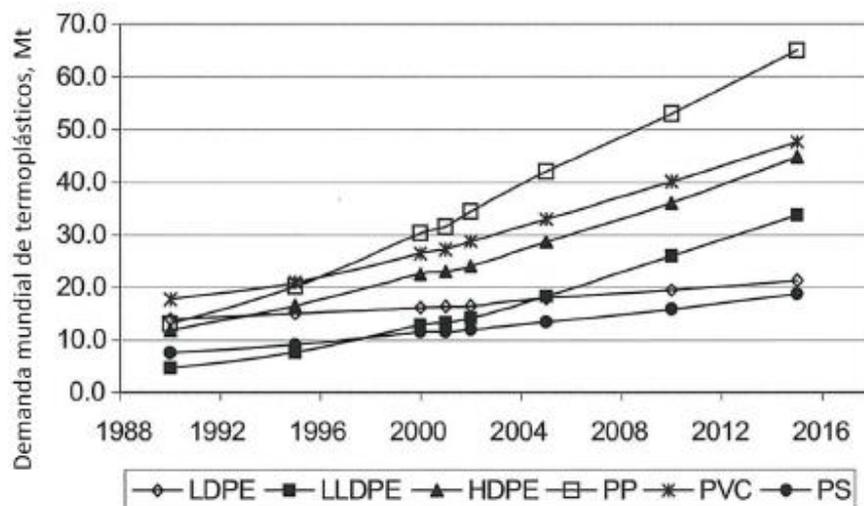


Figura 2.6 – Demanda mundial dos termoplásticos mais utilizados
Fonte: Petry, 2011.

Termoplásticos são aqueles polímeros que sob efeito de elevadas temperaturas fundem e podem ser moldados, para que quando resfriados adquiram a forma do molde. Este ciclo pode ser refeito diversas vezes, porém pode haver perda das propriedades do material. Por exemplo, o politereftalato de etileno (PET), que é também um termoplástico e pode ser reciclado, quando empregado na indústria alimentícia o material deve ser novo.

Antes de 1954 o PP existia apenas com baixa massa molar e sem propriedades comercialmente interessantes. Com os estudos de Giulio Natta em 1954 o PP passou a apresentar propriedades que o tornaram um termoplástico bastante versátil (BULHÕES, 2011).

O PP é obtido através da polimerização do propeno, que é um subproduto do refino do petróleo.

O PP pode ser homopolímero, onde há apenas propileno como monômero, ou copolímero onde são inseridos diferentes monômeros. Sendo que os copolímeros do PP podem ser: randômicos ou heterofásicos. O randômico consiste em um copolímero de propileno com pequenas quantidades de comonômeros, normalmente etileno, inseridos aleatoriamente ao longo da cadeia de PP. Estes são usados quando há a necessidade de melhora nas propriedades óticas ou necessidade de redução da temperatura de fusão (BULHÕES, 2011).

Na outra forma de copolímero do PP, os heterofásicos, as matrizes de PP contendo até 20% de comonômero, normalmente etileno, adicionado nas fases finais do processo de polimerização criam uma fase borrachosa de etileno-propileno (EPR). Esta fase se separa dentro da matriz de homopolímero de PP. Este formato lhe fornece propriedades como melhor balanço rigidez/impacto quando comparado a sua forma homopolímero e, portanto, mais indicado para injeção de plástico.

Por ser um polímero semicristalino e com cadeias moleculares lineares, no processo de resfriamento forma-se uma estrutura regular, mas por não ser perfeita surgem também regiões amorfas. Esta característica semicristalina leva a contração da peça final na faixa de 1,5% a 1,9% (REIS, 2009).

O PP se apresenta em 3 diferentes estéreoisomerias. Isotático quando os grupos CH₃ encontram-se sempre na mesma posição, sindotáticos quando há

posicionamento alternado do grupo metila e pôr fim a configuração atático quando os radicais são posicionados de forma aleatória ao longo da cadeia polimérica (REIS, 2009). A Figura 2.7 apresenta esquematicamente as 3 configurações do PP.

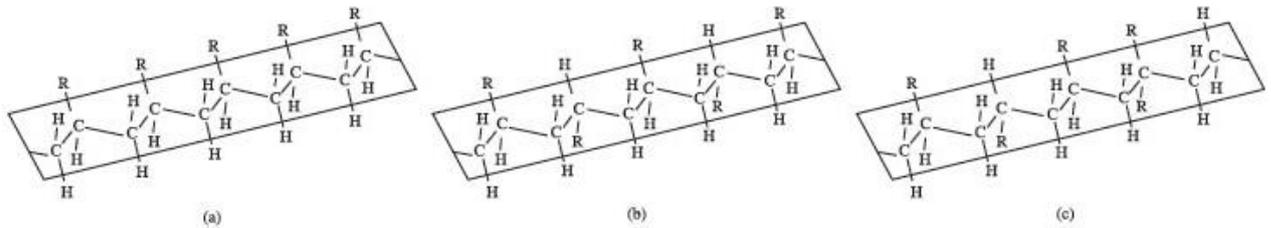


Figura 2.7 – Configurações PP (a) isotático (b) sindotático e (c) atático
Fonte: Rosário; Pachekoski; Silveira; et al, 2014.

As diferentes configurações estéreo-isomerias geram variação em fatores como ponto de fusão, que no isotático é de 176°C, no sindotático 135°C, aproximadamente 25% menor, e no atático, que por ser amorfo, apresenta apenas temperatura de transição vítrea (ROSÁRIO *et al.*, 2011).

2.5 Influência do material do inserto no moldado

Vários autores citam que a escolha do material de fabricação do inserto influi diretamente nas propriedades da peça final.

Segundo Mateus *et al.* (2007), as diferenças nas propriedades do moldado se deve à condutividade térmica dos materiais utilizados na fabricação do inserto, o que acaba por influenciar a cristalinidade da peça final.

Gryzinski (2011) comparou o limite de resistência à tração entre corpos de prova (CPs) injetados em PP copolímero, em molde de zamac 8 e em aço 1045 e observou uma variação de 8%. Valor próximo aos 6% encontrado por Baretta *et al.* (2006), o qual utilizou um molde em aço P20 e outro em zamac 5 para a injeção das amostras em PP homopolímero.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Fluxograma experimental

A Figura 3.1 apresenta o fluxograma das análises que foram realizadas neste trabalho.

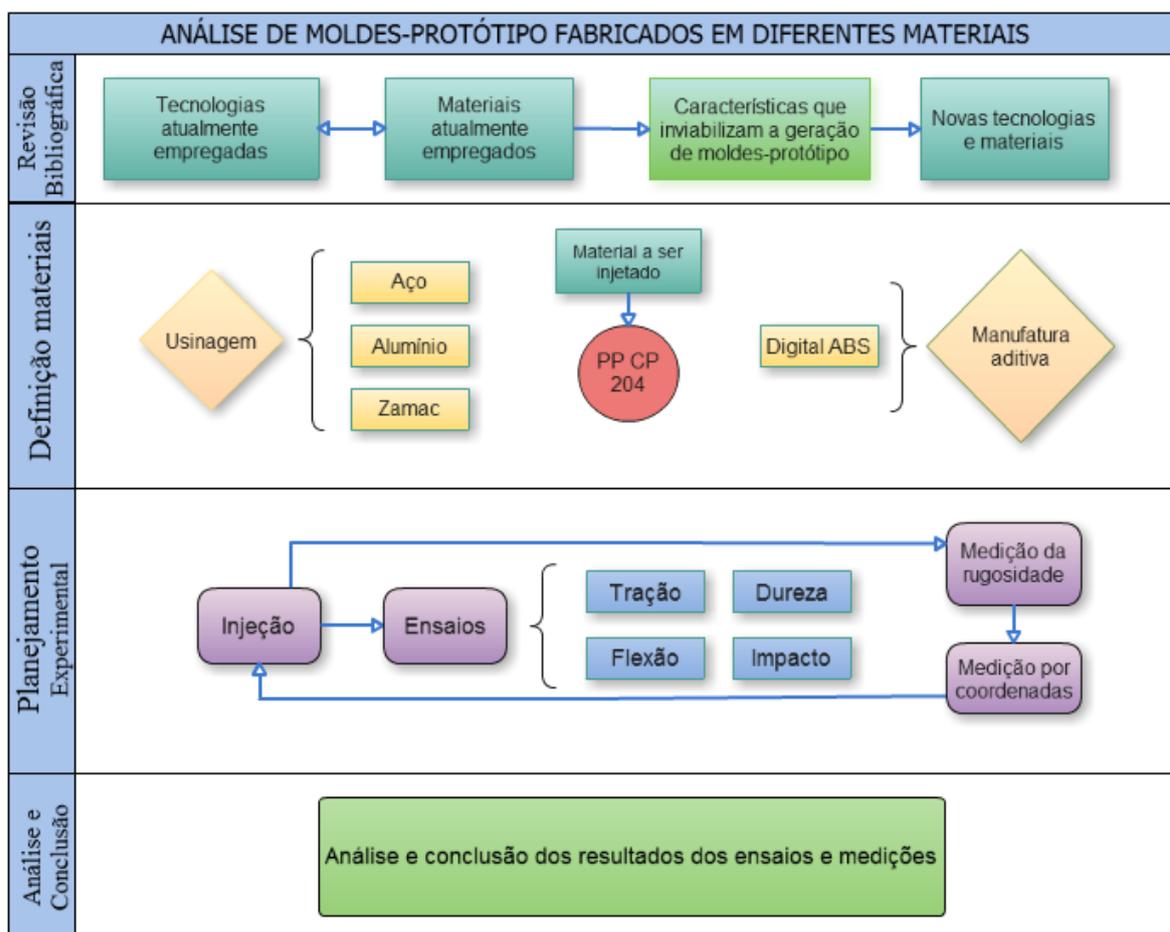


Figura 3.1 – Fluxograma

Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica para identificar as tecnologias e materiais atualmente empregados e quais características viabilizam seu uso. Com base nisto, buscou-se processos que pudessem ser empregados e também suprissem necessidades não atendidas pelos materiais e tecnologias tradicionais.

Tendo definido os materiais dos moldes-protótipo a serem testados, estipularam-se ensaios para identificar as propriedades que cada material de inserto

acarretaria no moldado. Além de identificar como o inserto fabricado em Digital ABS (foco principal do trabalho) se comportaria com o ciclo de injeções.

As diferentes características de cada material de inserto: condutividade térmica, dureza, entre outros, exigiram que se aplicassem parâmetros de injeção específicos para cada material.

Callister (2012) cita como propriedades mecânicas importantes para o projeto: rigidez, resistência, dureza, ductilidade e tenacidade. Sendo imperativo que haja consistência na maneira como são conduzidos os testes e interpretados seus resultados. A consistência será obtida com o emprego de técnicas de ensaio padronizadas, realizados em laboratório credenciado, utilizando as normas ASTM.

O desgaste do inserto em Digital ABS será analisado por medições de rugosidade e dimensional das cavidades antes, após 25 ciclos e após 50 ciclos.

3.2 Geometria dos Corpos de Prova e dos Insertos de injeção

Foram utilizados apenas dois modelos de CPs, os de tração tipo IV (norma ASTM D638) que serão utilizados também para o ensaio de dureza, e os de flexão (norma ASTM D790), que serão também utilizados para o ensaio de impacto. Os corpos de prova são representados na Figura 3.2 e Figura 3.3.

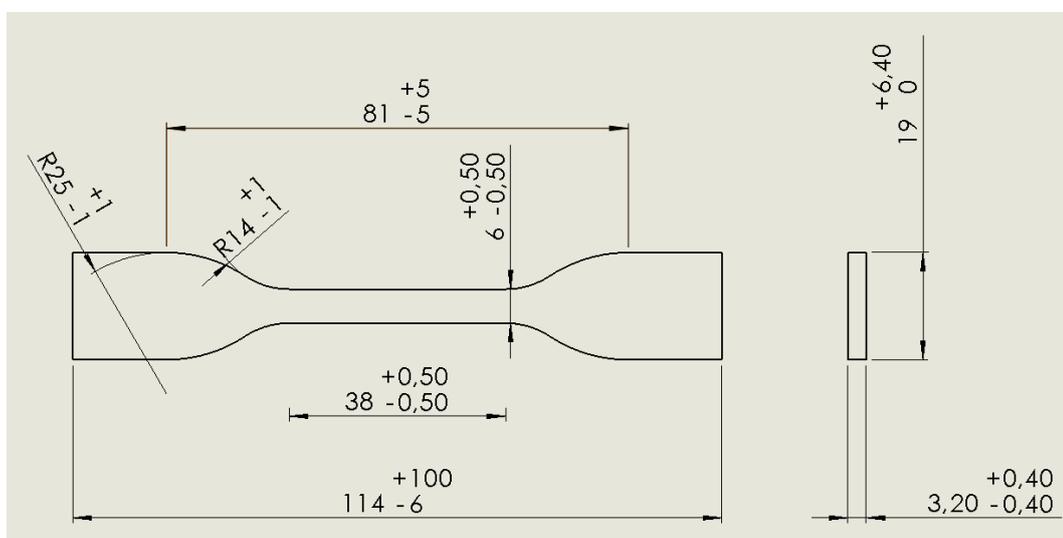


Figura 3.2 – Corpo de prova de tração

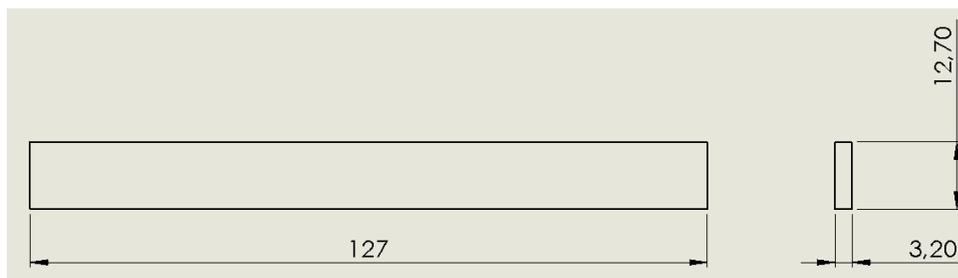


Figura 3.3 - Corpo de prova de flexão

Os materiais de molde-protótipo utilizados foram o aço 1045, o alumínio 7075, o zamac 8 e o Digital ABS. Os insertos metálicos já haviam sido utilizados em outros estudos e foram disponibilizados pelo Núcleo de Prototipagem e Ferramental (NUFER).

O inserto de Digital ABS foi fabricado pela empresa Stratasys em um projeto de cooperação com o NUFER e também foi disponibilizado para este estudo.

O inserto metálico (alumínio) e o inserto em Digital ABS são mostrados na Figura 3.4.

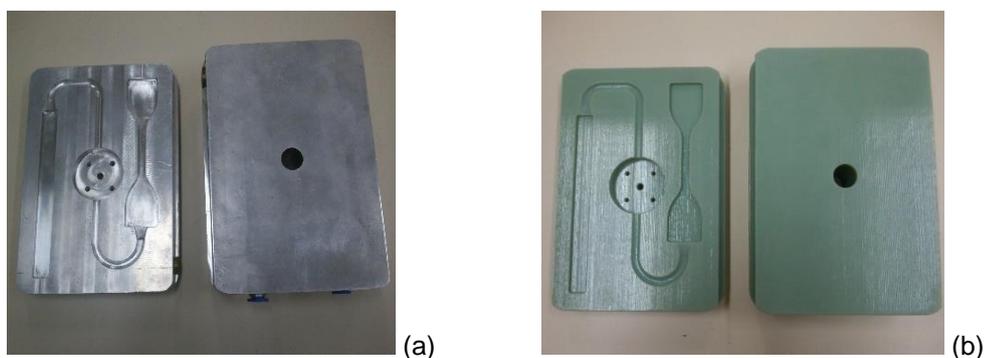


Figura 3.4 – Inserto metálico (a) Digital ABS (b)

Os insertos foram montados em um porta-molde já existente no NUFER. Os insertos metálicos foram refrigerados por meio de um banho criostático modelo MQBMP-01 fabricado pela empresa Microquímica Equipamentos Ltda, mostrado na Figura 3.5. Este equipamento mantém água circulando pelos canais de refrigeração do inserto, mostrados na Figura 3.6, de forma a manter o inserto na temperatura desejada.



Figura 3.5 – Banho criostático

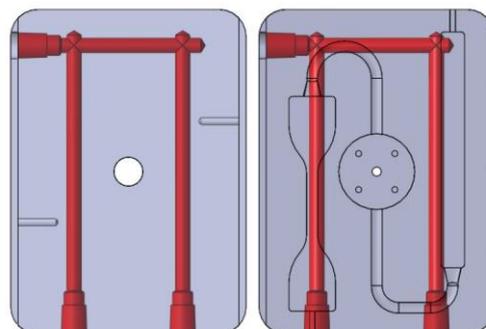


Figura 3.6 – Canais de refrigeração

Não foi possível realizar refrigeração no molde de Digital ABS, pois seu projeto não previu a instalação de banho criostático, equipamento adquirido após a fabricação deste inserto. Com isso, foi utilizado ar comprimido para arrefecimento do molde e sua temperatura foi aferida com o uso de uma pistola termômetro, da marca Lee Tools, com resolução de 1°C. A emissividade do Digital ABS foi aproximada em 0,9 pela ausência de dados específicos a respeito do material.

As medições de temperatura foram realizadas na entrada de fluxo no CP de tração, região vista como crítica, em que a temperatura do inserto após a injeção possui valor superior ao da média. A leitura da temperatura foi obtida com a pistola termômetro posicionada normal ao inserto para garantir a precisão da medição, conforme a Figura 3.7.



Figura 3.7 – Medição da temperatura do inserto

3.3 Parâmetros de injeção

Os parâmetros foram definidos pelo “Método do Preenchimento Incompleto” também conhecido como “*short shot method*” (BARRY *et al.*, 1995) detalhado no Anexo B.

Os valores tiveram de ser adequados a cada material de inserto, influenciados pela condutividade térmica dos materiais, apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Condutividade térmica dos materiais empregados

Material	Alumínio 7075	Zamac 8	Aço 1045	Digital ABS
Condutividade térmica (W/mK)	205,0	114,7	52,9	0,17-0,19

Os parâmetros de injeção não foram definidos de forma a ter elevada produtividade, e sim manterem-se os mais próximos possíveis entre si e desgastarem ao mínimo os insertos (baixas pressões, velocidades e temperatura do fundido). Isto acarretou tempos maiores de injeção, recalque e resfriamento.

Os parâmetros empregados para injeção em cada um dos insertos são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros para injeção

	Aço 1045	Alumínio 7075	Zamac 8	Digital ABS
Temperatura da injeção (°C)	200	200	200	190
Temperatura do inserto (°C)	30	30	30	30
Pressão de injeção (bar)	34	35	36	18
Velocidade de injeção (mm/s)	14	15	16	10
Pressão de recalque (bar)	25	25	22	21
Pressão de fechamento (bar)	100	80	65	32
Tempo de injeção (s)	13	13	10	20
Tempo de recalque (s)	13	13	7	32
Tempo de resfriamento (s)	10	10	10	40
Tempo total ciclo (s)	36	36	27	96

A temperatura aproximada do moldado logo após a injeção no inserto de Digital ABS é de 50°C e requereu aproximadamente 7,5 min para estabilizar em 30°C (+0,5 – 2,2°C). Isto representa um ciclo com cerca de 10 minutos de duração com o inserto de Digital ABS, enquanto que nos moldes metálicos, por possuírem refrigeração e dissiparem mais calor, permitiu utilizar ciclo mais rápido, aproximadamente 1 minuto.

Fez-se necessário 5 ciclos para definição dos parâmetros de injeção, portanto, foram realizados 50 ciclos e obtiveram-se 45 CPs.

3.4 Processo de Injeção

A escolha do material a ser processado levou em conta sua importância para o setor industrial, temperatura de processamento, índice de fluidez, e disponibilidade na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Com isso, escolheu-se o PP CP 204 (Anexo A) – fabricado pela empresa Braskem, um copolímero heterofásico em blocos, com amplo uso industrial no setor de injeção, com viscosidade de 22g/10 min (método ASTM D 1238).

A injetora empregada para este trabalho foi a Haitian HTF58-X horizontal, apresentada na Figura 3.8, disponível no NUFER da UTFPR.



Figura 3.8 - Injetora Haitian HTF58-X

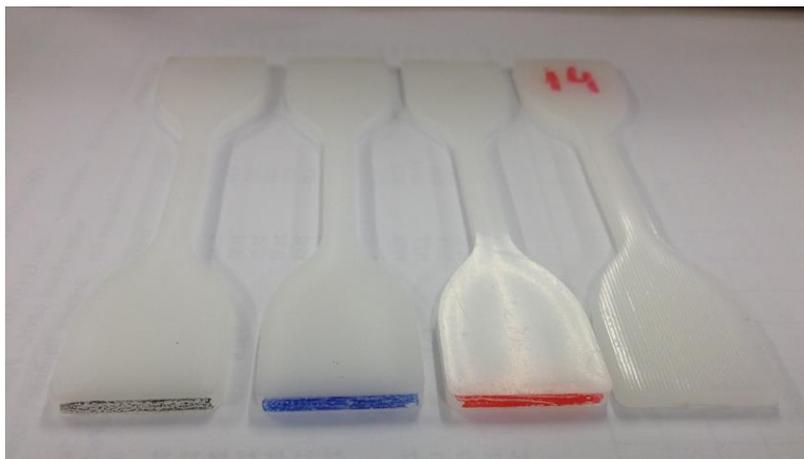


Figura 3.9 – Diferenciação dos CPs

Após injetados os CPs receberam diferenciação por cores, Figura 3.9, para evitar que fossem confundidos. Os com a ponta azul foram injetados em aço, preto alumínio, vermelho zamac e os injetados em Digital ABS foram enumerados.

3.5 Ensaios

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Polímeros da Universidade de Caxias do Sul em um projeto de cooperação em andamento entre os laboratórios (Laboratório de Polímeros da Universidade de Caxias do Sul e o NUFER).

Antes da realização dos ensaios, as amostras foram climatizadas em uma câmara climática Superohm CC 302H/010, apresentada na Figura 3.10, até que a temperatura e umidade das amostras fossem as mesmas do laboratório de polímeros (23°C e 51% de umidade relativa).

Os CPs foram testados para tração em uma máquina Emic DL3000 equipada com uma célula de carga de 2000N. A velocidade inicial determinada pela norma ASTM D638 é de 5mm/min. Caso não haja o rompimento entre 30 segundos a 5 minutos a velocidade deve ser aumentada para 50mm/min. No caso deste estudo a velocidade empregada foi 50 mm/min.



Figura 3.10 - Câmera Climática Superohm CC 302H/010

Para os ensaios de flexão, seguindo a norma ASTM D790, empregou-se a mesma máquina do ensaio de tração, equipada com uma célula de carga de 1000N. Por serem peças termoplásticas utilizou-se o procedimento A, definido pela norma que fixa a taxa de deformação em 0,01mm/mm/min em um ensaio com 3 pontos e 5% de deformação.

O espaçamento entre os apoios foi de 16 vezes a espessura dos CPs e a velocidade foi determinada pela Equação 3.1:

$$R = ZL^2/6d \quad (3.1)$$

onde: R=velocidade (mm/min), Z=taxa de deformação (mm/mm/min), L=comprimento entre os apoios (mm) e d=espessura do CP (mm).

A análise de impacto foi realizada em um equipamento RESIL 25, Figura 3.11, usando um martelo de 1J e entalhe tipo Izod A (dimensão A de 10,20mm, o raio de 0,25mm e ângulo de 45°), de acordo com a norma ASTM D256.

A dureza Shore D (ASTM D2240) foi obtida com um durômetro Mainard M702, na região de maior área das amostras de tração, como mostra a Figura 3.12.

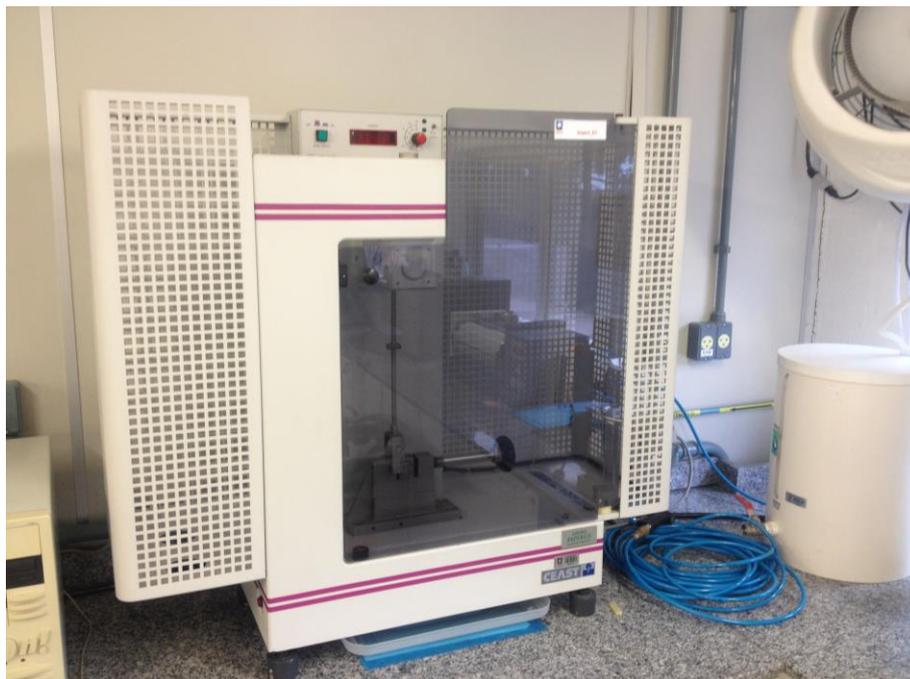


Figura 3.11 – Máquina para ensaio de impacto RESIL 25



Figura 3.12 – Região das medições de dureza

Foram ensaiados 5 CPs para tração, 5 para flexão, 10 para impacto, e foram retiradas 10 medições de dureza de um único CP, para cada material de inserto. Estes 21 corpos de prova foram escolhidos aleatoriamente dentro de um universo de 90 CPs, 45 de tração e 45 de flexão.

3.6 Rugosidade

Para medição da rugosidade superficial das cavidades do inserto em Digital ABS utilizou-se um interferômetro óptico 3D sem contato (Taylor Hobson, CCI Lite). O inserto foi posicionado na extremidade esquerda inferior da mesa do rugosímetro, conforme a Figura 3.13.

Este posicionamento foi determinado para que os pontos medidos antes, após 25 ciclos e após 50 ciclos de injeção fossem os mesmos. Pelo software de controle da máquina a mesa foi posicionada em $x = 80 \text{ mm}$ e $y = 80 \text{ mm}$ com foco em $19,08 \text{ mm}$.

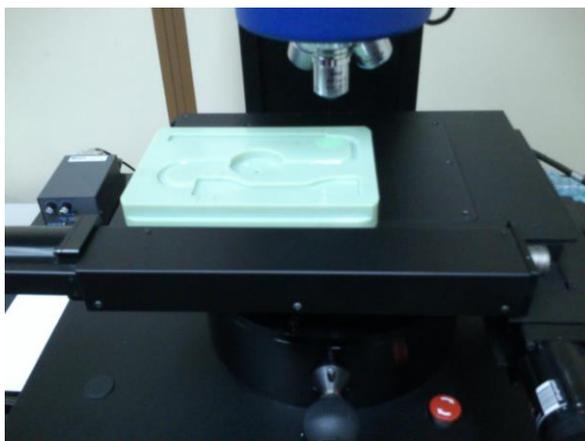


Figura 3.13 – Posicionamento para medição de rugosidade

As regiões avaliadas são na entrada do fluxo de material, como mostra a Figura 3.14.

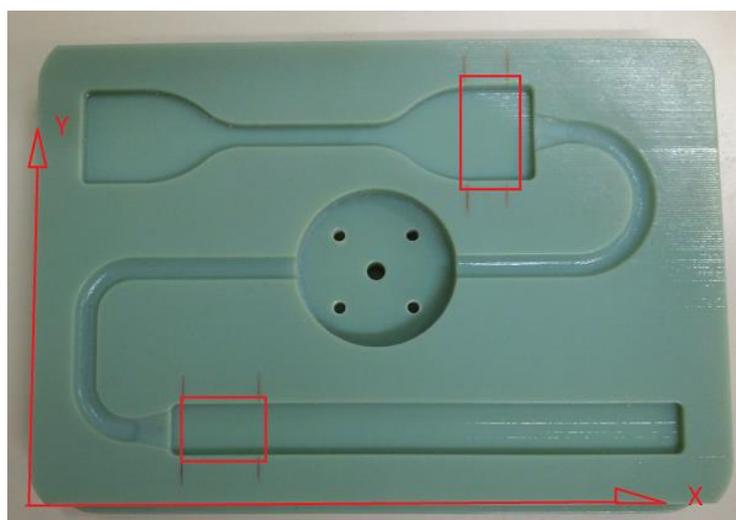


Figura 3.14 – Regiões de medição da rugosidade

3.7 Dimensional

Realizou-se a medição dimensional dos CPs injetados em Digital ABS com um paquímetro digital Mitutoyo com resolução 0,01mm.

Realizou-se também a medição dimensional das cavidades do inserto de Digital ABS com a máquina de medição por coordenadas CMM Zeiss, UM550, disponibilizada pelo laboratório de Metrologia da UTFPR, em estado de fornecimento, após 25 ciclos e após 50 ciclos de injeção.

Para iniciar a medição dimensional das cavidades, configurou-se a máquina de acordo com o apalpador utilizado, uma esfera em rubi com 3 mm de diâmetro.

O inserto com as cavidades foi preso a mesa com um grampo, como mostra a Figura 3.15. O plano de referência para medição foi definido em relação a superfície do inserto e sua lateral esquerda. Realizaram-se 3 medidas em cada eixo de cada cavidade.

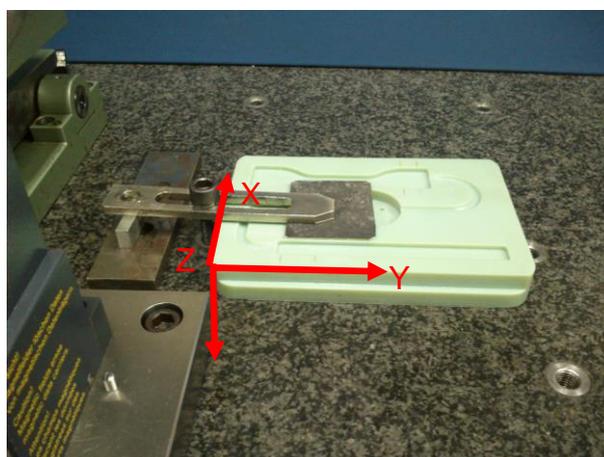


Figura 3.15 – Fixação do inserto

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Dimensional

Os resultados das medições dimensionais dos CPs são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Dimensões dos CPs (mm)

CP	Tração			Flexão		
	Comprimento	Largura	Espessura	Comprimento	Largura	Espessura
1	118,02	6,36	3,56	129,45	13,22	3,31
2	117,75	6,37	3,54	129,35	13,18	3,31
3	118,02	6,38	3,56	129,66	13,21	3,33
4	117,98	6,38	3,59	129,85	13,27	3,35
5	117,99	6,36	3,61	129,71	13,25	3,35
6	118,07	6,39	3,61	129,56	13,28	3,36
7	118,10	6,40	3,64	129,39	13,31	3,39
8	118,12	6,40	3,65	130,00	13,30	3,38
9	117,92	6,37	3,62	129,38	13,28	3,36
10	118,13	6,39	3,61	129,48	13,27	3,35
11	117,94	6,35	3,59	129,99	13,23	3,33
12	118,02	6,36	3,60	129,70	13,25	3,35
13	117,93	6,38	3,60	129,49	13,24	3,35
14	118,29	6,36	3,60	129,49	13,26	3,35
15	117,93	6,37	3,62	129,31	13,25	3,35
16	117,91	6,39	3,63	129,41	13,29	3,38
17	118,20	6,38	3,61	129,40	13,26	3,36
18	117,98	6,37	3,62	129,60	13,26	3,36
19	118,07	6,39	3,63	129,40	13,26	3,37
20	118,18	6,39	3,63	129,58	13,26	3,38
21	117,93	6,38	3,63	129,44	13,27	3,37
22	118,08	6,40	3,64	129,47	13,31	3,40
23	117,95	6,42	3,67	129,64	13,28	3,40
24	118,26	6,39	3,66	129,55	13,29	3,39
25	118,02	6,44	3,68	129,58	13,32	3,40
26	118,08	6,44	3,68	129,41	13,33	3,41
27	117,99	6,42	3,66	129,63	13,35	3,38
28	118,13	6,43	3,67	129,80	13,31	3,40
29	118,17	6,44	3,69	129,85	13,33	3,43
30	117,98	6,42	3,68	129,75	13,32	3,40
31	117,88	6,41	3,68	129,49	13,23	3,34
32	117,90	6,42	3,68	129,36	13,25	3,35
33	118,06	6,43	3,71	129,42	13,25	3,35
34	118,18	6,44	3,75	129,60	13,27	3,37
35	118,07	6,44	3,75	129,46	13,29	3,38
36	118,11	6,45	3,75	129,54	13,28	3,37
37	118,02	6,42	3,75	129,80	13,25	3,36
38	118,29	6,41	3,76	129,41	13,25	3,38
39	118,15	6,45	3,73	129,70	13,23	3,34
40	118,23	6,44	3,75	129,77	13,27	3,33
41	118,13	6,43	3,74	130,00	13,21	3,34
42	118,07	6,46	3,77	129,72	13,26	3,35
43	118,10	6,44	3,76	129,43	13,26	3,36
44	118,18	6,47	3,79	129,59	13,26	3,35
45	118,14	6,50	3,86	129,63	13,33	3,45

O desvio padrão no CP de tração foi de 0,12 para o comprimento, 0,03 para largura e 0,07 na espessura. No CP de flexão os desvios padrão foram de 0,18; 0,04; 0,03 no comprimento, largura e espessura respectivamente.

Os Gráficos 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam o comportamento dimensional dos CPs no decorrer dos ciclos de injeção. A linha tracejada nos gráficos é a linha de tendência das medições realizadas.

A tendência de crescimento das dimensões do CP reflete uma deformação permanente nos insertos com o aumento do número de ciclos de injeção.

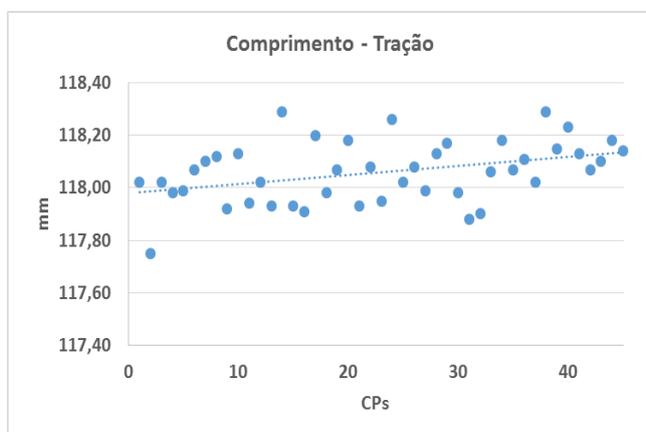


Gráfico 4.1 – Variação do comprimento dos CPs de tração

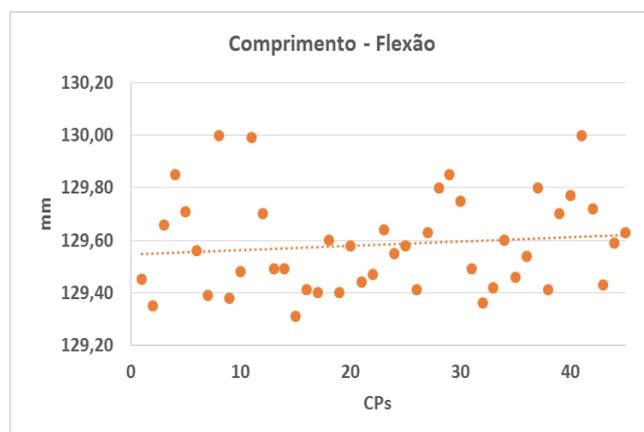


Gráfico 4.2 – Variação do comprimento dos CPs de flexão

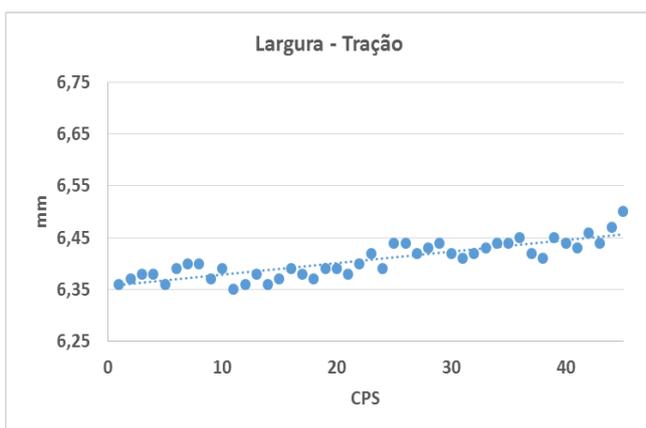


Gráfico 4.3 – Variação da largura dos CPs de tração

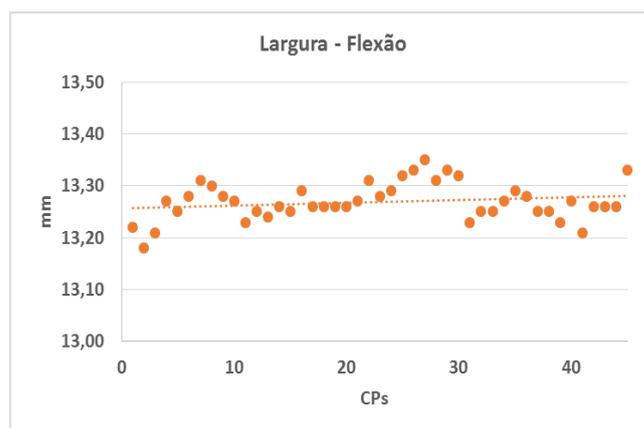


Gráfico 4.4 – Variação da largura dos CPs de flexão

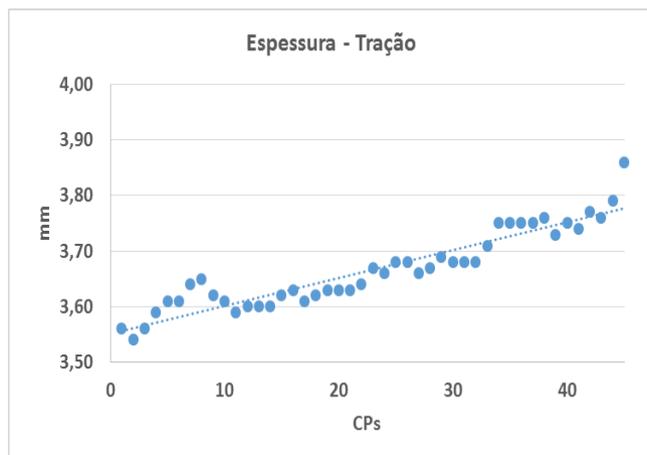


Gráfico 4.5 – Variação da espessura dos CPs de tração

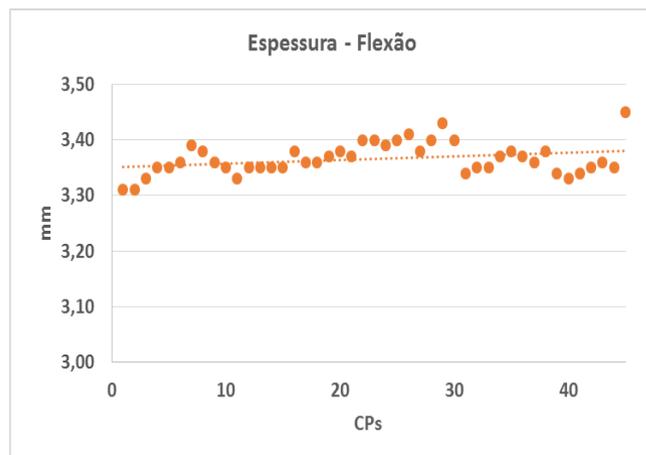


Gráfico 4.6 – Variação da espessura dos CPs de flexão

As medições dimensionais das cavidades do inserto em Digital ABS foram realizadas nos 3 eixos em três regiões, na entrada do fluxo (E), no centro do CP (C) e na extremidade do CP (S), como apresentado na Figura 4.1. Os resultados são apresentados na Tabela 4.2. Onde o desvio padrão foi abreviado para DP.

As dimensões iniciais das cavidades do inserto são maiores que as dimensões do CPs por considerar a contração do material durante o seu resfriamento.

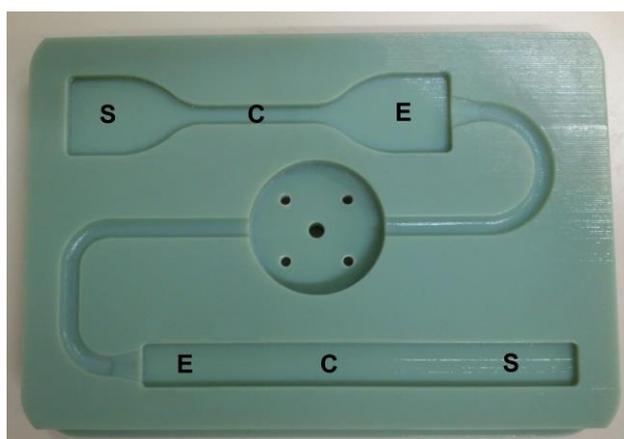


Figura 4.1 – Regiões de medição

Tabela 4.2 – Dimensões das cavidades em estado de fornecimento

Cavidade	Região	Dimensão (mm)			Média	DP	
Tração	Largura	C	6,0683			6,071	0,002
		C	6,0730				
		C	6,0716				
	Comprimento	E	119,3378			119,324	0,012
		C	119,3249				
		S	119,3084				
	Espessura	E	3,6232	3,6105	3,6100	3,604	0,030
		C	3,6161	3,6397	3,6398		
		S	3,5629	3,5602	3,5695		
Flexão	Largura	E	13,0228			13,029	0,008
		C	13,0237				
		S	13,0401				
	Comprimento	E	131,0289			131,004	0,020
		C	131,0021				
		S	130,9802				
	Espessura	E	3,3442	3,3404	3,3372	3,374	0,028
		C	3,4045	3,4148	3,4046		
		S	3,3783	3,3725	3,3716		

Após 25 ciclos de injeção as dimensões das cavidades foram medidas novamente, os resultados são apresentados na Tabela 4.3.

Foram realizados mais 25 ciclos de injeção, resultando em um total de 50 injeções.

Após 50 injeções as cavidades do inserto foram medidas novamente para determinar as dimensões finais, apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 – Dimensões das cavidades após 25 ciclos

Cavidade	Região	Dimensão (mm)			Média	DP	
Tração	Largura	C	6,1171			6,144	0,028
		C	6,1334				
		C	6,1819				
	Comprimento	E	119,3257			119,349	0,066
		C	119,4386				
		S	119,2821				
	Espessura	E	3,5829	3,6010	3,6102	3,584	0,092
		C	3,7240	3,6943	3,6305		
		S	3,5060	3,4689	3,4361		
Flexão	Largura	E	13,0188			13,039	0,023
		C	13,0709				
		S	13,0275				
	Comprimento	E	130,9661			131,010	0,039
		C	131,0609				
		S	131,0041				
	Espessura	E	3,3327	3,2812	3,3333	3,355	0,043
		C	3,4366	3,3736	3,3968		
		S	3,3333	3,3724	3,3348		

Tabela 4.4 – Dimensões das cavidades após 50 ciclos

Cavidade	Região	Dimensão (mm)			Média	DP	
Tração	Largura	C	6,0096			6,034	0,019
		C	6,0380				
		C	6,0553				
	Comprimento	E	119,2826			119,312	0,023
		C	119,3378				
		S	119,3162				
	Espessura	E	3,6827	3,7087	3,7183	3,678	0,072
		C	3,7606	3,7560	3,7285		
		S	3,6128	3,5755	3,5577		
Flexão	Largura	E	13,0525			12,987	0,055
		C	12,9895				
		S	12,9181				
	Comprimento	E	130,9656			130,959	0,031
		C	130,9930				
		S	130,9188				
	Espessura	E	3,4193	3,4610	3,4739	3,436	0,057
		C	3,4924	3,4884	3,4675		
		S	3,4393	3,3805	3,3055		

Após 50 ciclos de injeção, a variação dimensional em relação ao estado inicial, manteve-se em $\pm 1\%$ nas três dimensões. A Tabela 4.5 apresenta um comparativo de como o avanço das injeções afetou o dimensional das cavidades do inserto de Digital ABS. A variação apresentada na última coluna é sempre calculada com referência a dimensão inicial.

Tabela 4.5 – Comparativo dimensional

Cavidade	Dimensão		Média	Varição
Tração	Largura	Fornecimento	6,071	--
		Após 25 ciclos	6,144	1,01%
		Após 50 ciclos	6,034	0,99%
	Comprimento	Fornecimento	119,324	--
		Após 25 ciclos	119,349	1,00%
		Após 50 ciclos	119,312	1,00%
	Espessura	Fornecimento	3,604	--
		Após 25 ciclos	3,584	0,99%
		Após 50 ciclos	3,678	1,02%
Flexão	Largura	Fornecimento	13,029	--
		Após 25 ciclos	13,039	1,00%
		Após 50 ciclos	12,987	1,00%
	Comprimento	Fornecimento	131,004	--
		Após 25 ciclos	131,010	1,00%
		Após 50 ciclos	130,959	1,00%
	Espessura	Fornecimento	3,374	--
		Após 25 ciclos	3,355	0,99%
		Após 50 ciclos	3,436	1,02%

As cavidades aumentaram em $\pm 1\%$ após 25 ciclos de injeção, provavelmente devido a dilatação que o material sofreu pelo fornecimento de calor. Os CPs acompanharam este aumento.

Porém após 50 ciclos os CPs continuaram a aumentar dimensionalmente enquanto o inserto diminuiu. Isto se deve possivelmente a pressão de fechamento do inserto. Com o “desgaste” do material após vários ciclos a força de fechamento fez com que o inserto fosse “amassado” para dentro das cavidades.

4.2 Ensaio

4.2.1 Tração

Os resultados para ensaio de tração do CPs injetados em aço 1045, alumínio 7075, zamac 8 e Digital ABS são apresentados nas Tabelas 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 respectivamente. O coeficiente de variação foi abreviado para CV.

Tabela 4.6 - Ensaio de tração para CPs injetados em Aço 1045

Corpo de prova	Alongamento Escoamento (%)	Tensão Escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo Elástico (MPa)
1	6,22	27,12	16,81	908,10
2	6,29	26,26	16,79	885,20
3	6,31	25,53	17,06	880,90
4	6,36	25,50	19,92	991,40
5	6,19	25,54	16,13	786,60
Média	6,27	25,99	17,34	890,44
DP	0,06	0,63	1,33	65,43
CV	0,96%	2,42%	7,67%	7,35%

Tabela 4.7 - Ensaio de tração para CPs injetados em Alumínio 7075

Corpo de prova	Alongamento Escoamento (%)	Tensão Escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo Elástico (MPa)
1	6,27	26,35	17,02	807,50
2	6,30	26,56	14,33	861,00
3	6,31	26,31	16,08	844,90
4	6,20	26,69	15,77	915,90
5	6,12	25,63	17,00	847,50
Média	6,24	26,31	16,04	855,36
DP	0,07	0,37	0,99	35,10
CV	1,12%	1,41%	6,17%	4,10%

Tabela 4.8 - Ensaio de tração para CPs injetados em Zamac 8

Corpo de prova	Alongamento Escoamento (%)	Tensão Escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo Elástico (MPa)
1	6,40	25,24	15,89	861,80
2	6,22	25,53	15,19	832,80
3	6,15	25,93	17,53	895,80
4	6,53	25,16	17,61	807,90
5	6,40	26,01	15,24	864,30
Média	6,34	25,57	16,29	852,52
DP	0,14	0,35	1,07	29,93
CV	2,21%	1,37%	6,57%	3,51%

Tabela 4.9 - Ensaio de tração para CPs injetados em Digital ABS

Corpo de prova	Alongamento Escoamento (%)	Tensão Escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo Elástico (MPa)
1	5,69	27,58	16,14	1046,00
2	6,02	27,35	17,71	960,80
3	5,72	26,76	17,95	975,60
4	5,93	26,33	17,18	998,60
5	5,61	27,89	17,41	975,30
Média	5,79	27,18	17,28	991,26
DP	0,15	0,56	0,63	29,93
CV	2,59%	2,06%	3,65%	3,02%

Os valores médios obtidos são apresentados na Tabela 4.10, e as curvas de cada material podem ser comparadas no Gráfico 4.7.

Os CPs injetados em inserto polimérico apresentaram um aumento da tensão de escoamento em aproximadamente 5%, quando comparado aos demais. Houve também a diminuição da ductilidade, os CPs deformaram menos plasticamente do momento da estrição até o rompimento.

Tabela 4.10 – Comparação entre os valores médios obtidos para ensaio de tração

Material do inserto	Alongamento Escoamento (%)	Tensão Escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo Elástico (MPa)
Aço 1045	6,27	25,99	17,34	890,44
DV	0,06	0,63	1,33	65,43
Alumínio 7075	6,24	26,31	16,04	855,36
DV	0,07	0,37	0,99	35,10
Zamac 8	6,34	25,57	16,29	852,52
DV	0,14	0,35	1,07	29,93
Digital ABS	5,79	27,18	17,28	991,26
DV	0,15	0,56	0,63	29,93

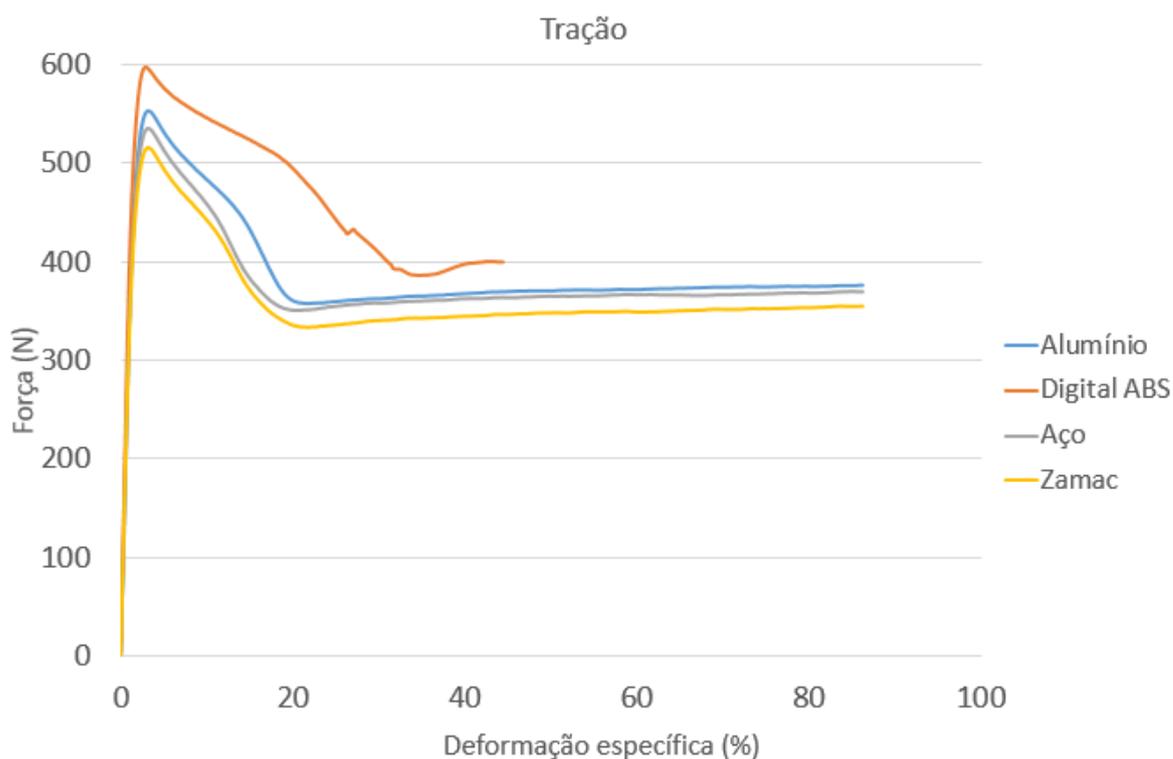


Gráfico 4.7 – Curvas das médias de tração

4.2.2 Flexão

Os resultados para o ensaio de flexão dos CPs injetados em aço, alumínio, zamac e Digital ABS são apresentados nas Tabelas 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 respectivamente.

Tabela 4.11 – Ensaio de flexão para CPs injetados em Aço 1045

Corpo de prova	Alongamento máximo (%)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Velocidade do ensaio (mm/min)
1	6,84	26,69	775,4	25,02	1,39
2	7,17	25,92	772,1	24,50	1,40
3	7,53	25,55	780,5	24,22	1,40
4	6,77	23,35	755,5	22,37	1,40
5	6,63	25,48	760,6	23,99	1,41
Média	6,99	25,40	768,82	24,02	1,40
DP	0,32	1,11	9,33	0,89	0,01
CV	4,58%	4,37%	1,21%	3,71%	0,71%

Tabela 4.12 - Ensaio de flexão para CPs injetados em Alumínio 7075

Corpo de prova	Alongamento máximo (%)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Velocidade do ensaio (mm/min)
1	7,67	27,57	820,3	25,83	1,38
2	7,14	25,06	743,5	23,48	1,39
3	7,34	24,98	730,1	23,50	1,39
4	6,93	25,85	758,7	24,32	1,38
5	7,33	25,48	816,8	24,20	1,39
Média	7,28	25,79	773,88	24,27	1,39
DP	0,25	0,94	37,60	0,86	0,00
CV	3,43%	3,64%	4,86%	3,54%	0,00%

Tabela 4.13 - Ensaio de flexão para CPs injetados em Zamac 8

Corpo de prova	Alongamento máximo (%)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Velocidade do ensaio (mm/min)
1	7,09	22,36	620,8	20,81	1,34
2	7,69	23,06	641,6	21,16	1,35
3	7,25	20,54	645,6	19,19	1,35
4	7,17	20,60	639,0	21,09	1,34
5	7,61	22,52	635,9	21,02	1,34
Média	7,36	21,82	636,58	20,65	1,34
DP	0,24	1,04	8,51	0,74	0,00
CV	3,26%	4,77%	1,34%	3,58%	0,00%

Tabela 4.14 - Ensaio de flexão para CPs injetados em Digital ABS

Corpo de prova	Alongamento máximo (%)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Velocidade do ensaio (mm/min)
1	6,65	32,20	1213,1	30,87	1,43
2	6,65	32,80	1175,3	31,46	1,43
3	6,47	33,65	1160,5	32,48	1,43
4	6,64	33,22	1154,5	31,92	1,43
5	6,70	33,83	1183,8	32,35	1,43
Média	6,62	33,14	1177,44	31,82	1,43
DP	0,08	0,59	20,64	0,59	0,00
CV	1,21%	1,78%	1,75%	1,85%	0,00%

A Tabela 4.15 faz um comparativo entre as médias de cada material.

Tabela 4.15 – Comparação das médias de flexão

Material do inserto	Alongamento máximo (%)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Velocidade do ensaio (mm/min)
Aço 1045	6,99	25,40	768,82	24,02	1,40
DV	0,32	1,11	9,33	0,89	0,01
Alumínio 7075	7,28	25,79	773,88	24,27	1,39
DV	0,25	0,94	37,60	0,86	0,00
Zamac 8	7,36	21,82	636,58	20,65	1,34
DV	0,24	1,04	8,51	0,74	0,00
Digital ABS	6,62	33,14	1177,44	31,82	1,43
DV	0,08	0,59	20,64	0,59	0,00

As curvas de cada material podem ser comparadas no Gráfico 4.8.

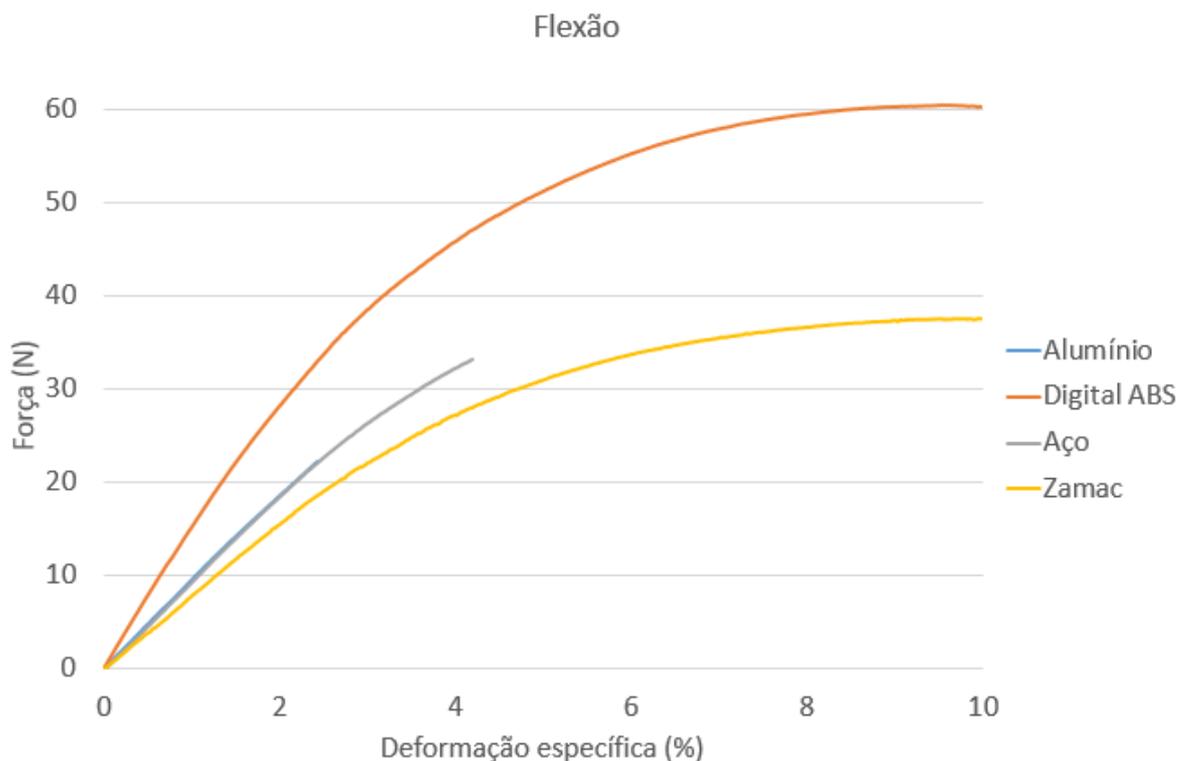


Gráfico 4.8 – Curvas médias de flexão

As tensões máxima e de escoamento dos CPs injetados em Digital ABS tiveram um aumento de mais de 30% em relação aos moldes metálicos.

O módulo de elasticidade, ou módulo de Young, teve destaque com um acréscimo de mais de 60% em relação aos resultados obtidos nos CPs produzidos em insertos metálicos, o que pode ser constatado no gráfico pelo ângulo da curva do Digital ABS mais próxima ao eixo vertical.

Estes resultados podem ser decorrentes do maior tempo de resfriamento dos CPs produzidos no inserto polimérico, que possibilitava um melhor arranjo das macromoléculas.

Seguindo este conceito o aço e o alumínio tiveram o mesmo tempo total de ciclo e seus módulos de elasticidade ficaram muito próximos. O zamac por sua vez teve o menor tempo total de ciclo e também o menor módulo de elasticidade.

4.2.3 Dureza

Os resultados para dureza dos CPs injetados em Aço, Alumínio, Zamac e Digital ABS são apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Ensaio de dureza

Medição	Aço 1045	Alumínio 7075	Zamac 8	Digital ABS
1	73	70	75	72
2	74	71	75	73
3	74	72	75	73
4	74	73	74	72
5	74	73	74	72
6	73	72	75	72
7	74	73	75	71
8	74	72	74	72
9	74	73	74	72
10	73	72	74	73
Média	74	72	74,5	72
DP	0,5	0,9	0,5	0,6
CV	0,68%	1,25%	0,67%	0,83%

A dureza dos CPs injetados em diferentes materiais de insertos teve pouca variação, não ultrapassando 2,5 Shore D entre elas.

4.2.4 Impacto

Os resultados para impacto dos CPs injetados em aço, alumínio, zamac e Digital ABS são apresentados nas Tabelas 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20 respectivamente.

Tabela 4.17 - Ensaio de impacto para CPs injetados em Aço 1045

Corpo de prova	Energia Absorvida (J)	Resiliência (J/m)
1	0,162	49,54
2	0,172	52,44
3	0,146	44,65
4	0,162	50,00
5	0,142	43,43
6	0,166	50,76
7	0,176	53,50
8	0,182	55,66
9	0,188	57,32
10	0,158	48,17
Média	0,165	50,55
DP	0,015	4,43
CV	9,09%	8,76%

Tabela 4.18 - Ensaio de impacto para CPs injetados em Alumínio 7075

Corpo de prova	Energia Absorvida (J)	Resiliência (J/m)
1	0,150	46,30
2	0,150	46,30
3	0,156	48,00
4	0,140	43,21
5	0,150	46,44
6	0,158	48,77
7	0,160	49,54
8	0,144	44,72
9	0,148	45,82
10	0,156	46,57
Média	0,151	46,57
DP	0,006	1,86
CV	3,97%	3,99%

Tabela 4.19 - Ensaio de impacto para CPs injetados em Zamac 8

Corpo de prova	Energia Absorvida (J)	Resiliência (J/m)
1	0,148	46,11
2	0,154	47,68
3	0,178	55,11
4	0,156	48,75
5	0,134	41,88
6	0,122	39,23
7	0,154	49,36
8	0,136	43,17
9	0,130	41,94
10	0,154	49,36
Média	0,147	46,26
DP	0,016	4,74
CV	10,88%	10,25%

Tabela 4.20- Ensaio de impacto para CPs injetados em Digital ABS

Corpo de prova	Energia Absorvida (J)	Resiliência (J/m)
1	0,146	44,38
2	0,134	40,73
3	0,156	47,27
4	0,148	45,50
5	0,164	50,00
6	0,174	53,05
7	0,154	46,81
8	0,152	46,20
9	0,154	47,24
10	0,184	56,44
Média	0,157	47,75
DP	0,014	4,45
CV	8,92%	9,32%

Os valores médios de cada inserto são apresentados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 – Comparativo das médias de impacto

Material do inserto	Energia Absorvida (J)	Resiliência (J/m)
Aço 1045	0,165	50,55
DV	0,015	4,43
Alumínio 7075	0,151	46,57
DV	0,006	1,86
Zamac 8	0,147	46,26
DV	0,016	4,74
Digital ABS	0,157	47,75
DV	0,014	4,45

O ensaio de impacto assim como o de dureza não teve grande variação de resultados entre as amostras. Não tendo variações superiores a 0,018J na energia absorvida.

4.3 Rugosidade das cavidades de Digital ABS

A Figura 4.2 apresenta a rugosidade superficial da cavidade do CP de tração em estado de fornecimento do inserto.

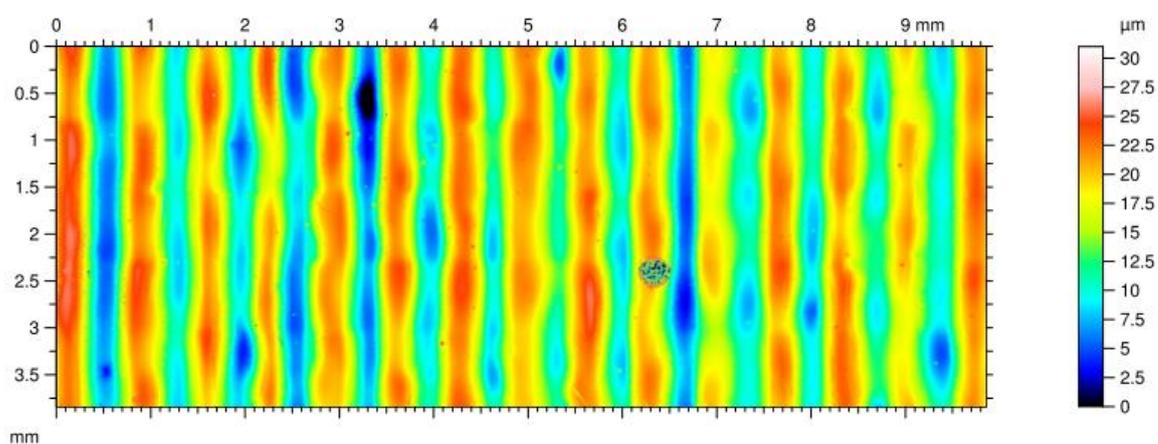


Figura 4.2 – Rugosidade da cavidade de tração em estado de fornecimento

Existe uma pequena inclusão na faixa de 6,3 mm que serviu como marcador para as medições seguintes, após 25 ciclos e após 50 ciclos, para certificar que o local das medições fosse o mais próximo possível.

O Gráfico 4.9 é uma seção transversal da Figura 4.2 em $x=0,2\text{mm}$, o Gráfico 4.10 em $x=1,8\text{mm}$ e o Gráfico 4.11 em $x=3,6\text{mm}$. É possível observar que as seções transversais distintas têm o mesmo perfil. Isto representa uma homogeneidade da região medida.

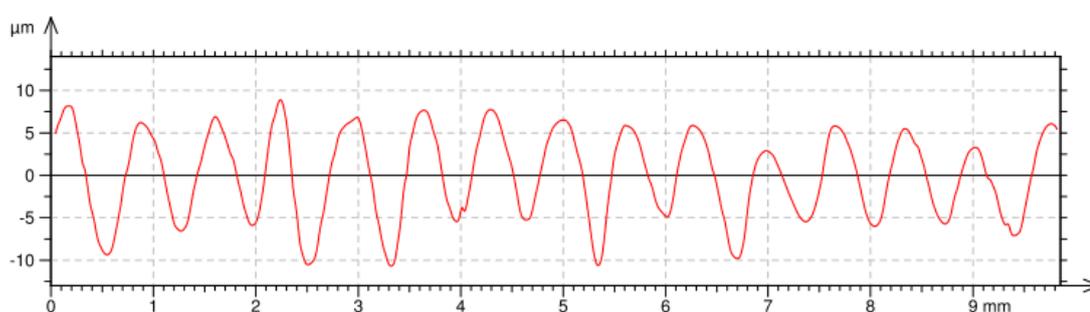


Gráfico 4.9 - Perfil 2D transversal estado de fornecimento em $x = 0,20\text{ mm}$

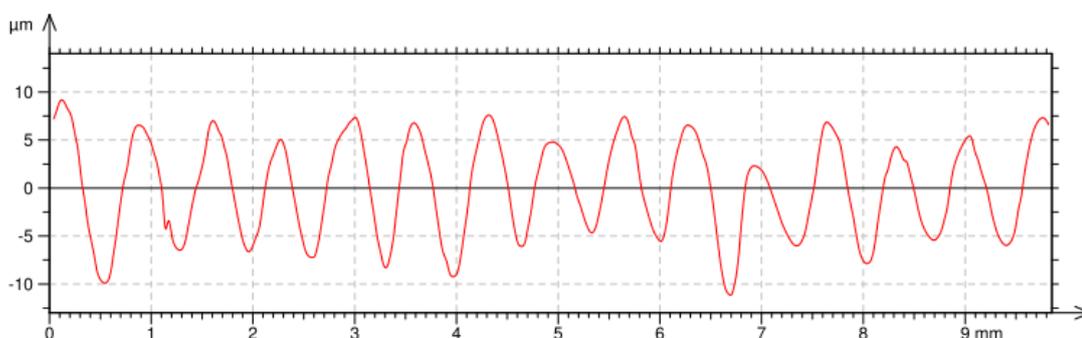


Gráfico 4.10 - Perfil 2D transversal estado de fornecimento em $x = 1,80\text{ mm}$

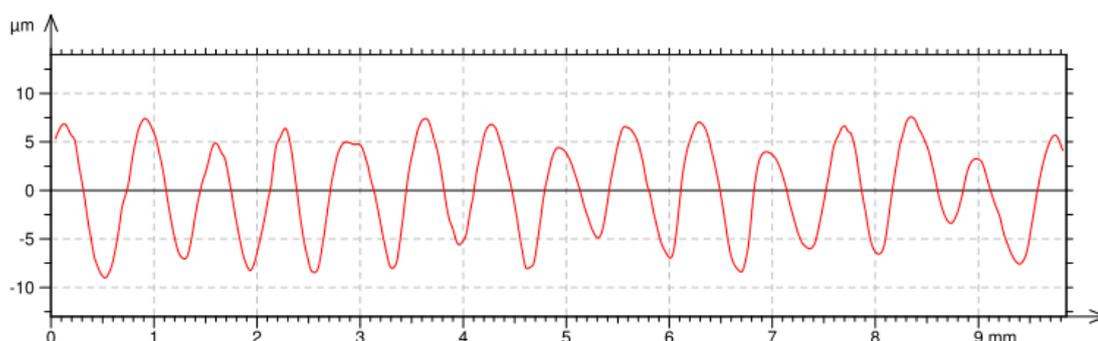


Gráfico 4.11 - Perfil 2D transversal estado de fornecimento em $x = 3,60\text{ mm}$

A Figura 4.3 é uma representação 3D da rugosidade superficial da cavidade de tração em estado de fornecimento.

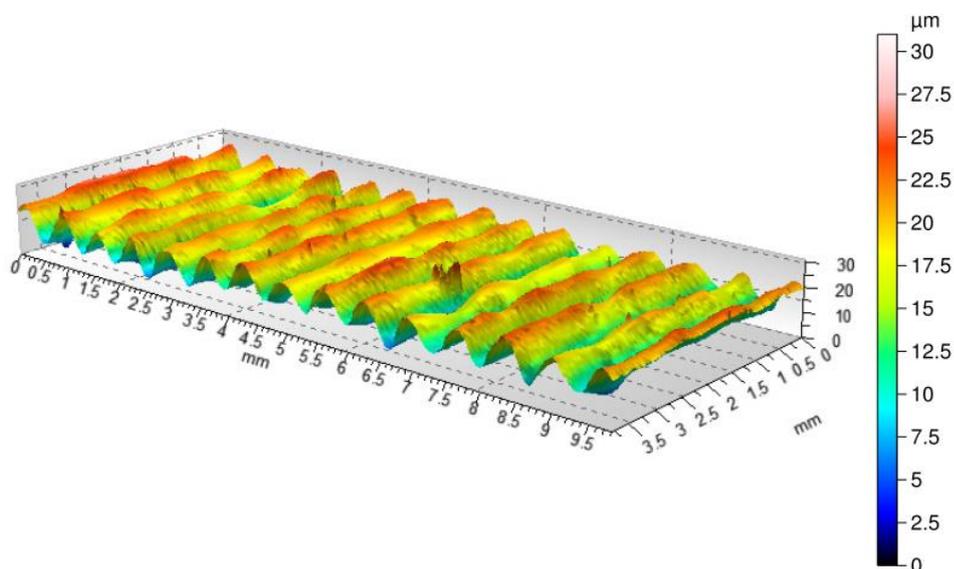


Figura 4.3 – Representação 3D da rugosidade da cavidade de tração em estado de fornecimento

Após 25 ciclos realizou-se uma nova medição da rugosidade superficial. A inclusão se encontra aproximadamente no mesmo ponto, e a variação entre picos e vales se manteve com pouca alteração em relação ao estado de fornecimento.

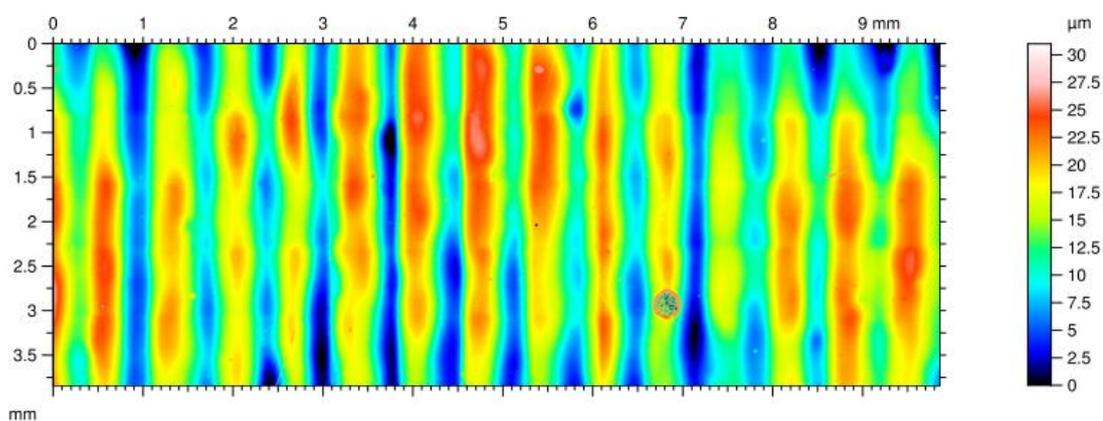


Figura 4.4 - Rugosidade da cavidade de tração após 25 ciclos

Os Gráficos 4.12, 4.13 e 4.14 são cortes transversais realizados nos mesmos pontos que os de estado de fornecimento.

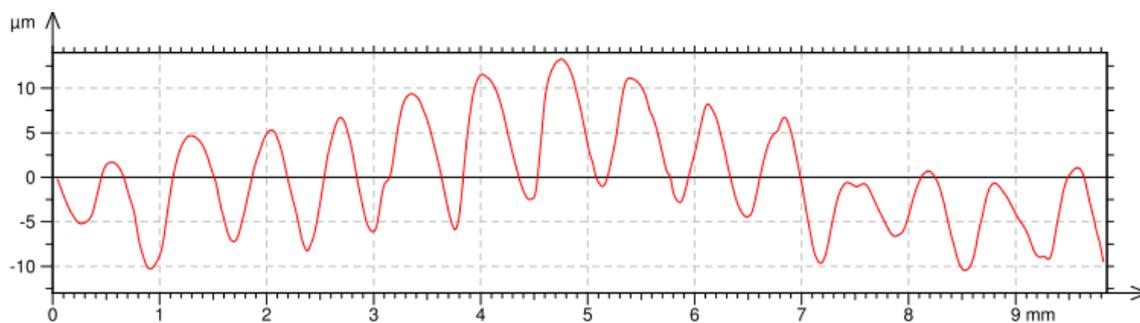


Gráfico 4.12 - Perfil 2D transversal após 25 ciclos em $x = 0,20$ mm

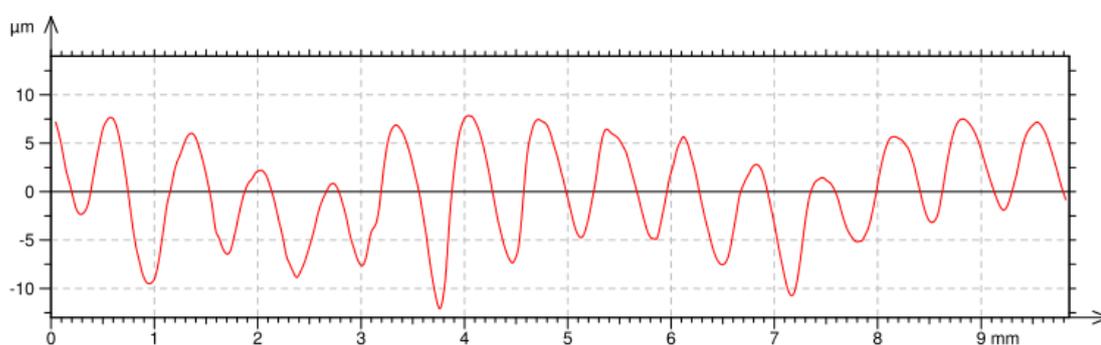


Gráfico 4.13 - Perfil 2D transversal após 25 ciclos em $x = 1,80$ mm

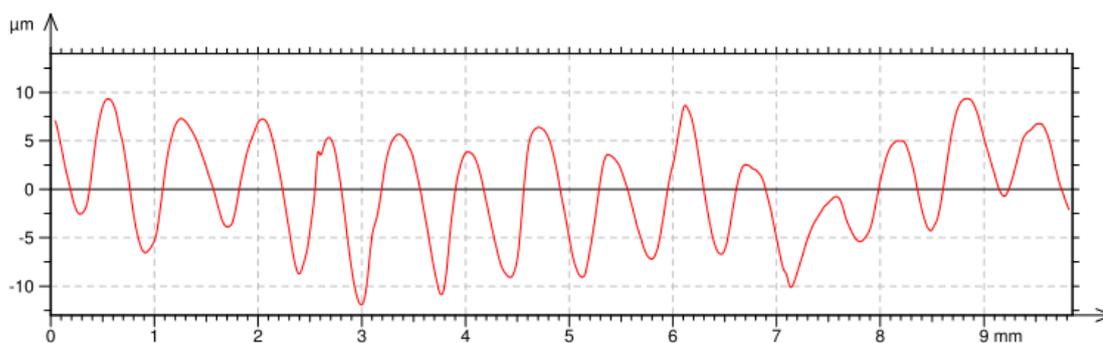


Gráfico 4.14 - Perfil 2D transversal após 25 ciclos em $x = 3,60$ mm

A Figura 4.5 é uma representação 3D da rugosidade da cavidade de tração após 25 ciclos de injeção.

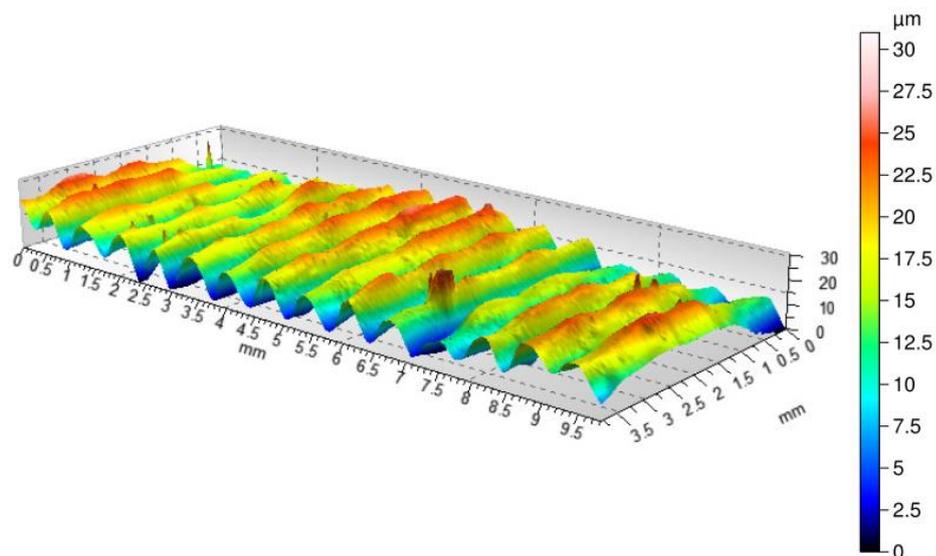


Figura 4.5 - Representação 3D da rugosidade da cavidade de tração após 25 ciclos

A última medição de rugosidade foi realizada após 50 ciclos de injeção. A superfície final em 2D pode ser observada na Figura 4.6.

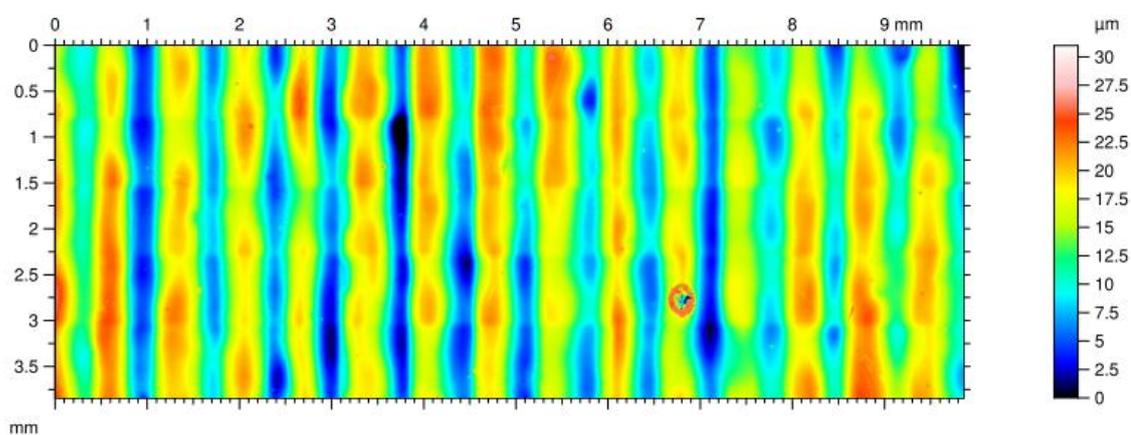


Figura 4.6 - Rugosidade da cavidade de tração após 50 ciclos

A inclusão aparece novamente na figura, certificando o local de medição. Como realizado anteriormente foram retiradas seções transversais, presente nos, Gráficos 4.15, 4.16 e 4.17.

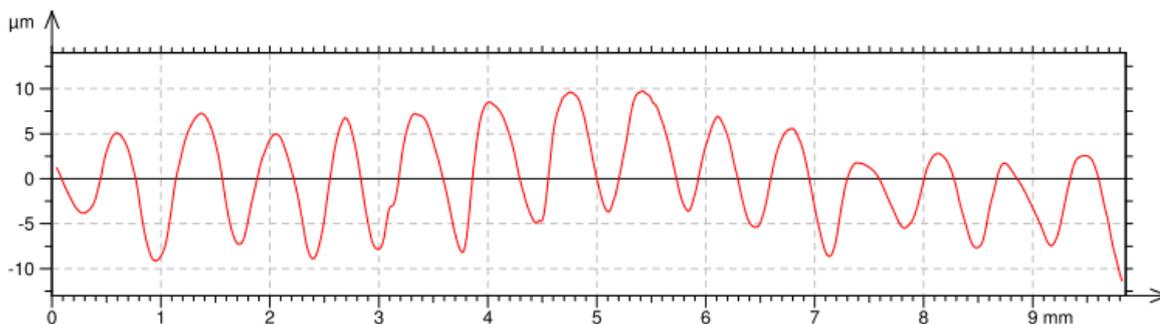


Gráfico 4.15 - Perfil 2D transversal após 50 ciclos em $x = 0,20$ mm

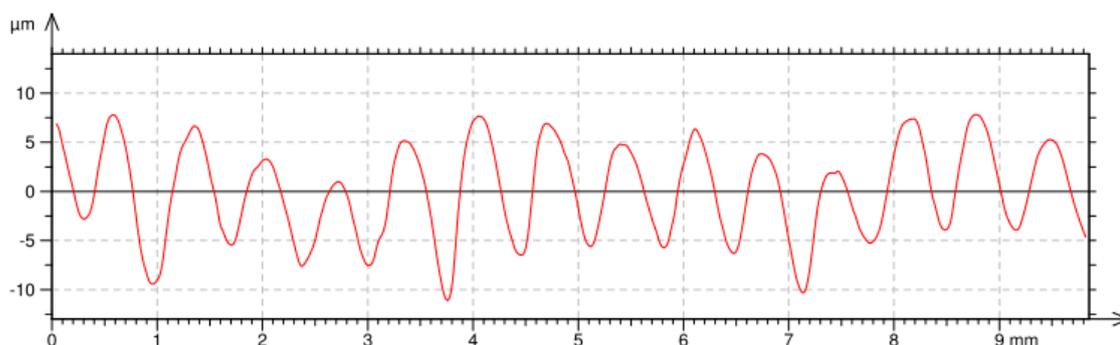


Gráfico 4.16 - Perfil 2D transversal após 50 ciclos em $x = 1,80$ mm

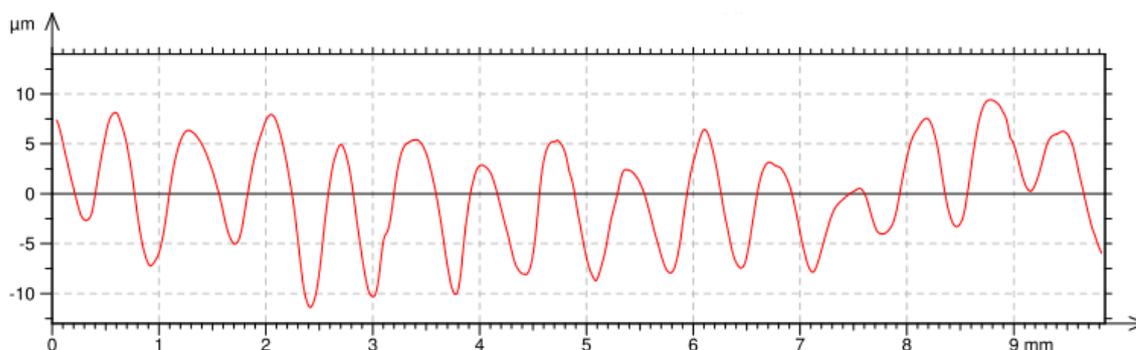


Gráfico 4.17 - Perfil 2D transversal após 50 ciclos em $x = 3,60$ mm

A Figura 4.7 é uma representação 3D da rugosidade da cavidade de tração após 50 ciclos de injeção. O Gráfico 4.18 apresenta uma comparação entre o perfil 2D transversal em $x=3,60$ mm da rugosidade da cavidade em seus 3 estados.

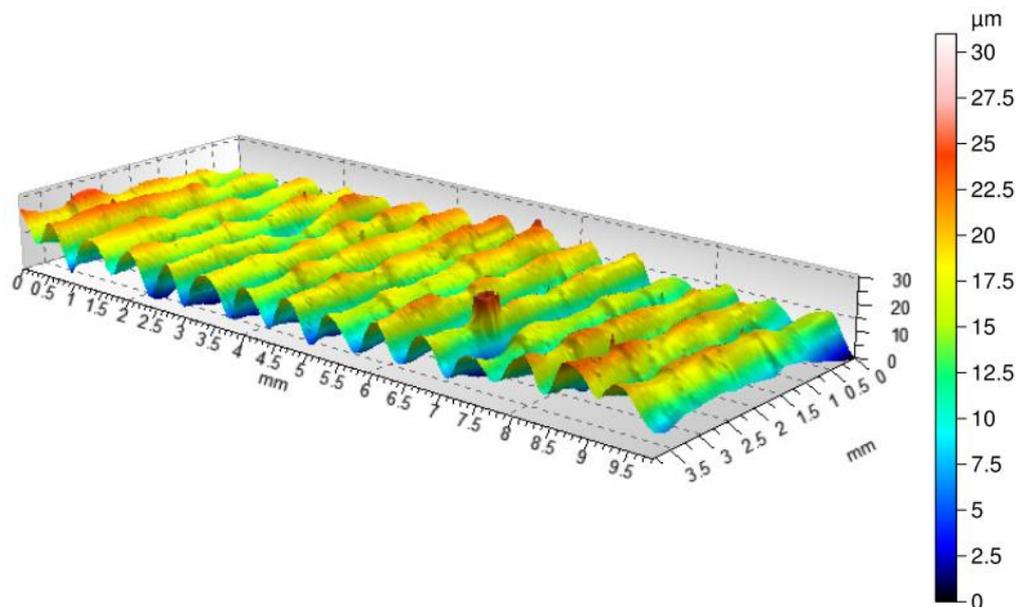


Figura 4.7 - Representação 3D da rugosidade da cavidade de tração após 50 ciclos

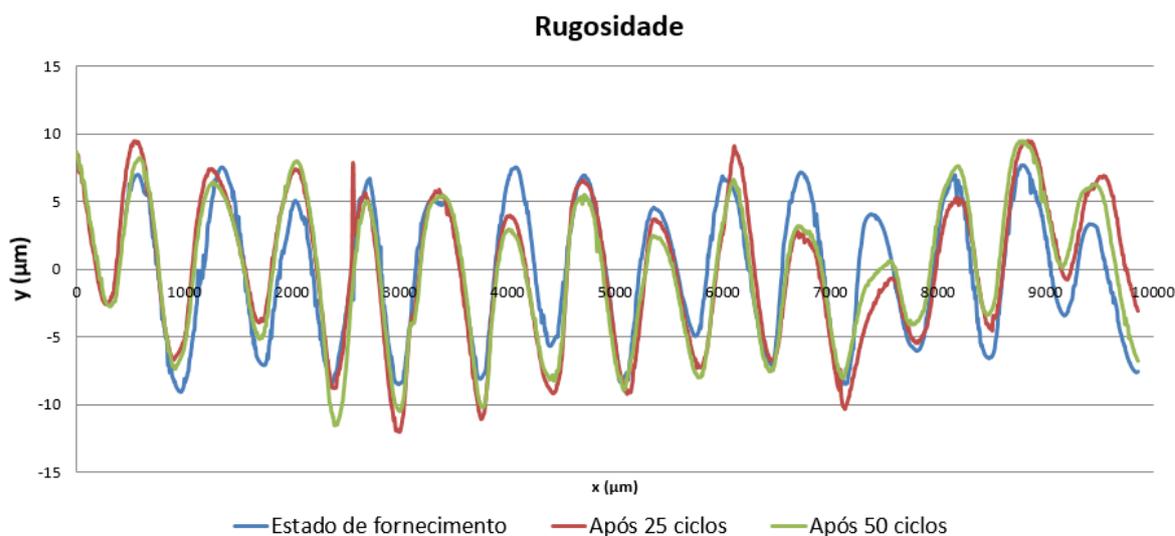


Gráfico 4.18 – Comparação da rugosidade entre estado de fornecimento, após 25 ciclos e após 50 ciclos

A Tabela 4.22 apresenta os principais parâmetros de rugosidade obtidos. O parâmetro S_q avalia a rugosidade média quadrática, a qual pode-se observar manteve-se em valores próximos nas 3 medições realizadas.

O S_{sk} (coeficiente de assimetria) avalia a distribuição gaussiana de vales, picos e platôs. Quanto menor, mais profundos e mais estreitos são os vales. E quanto maior significa que mais altos e estreitos são os picos. Do estado de

fornecimento para 50 ciclos a variação foi muito pequena, porém após 25 ciclos houve uma diminuição provavelmente devida ao ponto de medição.

Tabela 4.22 – Parâmetros de rugosidade

	Fornecimento	25 ciclos	50 ciclos
Sq (mm)	5,192	5,472	5,033
Ssk	-0,2164	-0,1538	-0,2184
Sku	1,985	2,237	2,155
Ssc (1/mm)	45,75	24,38	22,31

O Sku (coeficiente de curtose) avalia o achatamento dos cumes, seu valor varia de 0 até ∞ . Ele é avaliado da seguinte forma:

- a) Sku = 3: distribuição normal (os cumes têm a forma de uma curva de Gauss)
- b) Sku > 3: a distribuição de altura é mesocúrtica
- c) Sku < 3: a distribuição de altura é platicúrtica

A Figura 4.8 apresenta esboços da distribuição de altura de acordo com o parâmetro Sku.

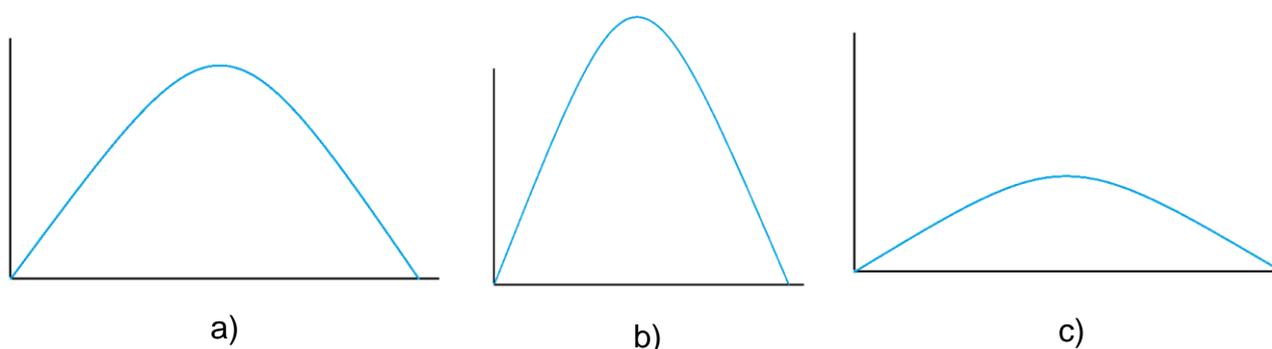


Figura 4.8 – Distribuições Sku

Os valores obtidos para o inserto de Digital ABS nos três momentos de medição indicam uma distribuição normal.

O Ssc estima o quão “pontiado” eram os picos, valores menores representam picos mais arredondados. Portanto, pode-se observar que os picos foram arredondados com o decorrer das injeções.

5 CONCLUSÕES

A tecnologia desempenha um papel cada vez mais importante na sociedade, e o desenvolvimento da Manufatura Aditiva (AM) tem colaborado em diversos campos da ciência.

No Brasil a AM é pouco explorada e trabalhos como este ajudam a abrir horizontes para o emprego desta técnica para obtenção de ferramentas, tais como molde-protótipo, ferramenta importantíssima no processo de desenvolvimento de produto.

O comportamento do molde-protótipo fabricado em Digital ABS por impressão 3D (Polyjet™) é compatível ao de um molde-protótipo convencional. Os parâmetros de injeção foram definidos de forma a não ter elevadas requisições mecânicas do material do inserto. Em função destes parâmetros e das propriedades do material do inserto, os ciclos de injeção foram mais longos.

As peças geradas apresentam características mecânicas similares as peças geradas por meio de insertos tradicionais, injetadas em insertos metálicos em alumínio 7075, zamac 8 ou aço 1045.

Os resultados de dureza e impacto se mantiveram próximos aos resultados dos moldes-protótipos convencionais. Os resultados de tração e flexão apresentam valores superiores de tensão de escoamento e inferiores de deformação plástica nas peças injetadas em Digital ABS.

Os ensaios de rugosidade e dimensional provam que o inserto é capaz de resistir a baixas tiragens de peças com poucas deformações das cavidades e praticamente sem alteração da rugosidade superficial. Isto foi observado com os parâmetros de injeção utilizados, que foram mais brandos em termos de solicitação da cavidade, e com a geometria relativamente simples que foi analisada.

Para trabalhos futuros considera-se importante a realização de análises sobre a cristalinidade dos corpos de prova. A fabricação de insertos com geometrias mais complexas e uma análise custos entre as peças injetadas em moldes metálicos e em Digital ABS.

REFERÊNCIAS

ABREU, N. F.. **Sistema para processo de injeção de plásticos**: software de suporte para preparadores e reguladores de máquinas no processo de injeção de plásticos. 2012. 109 f. Monografia (Tecnologia em Polímeros) – Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, Sorocaba, 2012.

AHRENS, C. H.; *et al.* **Utilização de ferramental rápido obtido por estereolitografia para a moldagem por injeção de componentes metálicos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2003, Uberlândia.

AHRENS, C. H.; VOLPATO, N.. **Ferramental Rápido**. In: Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações. São Paulo: Blücher, 2007.

ARAÚJO, J. F. *et al.* **Estudo de propriedades mecânicas do polipropileno moldado por injeção em insertos de resinas**. In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010, Campina Grande.

AZEVEDO, M.. **Plástico nos automóveis – Perder para concorrente poliméricos virou rotina para as peças de metal**. Disponível em: <<http://www.plastico.com.br/revista/pm380/automoveis1.html>>. Acesso em: 02 jul. 2014.

BARETA, D.R. *et al.* **Aplicação de Materiais Alternativos em Moldes Híbridos de Injeção**; Mídia do 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. Foz do Iguaçu, 2006.

BARRY, C *et al.* **Short Shot Method of Injection Molding**. 6 ed., Plastics Processing Laboratory Syllabus, University of Massachusetts, Lowell-Plastic Engineering Department, 1995. 61 p.

BULHÕES, C. C. J. R. **Tenacificação de polipropileno com elastômero olefínicos para aplicações com requisitos de transparência ótica**. 2011 146 f. Dissertação (Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012.

CARVALHO, J.; VOLPATO, N.. **Prototipagem rápida como processo de fabricação.** In: Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações. São Paulo: Blücher, 2007.

DOW CHEMICAL COMPANY. **Processo de modelagem por injeção.** Disponível em: <<http://www.dow.com/polyethylene/la/pt/fab/molding/improcess.htm>> Acesso em: 02 jul. 2014.

FOGGIATTO, J. A.. **Utilização do processo de modelagem por fusão e deposição (FDM) na fabricação rápida de insertos para injeção de termoplásticos.** 2005. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

GRYZINSKI, I.. **Aplicação de zamac-8 em molde-protótipo usinado e análise do moldado em polipropileno.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

LIMA, P. F.. **Polipropileno com talco: um estudo comparativo do PP com talco x PP com óxido de cálcio para melhoria de seu aspecto visual em peças automobilística.** 2011. 72 f. Monografia - Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, São Paulo, 2011.

NAGAHANUMAIA, H. *et al.*. **Computer Aided Rapid Tooling Process Selection and Manufacturability Evaluation for Injection Mold Development;** Science Direct – Computers in Industry 59. Elsevier, 2008. pp. 262- 276.

MATEUS, A. *et al.*. **The effect of thermal conductivity of RIM moulds in kinetics cure.** London: Editora Taylor and Francis, p. 389, 2007.

PETRY, A.. **Mercado Brasileiro de Polipropileno com ênfase no setor automobilístico.** 2011. 35 f. Monografia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

REIS, E. L. M.. **Benefícios da utilização industrial do polipropileno com talco.** 2009. 59 f. Monografia - Faculdade de Tecnologia da Zona Leste. São Paulo. 2009.

ROSÁRIO, F. *et al.*. **Resíduos de sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado.** Polímeros, vol. 21, nº 32, 2011.

SALMORIA, G. V. *et al.*. **Influência do Desempenho Térmico de Moldes Fabricados com Compósito Epóxi/Alumínio nas Propriedades de PP Moldado por Injeção**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 18, nº 3, p. 262-269, 2008.

SANDVIK, C.. **Pesquisa Acelera e Dá o Tom na Usinagem Moderna**. *O Mundo da Usinagem*, São Paulo v. 2, 2000.

STRATASYS LTD. **Digital ABS**. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/br/materiais/polyjet/digital-abs>> Acesso em: 02 jul. 2014 a.

STRATASYS LTD. **Stratasys and Objet Agree to Combine to Create a Leader in 3D Printing and Direct Digital Manufacturing**. Disponível em: <<http://investors.stratasys.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=664239>> Acesso em: 22 jul. 2014 b.

STRATASYS LTD. **Tecnologia Polyjet™**. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/br/impressoras-3d/technologies/polyjet-technology>> Acesso em: 02 jul. 2014 c.

STRATASYS LTD. **3D Printed Injection Molds Hep Whale Reduce Risk and Re-engineering, Cutting Product Lead Time by 97%**. Disponível em: <http://blog.stratasys.com/2014/06/03/3d-printed-injection-molds-whale/?utm_source=Facebook&utm_medium=Social%2BMedia&utm_campaign=WhalePump> Acesso em: 02 jul. 2014 d.

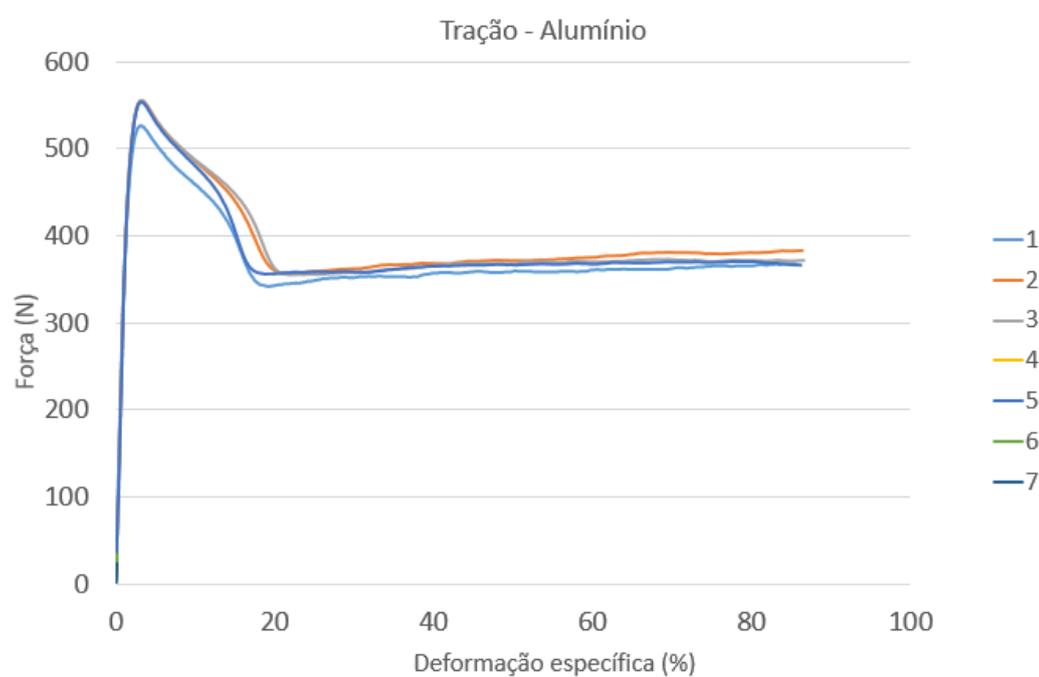
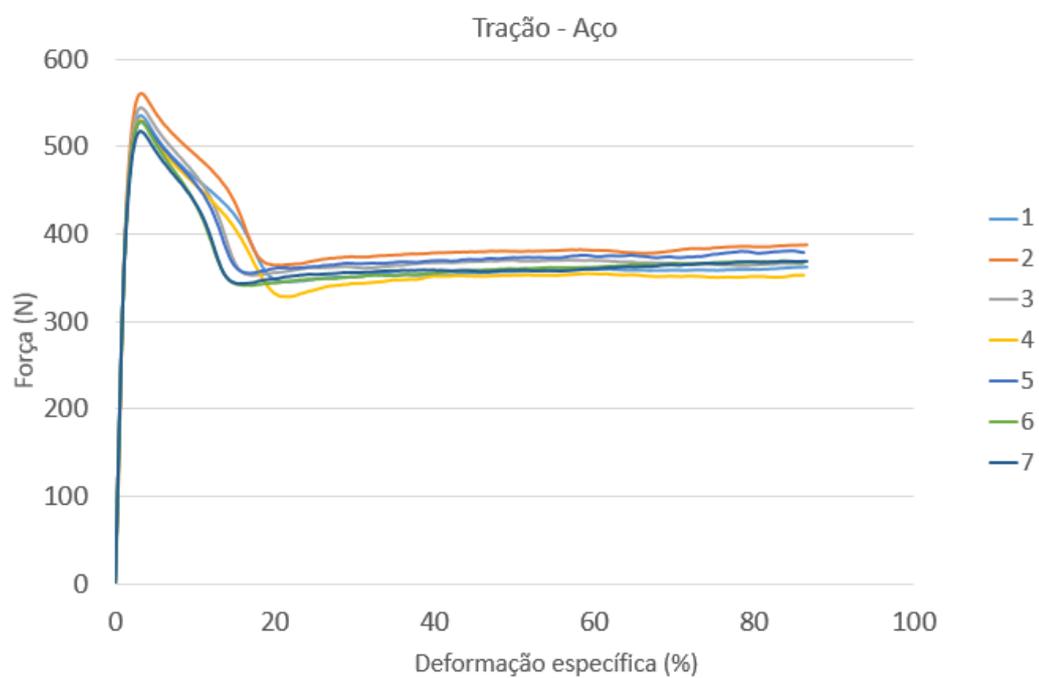
VILLARES METAIS. **Aços para moldes**: catálogo. São Paulo, 2013. 12 p.

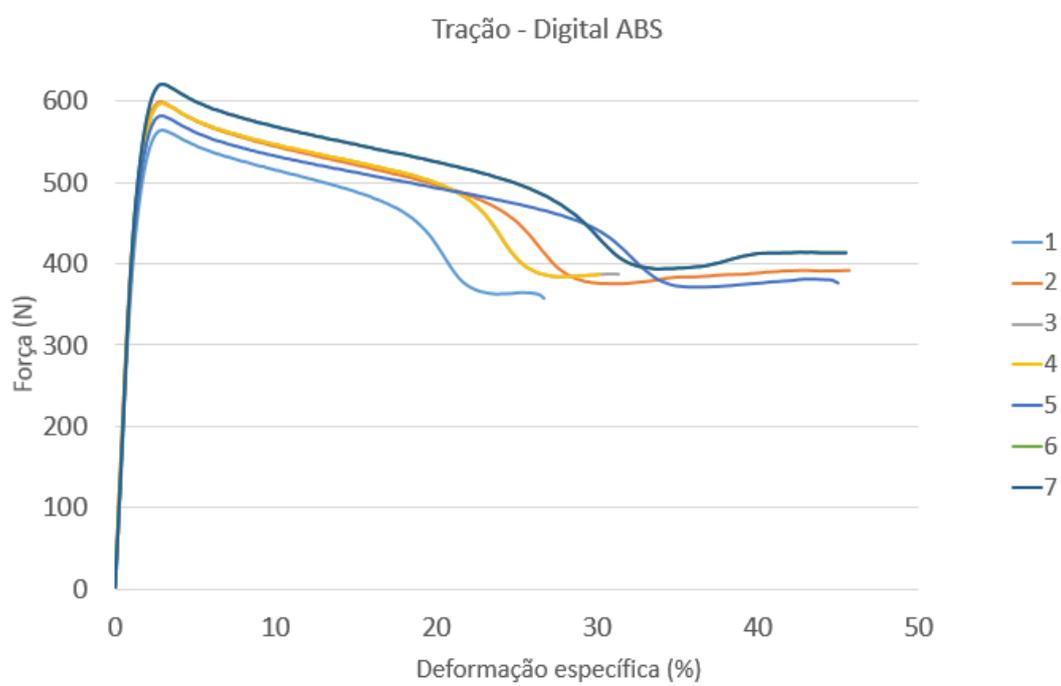
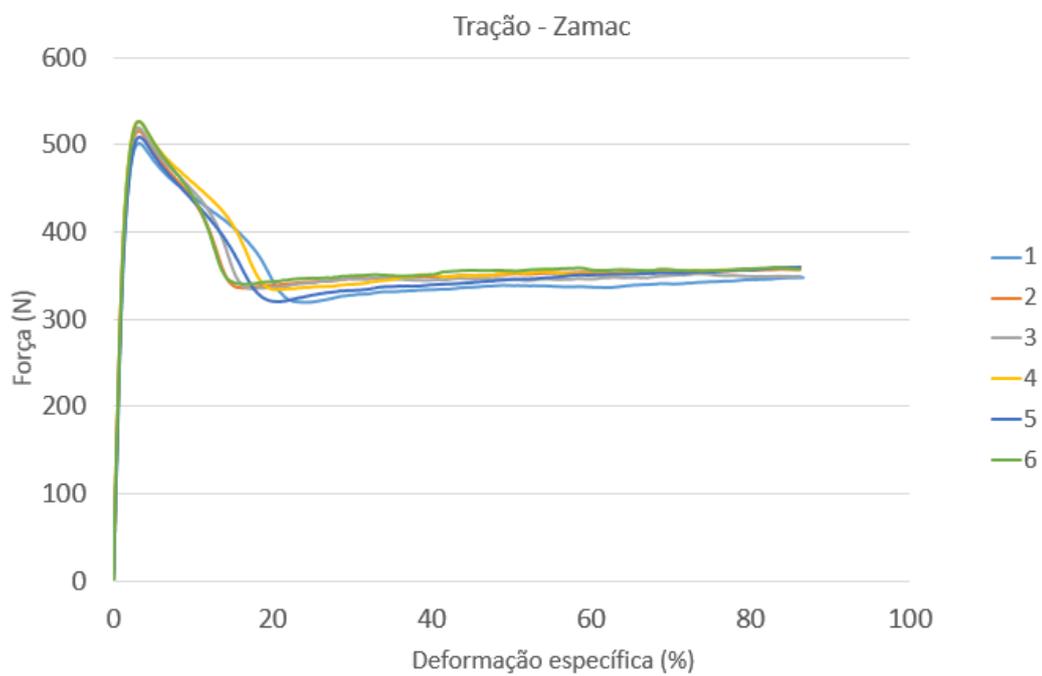
VOLPATO, N. *et al.*. **Integração da prototipagem rápida com o processo de desenvolvimento de produto**. In: *Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações*. São Paulo: Blücher, 2007.

ZONDER, L.; SELLA, N.. **Precision Pototyping** – The role of 3D printed molds in the injection molding industry. *Stratasys blog*, 2014.

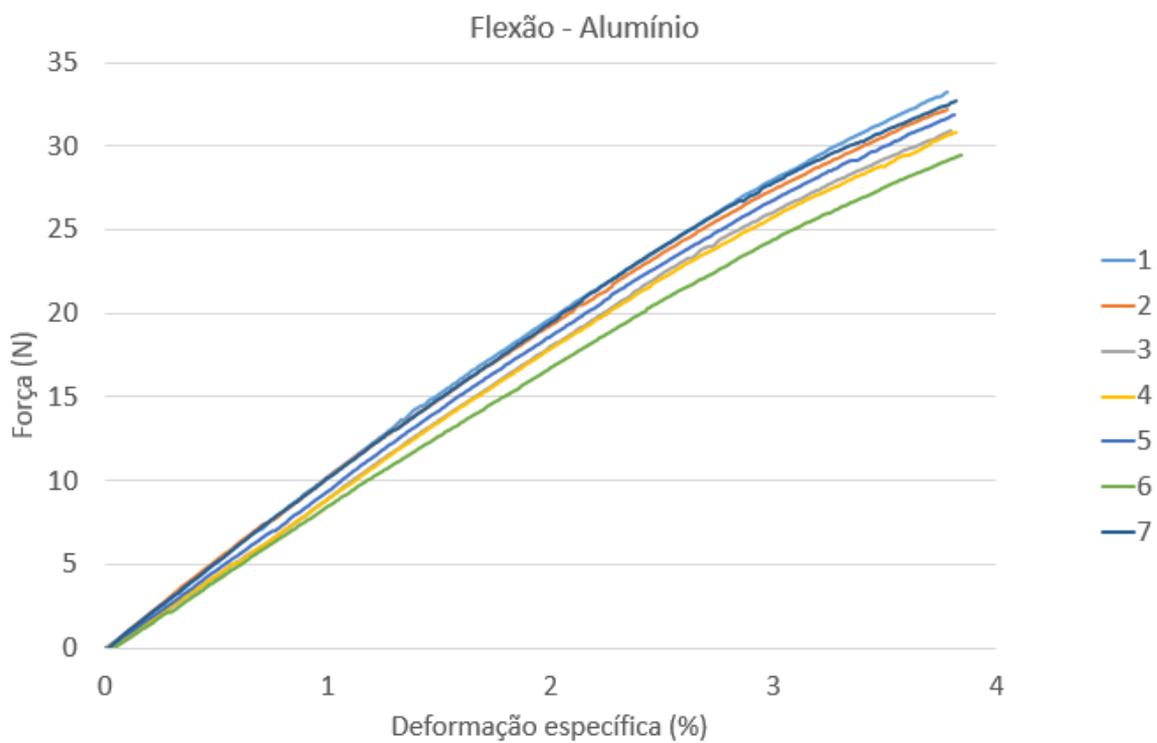
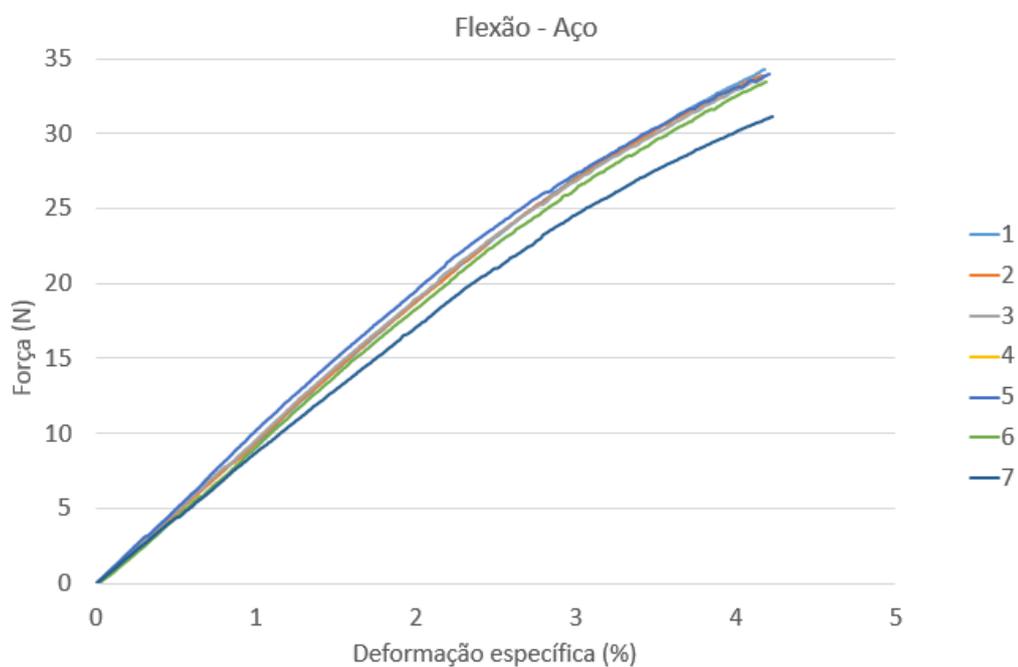
WOHLERS, T. **Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry Annual Worldwide Progress Report**. Colorado: Wohlers Associates, 2004.

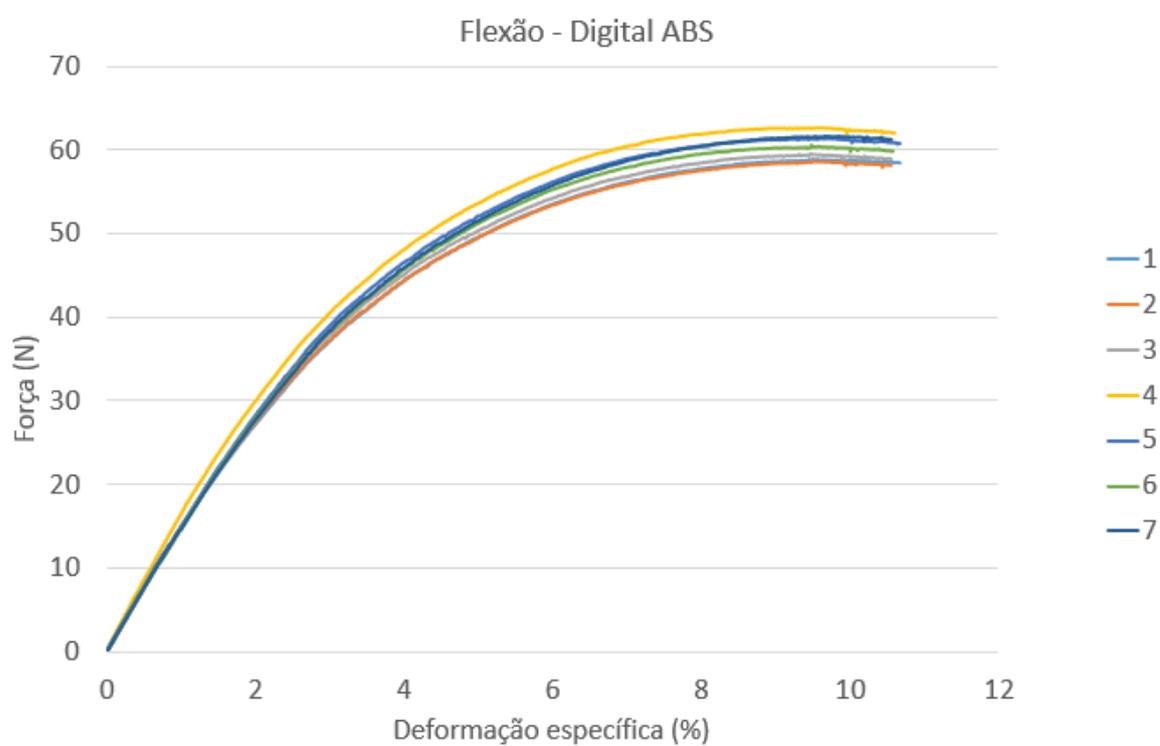
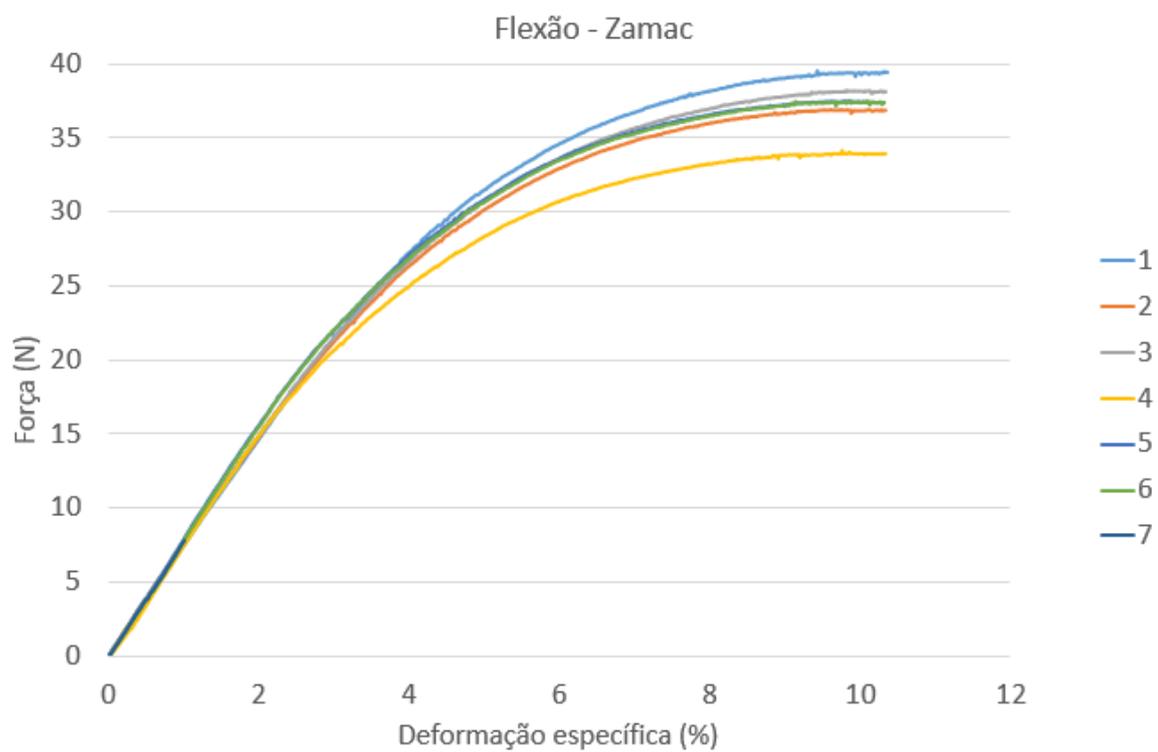
APÊNDICE A – GRÁFICOS DE TRAÇÃO





APÊNDICE B – GRÁFICOS DE FLEXÃO





ANEXO A – POLIPROPILENO CP 204



Folha de Dados

Revisão 11 (Novembro/12)

Polipropileno CP 204

Subfamília:

Copolímero Heterofásico

Descrição:

O CP 204 é um copolímero heterofásico de propeno e eteno, de alto índice de fluidez e reologia especial, aditivado para uso geral. Este produto apresenta excelente processabilidade e produtividade com bom balanço rigidez/impacto.

Aplicações:

Injeção de tampas traseiros de televisores; Tampas com rosca.

Processo:

Moldagem por Injeção

Propriedades de Controle:

	Método ASTM	Unidades	Valores
Índice de Fluidez (230°C/2,16kg)	D 1238	g/10 min	22

Propriedades Típicas^{a)}:

	Método ASTM	Unidades	Valores
Densidade	D 792	g/cm ³	0,900
Módulo de Flexão Secante a 1%	D 790	MPa	1200
Resistência à Tração no Escoamento	D 638	MPa	28
Alongamento no Escoamento	D 638	%	8
Dureza Rockwell (Escala R)	D 785	-	92
Resistência ao Impacto Izod a 23°C	D 256	J/m	70
Resistência ao Impacto Izod a -20°C	D 256	J/m	30
Temperatura de Deflexão Térmica a 0,455 MPa	D 648	°C	89
Temperatura de Deflexão Térmica a 1,820 MPa	D 648	°C	55
Temperatura de Amolecimento Vicat a 10 N	D 1525	°C	152

a) Ensaios em corpo de prova moldado por injeção conforme ASTM D 4101

Observações Finais:

- Esta resina atende à regulamentação FDA (*Food and Drug Administration*) para polímeros olefinicos do CFR 21 seção 177.1520, vigente na data de publicação desta especificação. Os aditivos presentes são sancionados por regulamentação apropriada do FDA.
- As informações aqui contidas são dadas de boa fé, indicando valores típicos obtidos em nossos laboratórios, não devendo ser consideradas como absolutas ou como garantia. Apenas as propriedades e os valores que constam do certificado de qualidade devem ser considerados como garantia do produto.
- Em algumas aplicações a Braskem tem desenvolvido resinas *tailor-made* para alcançar características específicas.
- Em caso de dúvida na utilização ou para discutir outras aplicações, entre em contato com a Área de Serviços Técnicos.
- Para informações de segurança, manuseio, proteção individual, primeiros socorros e disposição de resíduos, consultar a FISPQ – Folha de Informações de Segurança de Produtos Químicos. Número de registro no CAS: 9010-79-1.
- Os valores constantes nesse documento poderão sofrer alterações sem comunicação prévia da Braskem.
- A Braskem não recomenda o uso desse produto para fabricação de embalagens, peças ou qualquer outro tipo de produto, que será utilizado para o armazenamento ou contato com soluções parenterais ou que terá qualquer tipo de contato interno com o corpo humano.
- Esta resina não contém a substância Bisfenol A (BPA, CAS#80-05-7) em sua composição.

ANEXO B – MÉTODO SHORT SHOT

O método *short shot* foi traduzido e adaptado de BARRY; BOOTHROYD; *et al*, 1995.

Etapas:

1. Determine a temperatura do molde;
2. Determine a temperatura do polímero que será injetado;
3. Ajuste da dosagem:
 - a) Ajuste a pressão de recalque igual a “zero”;
 - b) ajuste o tempo de recalque igual a “zero”;
 - c) coloque uma velocidade de injeção elevada;
 - d) ajuste o tempo (1º estágio) para um valor maior do que o necessário para preencher as cavidades;
 - e) ajuste a pressão (1º estágio) para um valor maior do que o necessário para preencher as cavidades;
 - f) ajuste o valor do curso do fuso para um valor insuficiente para preencher as cavidades;
 - g) injete uma peça (está deverá sair incompleta);
 - h) continue injetando peças, aumentando gradualmente o curso do fuso – quando a peça estiver entre 95-98% preenchida o curso do fuso está definido.
4. Ajuste da velocidade:
 - a) se próximo do ponto inicial de injeção houver queima, a peça ficar muito molde após a extração – reduza a velocidade de injeção até os problemas desaparecem;
 - b) se próximo do ponto inicial de injeção houver marcas de fluxo – aumenta a velocidade de injeção até o problema desaparecer.
5. Ajuste a pressão de injeção
 - a) ajuste a pressão de injeção (1º estágio) para um valor insuficiente para preencher as cavidades;

b) injete uma peça (está deverá sair incompleta);

c) continue injetando peças, aumentando gradualmente a pressão de injeção – quando a peça estiver entre 95-98% preenchida e compatível com o passo 4 a pressão está definida.

6. Ajuste o tempo de injeção:

a) ajuste o tempo de injeção (1º estágio) para um valor insuficiente para preencher as cavidades;

b) injete uma peça (está deverá sair incompleta);

c) continue injetando peças, aumentando gradualmente o tempo de injeção – quando a peça estiver entre 95-98% preenchida e compatível com o passo 5 a pressão está definida.