

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FELIPE MENEGUZZO PASQUALI

**FERRAMENTAL RÁPIDO APLICADO AO PROCESSO DE MOLDAGEM POR
INJEÇÃO EM BAIXA PRESSÃO PARA PEÇAS CERÂMICAS**

CAXIAS DO SUL – RS

2014

FELIPE MENEGUZZO PASQUALI

**FERRAMENTAL RÁPIDO APLICADO AO PROCESSO DE MOLDAGEM POR
INJEÇÃO EM BAIXA PRESSÃO PARA PEÇAS CERÂMICAS**

Relatório de Estágio apresentado como
requisito parcial para conclusão do curso
de Engenharia Mecânica.
Supervisor: Prof. Dr. Carlos Alberto
Costa

CAXIAS DO SUL – RS

2014

FELIPE MENEGUZZO PASQUALI

**FERRAMENTAL RÁPIDO APLICADO AO PROCESSO DE MOLDAGEM POR
INJEÇÃO EM BAIXA PRESSÃO PARA PEÇAS CERÂMICAS**

Relatório de Estágio apresentado como
requisito parcial para conclusão do curso
de Engenharia Mecânica.

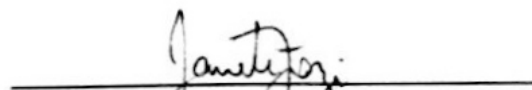
Supervisor: Prof. Dr. Carlos Alberto
Costa

Aprovado em 03 de Julho de 2014

Banca examinadora



Prof. Dr. Carlos Alberto Costa
Universidade de Caxias do Sul - UCS



Profa. Dra. Janete Eunice Zorzi
Universidade de Caxias do Sul - UCS



Prof. Me. Deives Roberto Baretta
Universidade de Caxias do Sul - UCS

RESUMO

Este trabalho estuda a aplicação do conceito de ferramental rápido (*Rapid Tooling*) na fabricação de insertos para o processo de injeção de cerâmica em baixa pressão. Para isto foram definidas duas geometrias de estudo em forma de caixa com paredes finas. Baseado nestas geometrias foi desenhado e fabricado um porta-molde experimental com sistemas de aquecimento e refrigeração. Os insertos foram produzidos em 2 tipos de materiais, alumínio e uma resina utilizada no processo de prototipagem rápida IJP da Stratasys com nome comercial *ABS-like*. Como forma de avaliação foram produzidas amostras utilizando os mesmos parâmetros de injeção para ambos os insertos. Foram avaliados comparativamente os tempos de ciclo, internas temperaturas, tipos de desmoldantes e custos. Também foram analisadas de forma qualitativa as peças injetadas quanto a defeitos e densidade. Os resultados mostram que o molde obtido por prototipagem rápida apresentou algumas desvantagens quanto a adesão com o material de injeção. Também observou-se um elevado impacto nos tempos de processo devido as características térmicas do material. A aplicação da cobertura antiaderente ocasionou deformações que inutilizaram os insertos. Os desmoldantes que se destacaram foram o óleo de silicone e a formulação com sabão, este último gerou bolhas nas peças.

Palavras-chaves: Ferramental Rápido, Injeção de Cerâmica, Prototipagem Rápida.

ABSTRACT

This paper studies the application of the concept of rapid tooling for the manufacture of inserts for low pressure injection process. For this study two geometries box-shaped thin-walled been defined. Based on these geometries was designed and fabricated an experimental mold holder with heating and cooling systems. The inserts were produced in 2 types of materials, aluminum and ABS-like resin used in process IJP Stratasys rapid prototyping. For comparison, samples were produced using the same injection parameters for both inserts. Cycle times, internal temperatures, types of mold release agents and costs were assessed. Were also analyzed qualitatively the injected parts for defects and density. The results show that the mold obtained by rapid prototyping presented some drawbacks such as adhesion with the injection material. Was also observed a high impact on process times due to the thermal characteristics of the material. The application of nonstick coating caused deformations that scraped the inserts. The release agents that stood out were the silicone oil and the formulation with soap bubbles that generated bubbles in the parts.

Keywords: Rapid Tooling, Ceramic Injection, Rapid Prototyping.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Desenho esquemático do LPIM.....	16
Figura 2.2 - Princípio da tecnologia Polyjet.....	19
Figura 3.1 - Geometrias a serem moldadas.....	23
Figura 3.2 - Desenho em corte do molde.....	24
Figura 3.3 - Sistema de resfriamento do porta-moldes	25
Figura 3.4 - Configuração do experimento.....	25
Figura 3.5 - Geometrias e sistemas de distribuição	26
Figura 3.6 - Insertos em corte: indicação dos pontos de medição de temperatura e canais de injeção principais	27
Figura 3.7 - Insertos Fabricados: a) ABS- <i>like</i> e b) alumínio.....	28
Figura 3.8 - Teste de cobertura em bloco	29
Figura 3.9 - Cobertura dos insertos.....	29
Figura 4.1 - Análise térmica do ciclo de injeção para os dois insertos.....	35
Figura 4.2 - Testes com o desmoldante glicerina	36
Figura 4.3 - Resumo da análise qualitativa	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparativo de propriedades dos materiais	20
Tabela 3.1 - Componentes da suspensão cerâmica.....	30
Tabela 3.2 - Parâmetros de injeção para obtenção das amostras.....	31
Tabela 4.1 - Tempos encontrados para cada etapa do processo.....	34
Tabela 4.2 - Resultados dos desmoldantes	36
Tabela 4.3 - Análise de densidade.....	38
Tabela 4.4 - Comparativo de custo e tempo vs. tecnologia de fabricação.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
3DP	<i>Tridimensional printing</i>
AA	<i>Aluminum Association</i>
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CNC	Comando numérico computadorizado
EOSINT	Nome comercial
FDM	<i>Fused deposition modeling</i>
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
HDT	<i>Heat Deflection Temperature</i>
HPIM	<i>High Pressure injection Molding</i>
IJP	<i>Ink Jet Printing</i>
LNTP	Laboratório de Novas Tecnologias de Produção
LOM	<i>Laminated object manufacturing</i>
LPIM	<i>Low Pressure injection Molding</i>
LPRA	Laboratório de Prototipagem Rápida
PLT	<i>Paper Lamination Technology</i>
PTFE	Politetrafluoretileno
RP	<i>Rapid Prototyping</i>
RT	<i>Rapid Tooling</i>
SLA	<i>Stereolithography</i>
RT	<i>Rapid Tooling</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
UV	Ultravioleta
VO	Veículo Orgânico

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	11
1.2	JUSTIFICATIVA	12
1.3	OBJETIVOS DO ESTÁGIO	13
1.3.1	Objetivo Geral do Estágio	13
1.3.2	Objetivos específicos do estágio	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO EM BAIXA PRESSÃO	14
2.2	PARÂMETROS DO PROCESSO LPIM	17
2.3	PROCESSO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA E FERRAMENTAL RÁPIDO	18
2.3.1	Tecnologia IJP - Polyjet®	18
2.3.2	Ferramental Rápido Direto	20
2.4	MOLDES EM LPIM	21
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	GEOMETRIA DE ESTUDO	23
3.2	MOLDE EXPERIMENTAL	24
3.2.1	Porta Moldes	24
3.2.2	Insertos	26
3.3	TESTE DE COBERTURA COM PTFE	28
3.4	SUSPENSÃO CERÂMICA	29
3.5	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	30
3.6	ANÁLISE DAS AMOSTRAS	32
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	INTRODUÇÃO	33
4.2	RESULTADOS DE PARÂMETROS DE PROCESSO	33
4.2.1	Tempos de processo	33
4.2.2	Análise Térmica do Molde	34
4.2.3	Desmoldantes	35
4.2.4	Análise qualitativa das peças	37
4.2.5	Medidas de densidade nas peças	38
4.3	ESTUDO DOS CUSTOS DE FABRICAÇÃO DOS INSERTOS	39

5. CONCLUSÃO	41
BIBLIOGRAFIA	43

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Desde a revolução industrial os sistemas de produção bem como os modelos de negócio vem sendo continuamente atualizados. Passou-se pela fase de produção em massa, onde o objetivo era produzir peças baratas e sem possibilidade de customização. O modelo evoluiu para algo totalmente oposto na atual era da informação (início nos idos de 2000), o chamado modelo de customização em massa, cujo objetivo é produzir produtos customizáveis com baixo custo e agora produtos voltados para sustentabilidade. Este novo modelo de negócios utiliza os recursos da engenharia para vender os produtos antes mesmo de se possuir os meios definitivos de produção (JOVANE et al, 2008).

Entre os recursos que possibilitaram estas mudanças estão as tecnologias de ferramental rápido (RT – do inglês *Rapid Tooling*) e prototipagem rápida (RP – do inglês *Rapid Prototyping*). Segundo Volpato *et al* (2007) a prototipagem rápida é uma tecnologia que permite a fabricação através da adição de material em forma de camadas planas sucessivas, permitindo fabricar componentes físicos em três dimensões (3D), com informações obtidas diretamente do modelo geométrico gerado no sistema CAD, de forma rápida, automatizada e totalmente flexível. Essa tecnologia é parte das técnicas de Ferramental Rápido, onde as cavidades do molde podem ser construídas diretamente por Prototipagem Rápida.

O Laboratório de Prototipagem Rápida (LPRA) da Universidade de Caxias do Sul opera desde 2009 no Centro de Ciências Exatas e Tecnologia sob a coordenação do Prof. Dr. Carlos Alberto Costa. O LPRA foi criado com recursos do PROMOVE - Laboratórios de Inovação da FINEP com objetivo de promover inovação de produtos de diferentes tipos de materiais (metais, polímeros e cerâmicos) junto às empresas da região e do país. Equipado com uma impressora 3D Objet Eden 350V, que possibilita construir praticamente qualquer objeto em resinas poliméricas, este laboratório também contribui para atividades de ensino e pesquisa na Universidade. No laboratório também são realizadas pesquisas na área de prototipagem rápida, ferramental rápido e tecnologias de suporte ao desenvolvimento de produtos, tais como o uso de peças confeccionadas por impressão 3D para peças “*one of a kind*” e uso de peças prototipadas como insertos

de sacrifício em peças de injeção de cerâmica. Uma das áreas de interesse das pesquisas realizadas junto ao LPRA tem sido a de peças técnicas em cerâmica.

O mercado de injeção de cerâmica movimentava 11 bilhões de dólares por ano e fazem parte deste mercado: velas de ignição, isoladores, conectores, ferramentas de corte, guias para indústria têxtil, filtros, implantes biomédicos e sensores (JUDSON; STARR, 2013). Uma alternativa para a produção de peças complexas a um custo menor é o processo de moldagem por injeção em baixa pressão (ZORZI; PEROTTONI; JORNADA, 2004). Os moldes podem ser de material termoplástico, latão, alumínio ou Zamak, entre outros.

Dentro desse cenário, o trabalho de conclusão aqui proposto, aborda a aplicação de materiais obtidos pela tecnologia de prototipagem rápida, aplicados como ferramentas rápidas na fabricação de peças cerâmicas injetadas em baixa pressão.

1.2 JUSTIFICATIVA

A tecnologia de injeção de cerâmica em baixa pressão não é extensamente conhecida como a injeção de termoplásticos, ou a injeção de cerâmica convencional (alta pressão) e se trata de uma tecnologia relativamente nova. O desempenho do processo possui grande relação com o molde e suas características. A possibilidade de construir moldes com maior velocidade e mais baratos, utilizando as tecnologias acima mencionadas é uma importante ferramenta para o desenvolvimento do processo injeção de cerâmica a baixa pressão. Também é uma importante ferramenta para o desenvolvimento de produtos das empresas do ramo, que podem utilizá-la para produzir lotes iniciais, para lançar os produtos antes mesmo de vender os produtos. Assim os riscos associados a um novo produto são diminuídos e as chances de sucesso aumentam.

O uso da tecnologia de ferramenta rápida e prototipagem para construção de moldes de injeção de cerâmica já foi evidenciado por alguns autores. Judson e Starr (2013) construíram uma ferramenta de injeção de cerâmica de geometria simples, por meio da prototipagem rápida utilizando a tecnologia de SLA (estereolitografia) com resina epóxi. A força de extração em moldes do gênero foi analisada por Hemrick, Starr e Rosen (2001). O método indireto de cadeia de prototipagem rápida (*Rapid Prototyping Process Chain*), onde a peça modelo obtida

pela impressora 3D é utilizada para construir um molde de silicone, foi utilizado por Knitter *et al.* (2001). Contudo, nenhum autor estudou o uso de moldes de resinas poliméricas, como o “*ABS-like*”, aplicado a injeção de cerâmica. Também a inclusão de um revestimento antiaderente em cavidades confeccionadas por prototipagem não é muito comum. Assim faz-se necessário um estudo utilizando peças de geometrias complexas, com paredes finas e com grandes áreas de extração. Este estudo se torna mais importante pelo fato de o LPRA já possuir um os insertos construídos em alumínio por usinagem, além de dados experimentais. Isto possibilita uma comparação de performance com uma referência.

1.3 OBJETIVOS DO ESTÁGIO

1.3.1 Objetivo Geral do Estágio

Estudar a aplicação de insertos fabricados por meio de ferramental rápido com a resina Stratasys “*ABS-like*” em um molde para injeção de peças cerâmicas pelo processo de injeção em baixa pressão.

1.3.2 Objetivos específicos do estágio

- Estudar as propriedades do material de prototipagem rápida a ser utilizado, tais como condutividade térmica, adesão ao material de injeção, aceitação da cobertura antiaderente.
- Estudar parâmetros de fabricação envolvidos no processo de injeção de cerâmica a baixa pressão.
- Desenvolver e fabricar um porta moldes experimental com conceitos genéricos para testes.
- Fabricar insertos no material em questão (*ABS-like*) e em alumínio.
- Definir e realizar experimentos para comparação entre os dois tipos de materiais, com e sem cobertura antiaderente.
- Traçar um comparativo de custo entre um material tradicional e os insertos confeccionados por prototipagem rápida.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO EM BAIXA PRESSÃO

Materiais cerâmicos são na sua maioria materiais de natureza cristalina muito estáveis e de ponto de fusão elevado (HARPER, 2001). Eles podem ser divididos em duas grandes áreas de acordo com as matérias-primas utilizadas: cerâmicas tradicionais, que utilizam matérias-primas encontradas facilmente na natureza e cerâmicas avançadas que utilizam materiais sintéticos com alto grau de pureza. As pesquisas e avanços na área levaram ao crescimento da área de cerâmicas avançadas: as principais são a alumina, zircônia, carbonetos e nitretos de silício. As combinações de propriedades específicas possibilitam muitas aplicações como por exemplo aplicações elétricas, magnéticas e ópticas (CALLISTER, 2006). Porém as elevadas propriedades mecânicas das cerâmicas avançadas criam desafios na fabricação, no sentido de que a usinagem destes materiais é muito difícil e de custo elevado, logo o pó necessita ser conformado na forma e dimensões mais próximas possíveis da peça final. Dentre os processos disponíveis para conformação do pó cerâmico está a moldagem por injeção (ANDREOLA, 2007).

A moldagem por injeção de pó (PIM – *Powder Injection Molding*) é um método capaz de fabricar peças cerâmicas ou metálicas com formas complexas e que vem sendo utilizado desde a década de 30. Esta tecnologia vem atraindo empresas devido às suas características tais como: precisão e acabamento superficial, baixos custos (larga escala), flexibilidade de forma e materiais (GERMAN; BOSE, 1997). O processo de injeção de cerâmica pode ser categorizado em processo de baixa pressão, até 0,5 MPa (LPIM – *Low Pressure Injection Molding*) e alta pressão, a partir de 0,5 MPa (HPIM – *High Pressure Injection Molding* - TOY *et al*, 1995). Este trabalho irá tratar exclusivamente dos processos de baixa pressão (LPIM). O LPIM é um processo mais simples que permite fazer a mistura dos componentes diretamente na máquina, utiliza pressões menores e possibilita utilização de moldes mais simples, e em uma máquina mais simples, e conseqüentemente o custo do processo é menor.

Em síntese, o princípio desse processo é injetar um composto de pó e veículo orgânico em uma cavidade, após o veículo orgânico é removido e a peça é sinterizada.

Os seguintes passos são executados para se obter as peças produzidas pelo processo LPIM (TOY *et al*, 1995):

- a) Preparação da mistura pó-veículo orgânico;
- b) Homogeneização da mistura pó-veículo orgânico;
- c) Injeção;
- d) Remoção do veículo orgânico;
- e) Sinterização e acabamento.

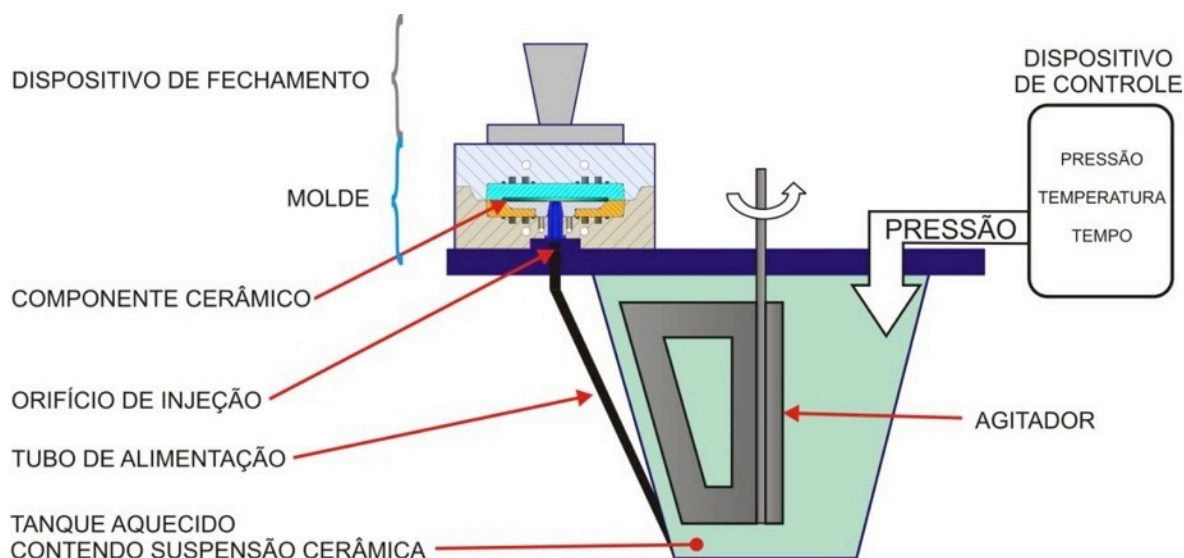
A matéria-prima é preparada misturando o pó cerâmico com um veículo orgânico (VO), composto ao menos por um ligante e um dispersante. A função dos aditivos na mistura é proporcionar uma dispersão uniforme das partículas do pó, assim como auxiliar o fluxo para preenchimento uniforme das cavidades. Segundo Müller, Bauer e Ritzhaupt-Kleissl (2005), os veículos orgânicos com base em parafina são muito aceitos no processo de LPIM. São baratos, não tóxicos, não formam bolhas durante a fase de remoção e sua baixa viscosidade comporta altas cargas de sólido.

A qualidade da peça final tem íntima relação como a homogeneização da mistura, este processo é realizado diretamente no tanque da injetora por um sistema de pás misturadoras, mostrado na Figura 2.1 (desenho esquemático da injetora). Durante homogeneização, a massa é agitada sob ação de vácuo a fim de remover as bolhas de ar presentes na mistura.

Após a obtenção da massa e sua devida homogeneização pode-se imediatamente realizar a injeção. O processo de injeção pode ser dividido em três etapas: injeção, solidificação e extração (PELTSMAN; MEDVEDOVSKI, 2012). Para injeção, o molde é inserido sobre o bocal de saída da máquina e fixado pelo dispositivo de travamento, que realiza o travamento do molde durante a injeção (Figura 2.1). Como a mistura possui baixa viscosidade quando fundida no interior do tanque, o preenchimento da cavidade se dá por pressão de ar no interior do tanque, forçando o material pelo tubo alimentador até o interior do molde. O resfriamento é bastante rápido e o tempo de ciclo em geral varia de alguns segundos até vários minutos (PELTSMAN; MEDVEDOVSKI, 2012). Após a injeção, o dispositivo de travamento abre e a peça pode ser removida do molde. Os parâmetros deste processo serão abordados com mais detalhes em uma próxima seção deste trabalho. Após o processo de injeção a peça é chamada “corpo a verde”. Em

seguida ele é submetido a um processo de remoção do veículo orgânico (*debinding*).

Figura 2.1 - Desenho esquemático do LPIM



Fonte: Thomazi, 2014

Grande parte dos ligantes utilizados no LPIM possuem baixa viscosidade, uma característica interessante para a injeção, porém isso dificulta o processo de remoção dos ligantes à alta temperatura devido o risco de deformação nas peças, uma vez que os ligantes apresentam baixa viscosidade nessas temperaturas (ZORZI; PEROTTONI; JORNADA, 2003). O processo de remoção dos ligantes consiste em submeter a peça a um processo térmico, normalmente em atmosfera não controlada. Um processo bastante comum é o processo por leito de pó, (em inglês, *wicking*). Neste processo as peças são colocadas em um recipiente contendo um leito de pó de alumina; este pó auxilia a extração dos ligantes transferindo o vapor por meio de capilaridade e impedindo a formação de defeitos nas peças.

A etapa final da produção das peças por LPIM é a sinterização. Esta etapa é responsável pela consolidação mecânica das peças, que se dá devido aos fenômenos difusivos que ocorrem a temperaturas em torno dos 1600°C (ANDREOLA, 2007).

2.2 PARÂMETROS DO PROCESSO LPIM

A qualidade das peças produzidas pelo processo de LPIM depende de três principais fatores: projeto do molde, reologia dos materiais e parâmetros de injeção.

Como parâmetros de injeção pode-se definir: a pressão de injeção, a velocidade de injeção, tempo de injeção, tempo de recalque, a temperatura do molde e o resfriamento de molde (direção do fluxo de calor e área). A pressão de injeção aumenta a densidade da peça, na faixa de 0,5 – 0,7 MPa, após 0,7 MPa este efeito não é observado (PELTSMAN; MEDVEDOVSKI, 2012). A temperatura do fundido tem relação direta com a fluidez do mesmo: quanto maior a temperatura maior será a fluidez e melhor será o empacotamento do material dentro das cavidades do molde, ou seja a densidade será maior e a contração após moldagem é menor. A temperatura de processamento situa-se na faixa 60-90°C para melhores resultados no LPIM. Após os 100°C inicia-se a evaporação dos ligantes e conseqüentemente a possível criação de porosidade e defeitos na peça final.

Segundo Peltsman e Medvedovski (2012), a velocidade de injeção não possui grande influência na qualidade do processo LPIM. Ela é dependente da fluidez do material juntamente com a pressão de injeção e as dimensões do molde de injeção. A velocidade enquanto na ordem de 25 – 100 cm³s⁻¹, produz peças de boa qualidade; valores altos de velocidade geram aprisionamentos de ar.

A temperatura do molde e sua diferença em relação ao material de injeção também são parâmetros de substancial importância para a qualidade das peças. No caso do LPIM, a solidificação do fundido ocorre em camadas, iniciando-se na superfície mais externa e com direção ao interior da peça. Se a temperatura do molde for alta, (ΔT pequeno) a solidificação ocorrerá devagar, o que pode gerar deformações na peça e menor densidade, assim como intensificada a adesão nas paredes do molde. No caso a temperatura do molde ser menor (ΔT grande), a densidade da peça será maior. Este comportamento se deve ao mecanismo de cristalização da parafina. Elevadas diferenças de temperatura entre o molde e o material geram cristais menores e conseqüentemente, maior homogeneidade entre as camadas de cristais. Do contrário, com menor ΔT as camadas mais externas apresentam cristais maiores e assim, ocorre migração da parafina para as partes mais externas da peça (PELTSMAN; MEDVEDOVSKI, 2012).

2.3 PROCESSO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA E FERRAMENTAL RÁPIDO

Os processos de prototipagem rápida (RP, *Rapid Prototyping*), ou processo de manufatura por adição de camadas, que também são conhecidos por “impressão 3D”, são bastante difundidos nos dias de hoje. Eles permitem fabricar modelos físicos tridimensionais (3D) diretamente a partir de um desenho em CAD (do inglês, *Computer Aided Design*). Os modelos são construídos por camadas, não havendo necessidade de utilização de outros tipos de ferramentas. As técnicas de RP permitem a fabricação de geometrias impossíveis de serem obtidas pelos processos de fabricação convencionais (HAGUE, MANSOUR; SALEH, 2003).

Atualmente existem mais de 20 destes sistemas e uma série de fabricantes deste tipo de tecnologia que funcionam partindo do mesmo princípio de manufatura por camada. As tecnologias podem ser classificadas em três categorias, de acordo com o estado inicial da matéria-prima:

- a) Baseado em líquido: impressão por jato de tinta (IJP), estereolitografia (SL);
- b) Baseado em sólido: fusão e deposição (FDM), manufatura laminar de objetos (LOM), tecnologias com lâminas de papel (PLT);
- c) Baseado em pó: sinterização seletiva a laser (SLS), sinterização a laser (EOSINT), impressão tridimensional (3DP).

Segundo Volpato *et al* (2007), algumas destas tecnologias foram criadas apenas para fins de visualização e não são apropriadas para fins de testes e utilização funcional. Este trabalho irá tratar especificamente da tecnologia IJP que é apropriada para utilização funcional. Pode-se encontrar mais informações sobre ela na próxima seção.

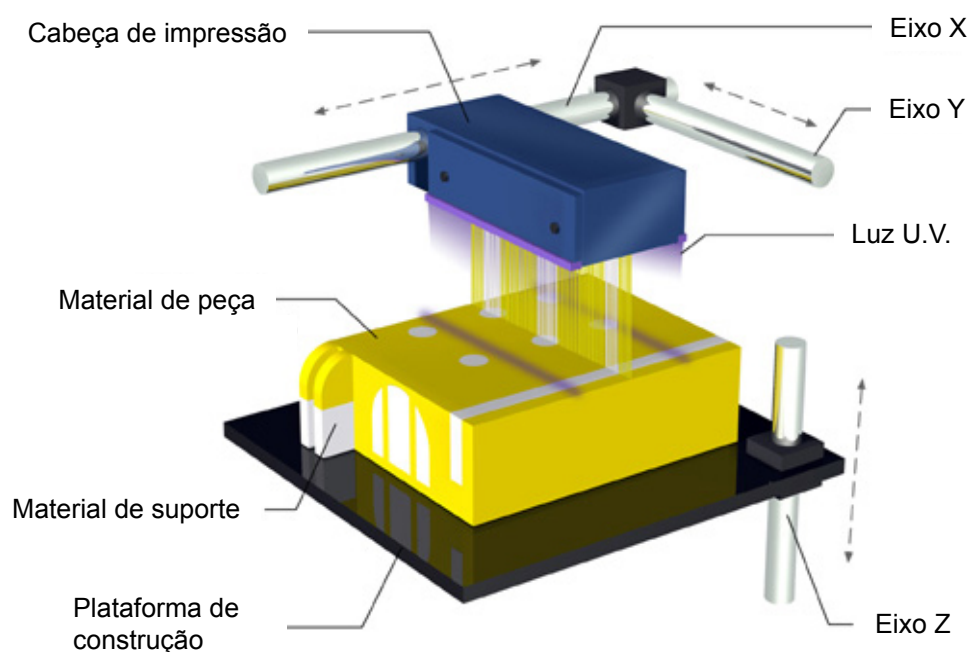
2.3.1 Tecnologia IJP - Polyjet®

A tecnologia IJP (*Ink Jet Printing*) - *Polyjet* pertence à empresa Stratasys, adquirida da companhia Objet Geometries Ltd. originada em Israel no ano de 1998.

Trata-se de uma tecnologia recente onde uma resina fotocurável é depositada em forma de microgotas sobre uma bandeja que se move no eixo Z. O processo de deposição é realizado pelos microfuros presentes nas cabeças de jato de resina, com uma resolução 600 x 300 pontos por polegada, e após a deposição a

resina é curada por luz ultravioleta. Cada camada de resina é depositada com espessura de $16\mu\text{m}$ ou $32\mu\text{m}$; este parâmetro influencia diretamente a qualidade das peças. A Figura 2.2 mostra o princípio da tecnologia IJP. Devido ao processo ser baseado em líquido se faz necessário a adição de suporte para as camadas; o suporte é depositado da mesma forma com a diferença de ser um material na forma de gel, que é facilmente removido por jato de água após o término do processo. Esse método dispensa qualquer outro pós-processamento (VOLPATO *et al*, 2007).

Figura 2.2 - Princípio da tecnologia Polyjet



Fonte: Volpato (2007)

As principais vantagens do processo IJP são a versatilidade, a grande precisão dimensional e as propriedades mecânicas das resinas obtidas, que podem ser utilizadas funcionalmente (BALIC; VAUPOTIC; BREZOCNIK, 2006).

Outra vantagem é que uma variedade de resinas é oferecida pelo fabricante com diferentes propriedades mecânicas, possui modelos que simulam polímeros de engenharia e até modelos que simulam borrachas. Recentemente a Stratasys desenvolveu uma nova tecnologia, chamadas resina digital, que permite combinar diferentes resinas para obter novas com diferentes propriedades mecânicas. A resina *ABS-like (Digital ABS)* combina resinas com resistência térmica e resistência ao impacto para obter propriedades mecânicas muito similares às de uma típica

resina ABS de injeção. Na Tabela 2.1 são mostradas as propriedades mecânicas da resina de prototipagem comum VeroGray (RGD850) *versus* resina ABS-like (RGD5160-DM) *versus* resina ABS para injeção (Styrolution Novodur® P2H-AT). Pode-se verificar que a resina ABS-like apresenta propriedades mecânicas próximas as do ABS e superiores em relação a resina comum VeroGray, principalmente quanto à resistência térmica, comparado por meio da propriedade de temperatura de deflexão térmica - HDT (do inglês, *Heat Deflection Temperature*). Este avanço possibilita a aplicação da resina ABS-like para construção de moldes rápidos para injeção.

Tabela 2.1 - Comparativo de propriedades dos materiais

Propriedade	Norma ASTM	Unid.	VeroGray RGD850	ABS-like RGD5160-DM	Novodur ®P2H-AT
Densidade (polimerizado)	D-792	g/m ³	1,17-1,18	1,17-1,18	1,05
Resistência a Tração	D-638-03	MPa	50-65	55-60	N/D
Alongamento na ruptura	D-638-05	%	10-25	25-40	N/D
Módulo de elasticidade	D-638-04	MPa	2000-3000	2600-3000	2500
Resistência a Flexão	D-790-03	MPa	75-110	65-75	70
Módulo de Flexão	D-790-04	MPa	2200-3200	1700-2200	2400
HDT [0,45 MPa, Mét. B]*	D-648-06	°C	45-50	92-95	97

Fonte: Stratasy (2013), Styrolution (2013)

* Pressão e método utilizada para o ensaio (previstos na ASTM)

** N/D – Significa dados não disponíveis

2.3.2 Ferramental Rápido Direto

Os processos de ferramental rápido (RT, do inglês *Rapid Tooling*) consistem em processos para obtenção de um molde ou ferramental em caráter protótipo ou para pequenos lotes de produção de forma rápida e barata. Esta tecnologia geralmente trabalha com a confecção dos insertos, macho e cavidade, que serão montados em um porta-molde. Existem diversos métodos de produção de insertos e eles classificam-se em direto ou indireto. Os métodos indiretos são aqueles em que os insertos são fabricados a partir de um modelo obtido por prototipagem rápida, tais como os moldes de silicone, moldes metálicos por pulverização e moldes de resina epóxi por vazamento (CHUA; HONG; HO, 1999).

São classificados por método direto quando os insertos são obtidos diretamente por meio de usinagem CNC em resina, ou materiais metálicos ou também quando os insertos são obtidos diretamente por meio de prototipagem rápida. Nesta técnica os insertos que são utilizados na injeção de polímeros, são produzidos diretamente pelo processo de RP e podem ser diretamente utilizados após a impressão. Seu tempo de fabricação é bastante pequeno, menos que uma semana, e a vida útil varia de acordo com o processo em que é utilizado, por exemplo o processo SL faz de 10 a 50 ciclos (VOLPATO *et al*, 2007).

2.4 MOLDES EM LPIM

Segundo Peltzman e Medvedovski (2012), os moldes para o processo LPIM são moldes simples e de baixo custo graças a baixa pressão de trabalho e geralmente são metálicos, manufaturados em alumínio, aço ou bronze. A adição de uma fina camada antiaderente de PTFE, conhecido comercialmente como Teflon®, é uma prática utilizada para reduzir ou eliminar o uso de agente desmoldante (KRINDGES *et al*, 2008).

A injeção de termoplásticos e a injeção de cerâmica em alta pressão são processos de fabricação extensivamente conhecidos e dispõem de ferramentas para prever o comportamento do processo. Em contraste, no processo de LPIM estas ferramentas não estão disponíveis. A ausência desse tipo de apoio computacional para simulação, faz com que o processo para obtenção de uma peça boa seja a base de tentativa e erro podendo levar diversos meses. Assim, uma possível vantagem é a utilização de tecnologias de RT no desenvolvimento dos moldes para LPIM. A possibilidade de produzir-se moldes em um curto espaço de tempo e com um baixo custo torna o processo mais atrativo. Ainda o cliente pode fazer testes e melhorias no produto iniciais e até mesmo vender o produto antes de ter os meios de produção definitivos (JUDSON E STARR, 2013).

Segundo Hemrick, Starr e Rosen (2001) para o processo de LPIM, que trabalha a temperaturas e pressões menores que os processos de injeção convencionais, moldes rápidos confeccionados por estereolitografia (SLA) são uma maneira barata e rápida de produzir moldes baratos e capazes de produzir centenas de peças. Contudo apesar das grandes vantagens de construir moldes para LPIM por SLA ainda existem alguns problemas. Entre eles está a adesão entre a peça e o

molde de injeção, que é fortemente influenciado pelas propriedades térmicas do material do molde.

Dentro deste contexto surgem questionamentos para quem utiliza o processo de LPIM: se é possível utilizar os moldes rápidos propostos e quais as implicações desta utilização. Além disso, seria interessante saber até que ponto a utilização desta nova tecnologia é vantajosa se comparado aos métodos tradicionais. Desta forma, esse trabalho pretende responder algumas dessas questões com a aplicação de ferramentas rápidas, fabricadas pelo processo de prototipagem rápida, no processo de injeção de cerâmica em baixa pressão.

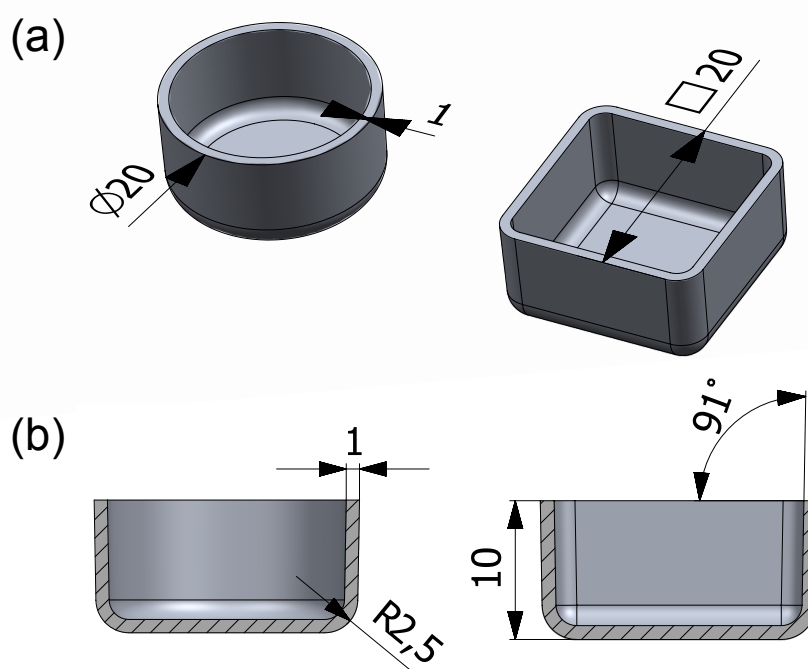
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos o procedimento experimental desenvolvido, os materiais empregados e os métodos utilizados para obtenção dos resultados.

3.1 GEOMETRIA DE ESTUDO

A geometria definida para estudo no escopo desse trabalho possui parede fina em forma prismática, sendo duas geometrias básicas: uma de forma cilíndrica e outra de forma retangular. Um dos motivos para escolha dessa geometria é devido ao fato do grupo de pesquisa possuir um molde para a mesma geometria utilizando a liga de alumínio AA7075-T6, o que facilita a comparação com resultados já obtidos anteriormente. Somado a isso, tal geometria acentua também aspectos críticos na injeção de peças cerâmicas tais como, paredes finas, geometria de caixa e conseqüentemente extração delicada. Contudo, elas respeitam os requisitos gerais de produtos moldados, tais como angulo de extração e presença de raios internos. A Figura 3.1 mostra a geometria e as dimensões das peças propostas (dimensões em milímetros).

Figura 3.1 - Geometrias a serem moldadas (a) Vistas isométrica e (b) vistas em corte

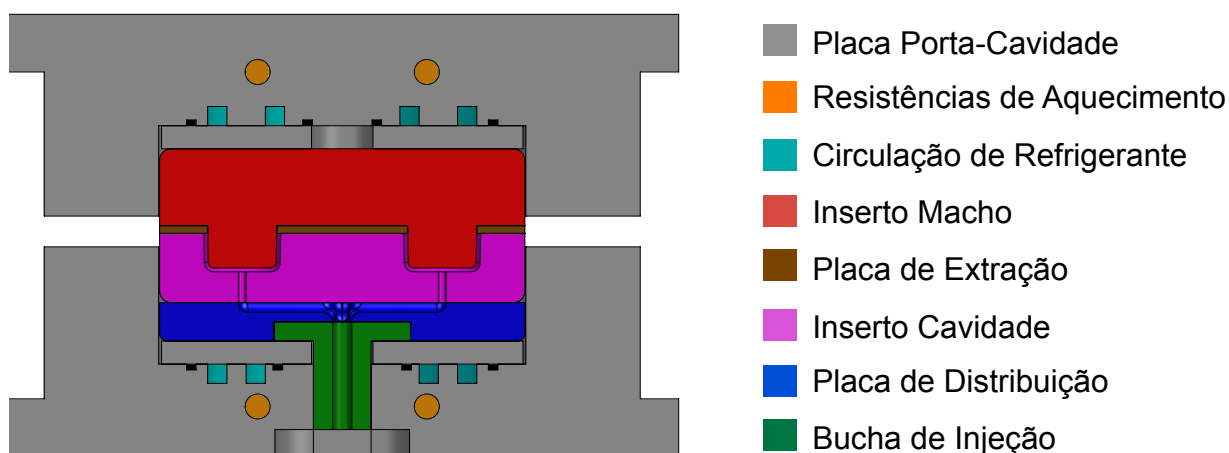


Fonte: Autor

3.2 MOLDE EXPERIMENTAL

O molde experimental desenvolvido e fabricado nesse trabalho é dividido em duas partes: insertos e porta moldes. O conjunto é mostrado na Figura 3.2. Objetivou-se, com tal molde, o desenho de uma estrutura genérica, com sistemas de aquecimento e refrigeração, e que possa ser utilizada para futuros trabalhos.

Figura 3.2 - Desenho em corte do molde



Fonte: Autor

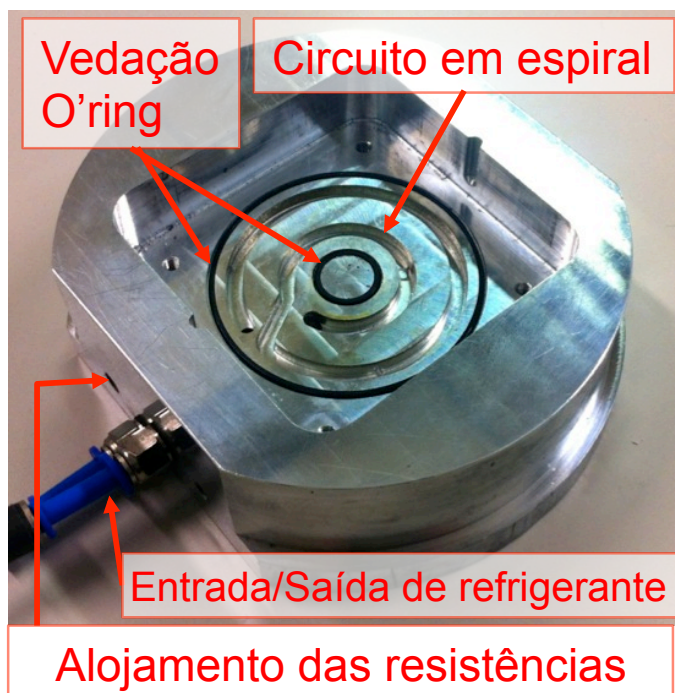
3.2.1 Porta Moldes

O porta moldes foi projetado visando o fácil manuseio, uso de insertos intercambiáveis e, principalmente, possibilitar o controle de temperatura dos insertos. Devido a sua concepção o mesmo poderá ser usado em futuros experimentos do grupo de pesquisa. O porta moldes foi fabricado no Laboratório de Novas Tecnologias de Produção (LNTP) da Universidade de Caxias do Sul em um centro de usinagem Dyna Myte DM 4500.

O sistema de resfriamento foi projetado em forma de espiral, sendo este conceito compacto e proporcionador de boa área de troca térmica. Este sistema é mostrado na Figura 3.3.

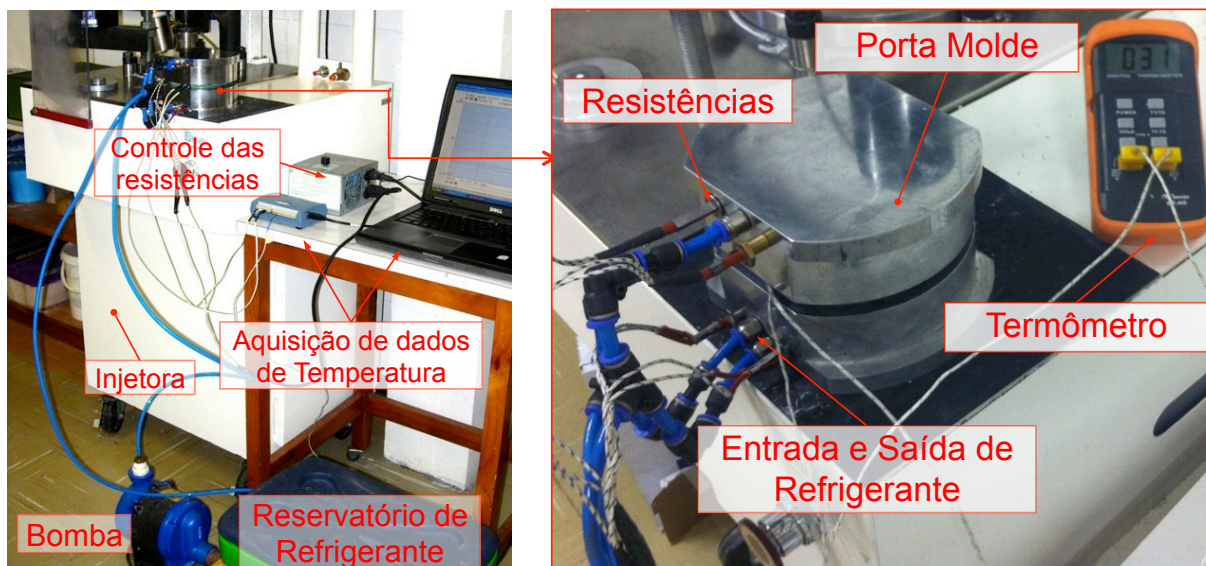
Para o aquecimento do molde foi projetado um sistema baseado em resistências do tipo cartuchos, sendo utilizadas 4 resistências cartucho de $\varnothing 6\text{mm} \times 130\text{mm}$ com potência nominal de 150W cada (2 para a parte superior e 2 para a parte inferior). A Figura 3.4 mostra a configuração do experimento.

Figura 3.3 - Sistema de resfriamento do porta-moldes



Fonte: Autor

Figura 3.4 - Configuração do experimento



Fonte: Autor

O controle das resistências é realizado por um *dimmer*, que possibilita variar a carga nas resistências de forma proporcional.

O conjunto de porta moldes e insertos, possui dimensões 136mm x 175mm x 115mm, com massa total de aproximadamente 5 kg e foi construído com a liga de alumínio AA 7075-T6.

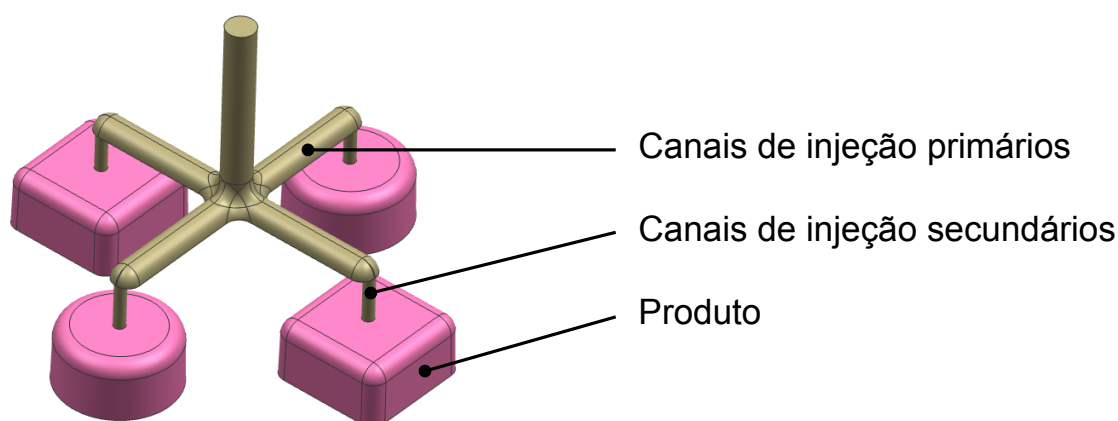
3.2.2 Insertos

Os insertos são o objeto principal de estudo deste trabalho e aqui são denominados inserto macho e inserto cavidade. Os insertos são os componentes responsáveis pela conformação do produto final.

Neste trabalho optou-se por utilizar 4 cavidades com a geometria das peças a serem injetadas, sendo duas cavidades para a geometria cilíndrica e duas para a quadrangular (Figura 3.5).

Para isso as peças foram distribuídas em um arranjo retangular e criou-se uma placa de distribuição que conduz o fluxo de material do orifício da injetora até os canais de injeção secundários (Figura 3.2). A placa de distribuição foi fabricada por usinagem em alumínio AA7075-T6. Os pontos de injeção ficam localizados no centro de cada peça, perpendiculares ao fundo das peças, com o objetivo de obter um fluxo homogêneo durante o preenchimento. Na Figura 3.5 observa-se o arranjo das cavidades e o sistema de injeção.

Figura 3.5 - Geometrias e sistemas de distribuição

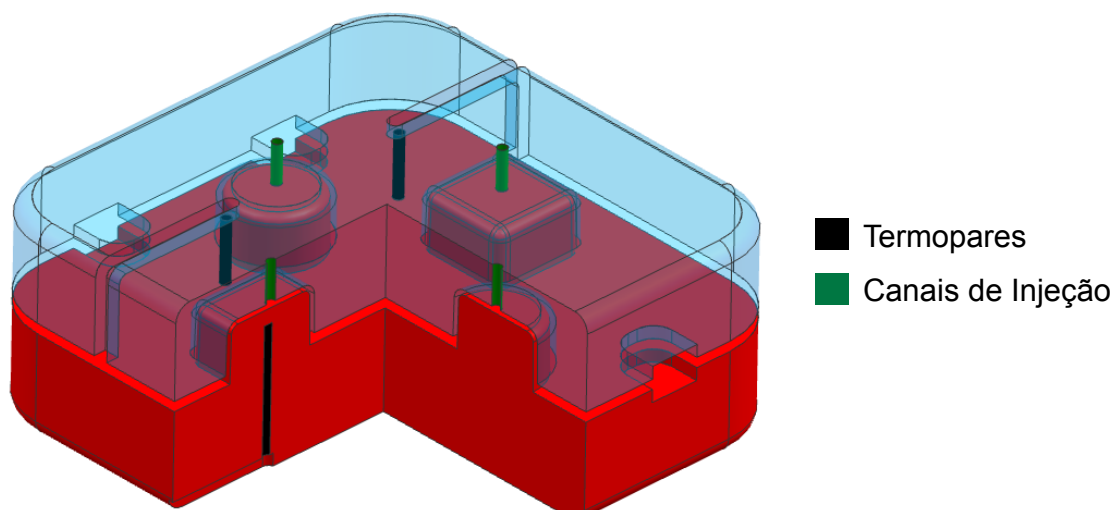


Fonte: Autor

No projeto dos insertos foram considerados 4 pontos de medida de temperatura simétricos distantes 1mm da superfícies de moldagem, mostrados na

Figura 3.6. No experimento apenas dois deles foram utilizados, sendo um para o macho e um para a cavidade.

Figura 3.6 - Insertos em corte: indicação dos pontos de medição de temperatura e canais de injeção principais



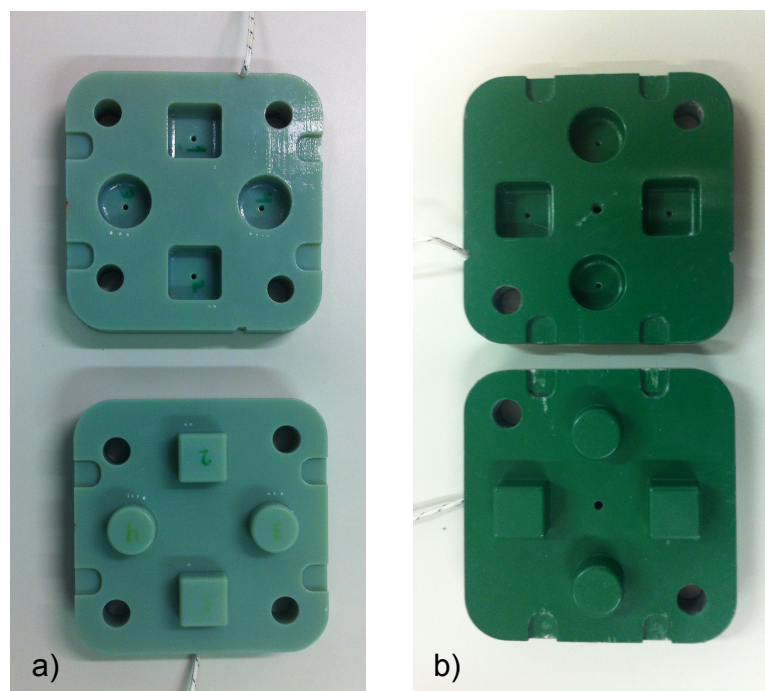
Fonte: Autor

Para a função de extração foi utilizada uma placa de extração móvel do tipo terceira placa, que é mostrada na Figura 3.2. Esta placa se situa entre os dois insertos. No momento em que o molde é aberto ela exerce uma força nas extremidades das peças para que elas sejam liberadas do macho.

Os insertos produzidos dentro do conceito de ferramental rápido (*Rapid Tooling*) foram produzidos utilizando os recursos de prototipagem rápida, em uma máquina Stratasys Connex 500 com a resina ABS-like (RGD5160-DM). Segundo Kovaks (2011), a condutividade para as resinas IJP é de cerca de 0,2 W/(m.K). Esta etapa foi realizada com o auxílio da empresa Stratasys, fabricante dos equipamentos de prototipagem e parceira no projeto de cooperação, em sua sede localizada em Israel e enviadas à UCS. A Figura 3.7a mostra os insertos produzidos.

O par de insertos que foi utilizado para a comparação já existia e já havia sido utilizado pelo grupo de pesquisa. Ele foi confeccionado em alumínio AA7075-T6 e recebeu uma cobertura antiaderente de PTFE (Teflon® DuPont). Os insertos de alumínio podem ser visualizados na Figura 3.7b. Segundo a ASM *International* (1990), esta liga de alumínio apresenta uma condutividade térmica de 130 W/(m.K).

Figura 3.7 - Insertos Fabricados: a) ABS-like e b) alumínio



Fonte: Autor

3.3 TESTE DE COBERTURA COM PTFE

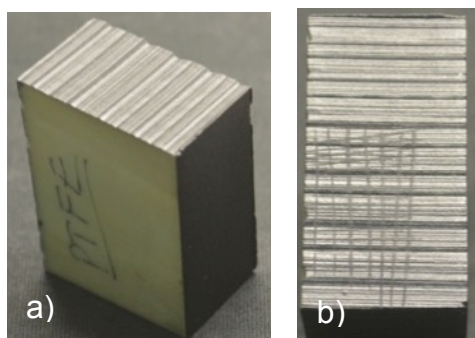
Eventualmente, coberturas antiaderentes são utilizadas nos moldes de injeção de cerâmica em baixa pressão (KRINDGES *et al*, 2008). Dentro do escopo desse trabalho, foi realizado um teste experimental para a aplicação de cobertura antiaderente de PTFE (Teflon® DuPont), nos insertos de material ABS-like, na empresa CND Revestimentos Industriais¹.

Este processo consiste basicamente em três etapas: limpeza, cobertura e cura. O processo de cura é o mais severo, e nesta etapa a peça é exposta a uma temperatura de 180°C por 15 minutos. Foi realizado um teste de cobertura inicial para avaliar a possibilidade de realizar o processo nos insertos; um bloco (50mm x 60mm x 20mm) foi submetido ao processo de cobertura.

A avaliação visual mostrou que o processo ocorreu sem grandes danos a peça, que é mostrada na Figura 3.8a. Também foi realizado um teste de corte cruzado, mostrado na Figura 3.8b, para verificar a adesão da camada, os resultados foram satisfatórios.

¹ www.cndrevestimentos.com.br

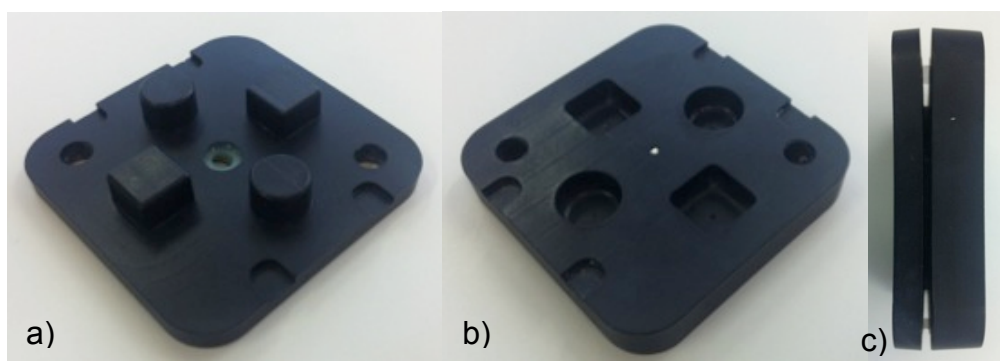
Figura 3.8 - Teste de cobertura em bloco: a) peça com cobertura; b) teste de corte cruzado



Fonte: O Autor

Tal etapa, permitiu realizar a cobertura nos insertos fabricados, mostrado na Figura 3.9. O processo gerou um empenamento considerável nos insertos, bem como expansão dimensional. Em seguida foram realizadas as medições: o inserto macho (Fig. 3.9a), que possuía menor espessura de base, apresentou 1,64 mm de diferença na planicidade; enquanto a cavidade (Fig. 3.9b), com maior espessura de base, apresentou 0,77 mm. Este empenamento resultante pode ser melhor visualizado na Figura 3.9c.

Figura 3.9 - Cobertura dos insertos: a) macho; b) cavidade; c) conjunto (vista lateral)



Fonte: O Autor

3.4 SUSPENSÃO CERÂMICA

A suspensão cerâmica utilizada neste trabalho foi desenvolvida no trabalhos de Zorzi (2001) e trabalhada por Andreola (2007), Barbieri (2011), Ourique (2012) e Thomazi (2014), sendo esta última referência a formulação utilizada neste trabalho. Como pó cerâmico foi utilizado alumina (Al_2O_3) do fabricante Almatiss, tipo A-

1000SG, com densidade (sinterizada) de $3,85 \text{ g/cm}^3$ e partículas de tamanho médio $0,4\mu\text{m}^2$. A suspensão cerâmica é composta por 86% pó cerâmico e 14% de veículo orgânico (VO). Na Tabela 3.1 é mostrada a composição da suspensão utilizada neste trabalho.

Tabela 3.1 - Componentes da suspensão cerâmica

Material	Referência / Fabricante	% Massa
Alumina	A-1000SG / Almatís	86
Parafina	120-125 / Petrobras	10,5
Parafina Microcristalina	170 / Petrobras	1,4
Cera Carnaúba	Farmaquímica	1,4
Ácido Oleico	Synth-BR	0,35
Ácido Esteárico	Synth-BR	0,35

Fonte: Adaptado de Thomazi (2014),

Os componentes da mistura foram pesados em balança de precisão Gehaka BG4000 (com resolução 0,01g) e os ingredientes do veículo orgânico foram depositadas no interior do tanque da injetora, devidamente limpo, que foi aquecido a 90°C para a fusão do VO. O pó de alumina foi secado em estufa com ventilação a 150°C por 3 horas e misturado lentamente ao VO no tanque da injetora sob agitação. Após esta etapa, a mistura foi agitada por 24h, visando homogeneização. Anteriormente a cada injeção a mistura foi fundida e submetida a aplicação de vácuo a aproximadamente $0,80\text{kPa}$ por 30 minutos para remoção de potenciais bolhas de ar presentes na mistura.

3.5 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após a preparação da suspensão cerâmica iniciaram-se os testes de injeção que foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos II da UCS (LMCer2) utilizando a máquina de injeção em baixa pressão Peltzman MIGL33. O fluido refrigerante utilizado foi água e para sua circulação, uma bomba centrífuga da marca

² Dados do fabricante

Syllent, modelo MB63E0011 (1/3CV, 120V), com pressão máxima de 0,17 MPa foi utilizada acoplada a um reservatório térmico de capacidade 20L. A vazão de trabalho encontrada para o sistema com essa configuração foi 4,1 L/min.

Inicialmente foram realizados pré-testes para obter os parâmetros de injeção que funcionassem para ambos os insertos. Estes parâmetros são mostrados na Tabela 3.2.

Tradicionalmente, o desmoldante utilizado por pesquisas anteriores neste processo é o óleo de silicone. Porém, como nos pré-testes foram encontradas dificuldades na desmoldagem. Por isso testou-se também outros tipos de desmoldantes como a glicerina líquida, vaselina líquida e uma formulação com sabão que é utilizada no processo de colagem de barbotina. Segundo Barbieri (2011), essa formulação consiste em 67% de sabão comercial, 28% de água e 5% de estearato de zinco. Devido aos resultados deste pré-teste optou-se utilizar desmoldantes específicos para cada material de inserto. No próximo capítulo será melhor explicado.

Tabela 3.2 - Parâmetros de injeção para obtenção das amostras

Parâmetro	Valor
Pressão de Injeção	400kPa
Tempo de Injeção	12s
Temperatura do Tanque	90°C
Temperatura do Tubo	90°C
Temperatura do orifício	90°C
Temperatura do molde na injeção	50°C
Temperatura do molde na extração	35°C

Fonte: Autor

Durante a injeção, as medições de temperatura nos insertos foram realizadas com o sistema de aquisição de dados marca *Measurement Computing* modelo USB-TC e termopares do tipo K. Para este sistema, o erro de medição máximo indicado pelo fabricante é de $\pm 0,931^\circ\text{C}$. As medições foram realizadas a

uma taxa de aquisição de 2Hz em pontos do inserto, mostrados anteriormente. Após a coleta dos dados eles foram processados utilizando o software Excel.

3.6 ANÁLISE DAS AMOSTRAS

Para medição de forma e geometria do molde e das amostras obtidas foi utilizada uma máquina de medição por coordenadas Zeiss, modelo GageMax 300 e um paquímetro digital Mitutoyo de resolução 0,01mm.

A medição de densidade das peças foi realizada utilizando o método de Arquimedes, segundo a norma ASTM C373 – 88 (2006), com uma balança Bioprecisa FA2104N com precisão de 0,1 mg e câmara de pesagem. Cada amostra foi medida 3 vezes com o objetivo de garantir confiabilidade dos resultados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos procedimentos descritos no capítulo anterior de forma comparativa, quanto a parâmetros de processo e análise térmica do molde. Também são discutidas: uma avaliação qualitativa das peças obtidas, uma análise de densidade e um comparativo de custos para fabricação em cada processo.

4.2 RESULTADOS DE PARÂMETROS DE PROCESSO

4.2.1 Tempos de processo

Para avaliar a produtividade de cada par de insertos foram registrados os tempos para cada etapa do ciclo processo de injeção, dividindo-se em 6 etapas. Na Tabela 4.1 são mostrados os tempos cronometrados em cada etapa para ambos insertos. Os valores são uma média de 3 medições acompanhadas de desvio padrão.

O tempo total para os insertos de *ABS-like* é aproximadamente 105% maior que o tempo para os insertos de alumínio. Pode-se observar que esta diferença de tempo é mais pronunciada nas etapas de aquecimento e resfriamento, etapas em que a transferência de calor está diretamente envolvida. Isto é uma consequência da baixa condutividade térmica do material *ABS-like* em relação ao alumínio.

Contudo, vale salientar que mesmo os tempos para os insertos alumínio ainda são altos. O tempo de aquecimento, por exemplo, é cerca de 8 minutos. Isso é resultado de uma combinação dos fatores: elevada massa do conjunto e baixa potência das resistências.

A etapa de limpeza possui uma diferença de 93% do *ABS-like* para o alumínio. Essa diferença se dá pelo maior esforço necessário para limpeza do *ABS-like*, onde o material de injeção possui maior adesão se comparado o alumínio revestido por PTFE. Neste caso observou-se maior dificuldade para limpeza dos canais de injeção e ainda ocorreu a formação de uma fina camada branca na

superfície do molde, que necessitou ser raspada utilizando cotonetes umedecidos em acetona.

Tabela 4.1 - Tempos encontrados para cada etapa do processo

Etapa	ABS-like [s]	Alumínio [s]
Preparação	176 ±5	179 ±7
Aquecimento	936 ±15	483 ±11
Injeção	61 ±10	52 ±9
Resfriamento	1207 ±32	366 ±7
Desmoldagem (extração)	111 ±21	115 ±27
Limpeza	494 ±27	255 ±15
Total	2985 ±32	1450 ±26

Fonte: Autor

4.2.2 Análise Térmica do Molde

Foi realizado o monitoramento das temperaturas ao longo do ciclo de injeção a fim de identificar os diferentes comportamentos dos materiais *ABS-like* e alumínio. As curvas tempo vs. temperatura são mostradas na Figura 4.1.

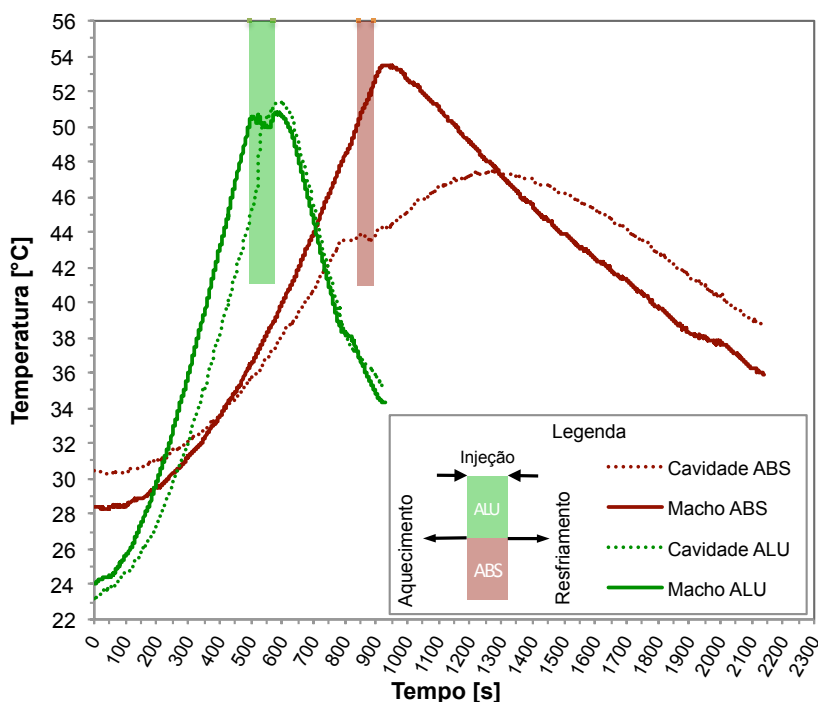
Pode-se observar uma taxa de aquecimento e resfriamento muito maior para o alumínio. Estes resultados se encontram dentro do esperado, em consequência das diferentes propriedades térmicas dos materiais.

Na Figura 4.1, as larguras das barras coloridas representam o tempo de injeção das peças. As curvas mostram que, logo após a etapa de injeção, as temperaturas nos insertos continuam a subir por alguns segundos até que ocorra a inflexão da curva devido ao resfriamento. Este fenômeno pode ser explicado por dois fatores.

Primeiramente, por existir a transferência de calor do material de injeção (90°C) para os insertos, e na sequência pelo retardo no processo de refrigeração, pois a circulação de fluido refrigerante é ativada somente após o término da injeção. Considerando que a transferência de calor com o fluido refrigerante ocorre primeiro

com o porta-moldes e depois com os insertos, e que o conjunto porta-moldes e insertos possui inércia térmica, que gera um tempo de resposta.

Figura 4.1 - Análise térmica do ciclo de injeção para os dois insertos



Fonte: Autor

Especificamente durante o aquecimento, pode-se observar um ΔT de aproximadamente 10°C entre o macho e a cavidade. Este fenômeno pode ser explicado pela maior quantidade de massa a ser aquecida na cavidade, devido a presença da placa de distribuição.

4.2.3 Desmoldantes

Devido a ocorrência de forte adesão entre o inserto de ABS-like e as peças injetadas, foram testados diferentes desmoldantes: óleo de silicone, formulação desenvolvida a base de sabão, glicerina líquida e vaselina líquida. Cada desmoldante foi testado pelo menos 3 vezes para cada par de insertos. Para o molde de alumínio tradicionalmente é utilizado o óleo de silicone, o qual se mostrou ideal também para este trabalho. A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos com os desmoldantes

Tabela 4.2 - Resultados dos desmoldantes

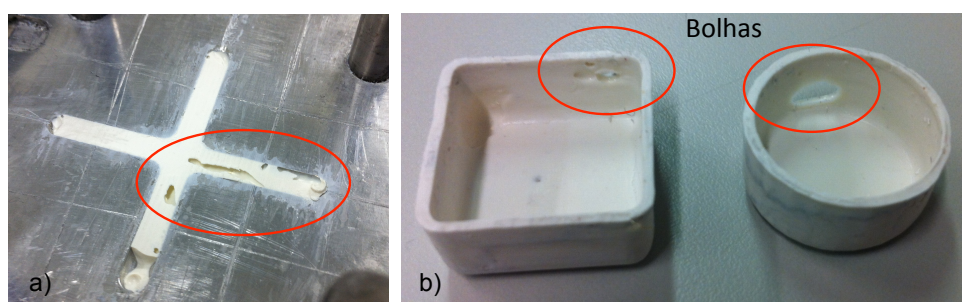
Desmoldante	ABS-like	Alumínio
Glicerina	✓	✗
Vaselina	✗	✗
Formulação c/ sabão	✓	✗
Silicone	✗	✓

Fonte: Autor

O silicone e a vaselina líquida não se apresentaram como boas alternativas para o ABS-like e não foi possível obter peças sem quebras durante a extração com eles.

Os desmoldantes que obtiveram o melhor resultado para o molde de ABS-like foram a formulação com sabão e a glicerina; com ambos obteve-se boa extração. Apesar deste bom resultado na extração, houve a formação de bolhas nos dois casos. As bolhas ocorreram nos canais de injeção primários (Fig. 4.2a) e nas peças (Fig. 4.2b); este fenômeno foi mais pronunciado quando utilizado a glicerina.

Figura 4.2 - Testes com o desmoldante glicerina: a) bolhas no canal primário; b) amostras com o desmoldante glicerina



Fonte: Autor

As bolhas presentes nos canais de injeção indicam uma possível evaporação do desmoldante. Eles foram testados em dois modos de aplicação: antes do aquecimento e após o aquecimento (instantes antes da injeção). Este teste foi realizado com o objetivo de identificar se a evaporação acontecia durante o aquecimento. Em ambos os modos de aplicação os resultados quanto a bolhas

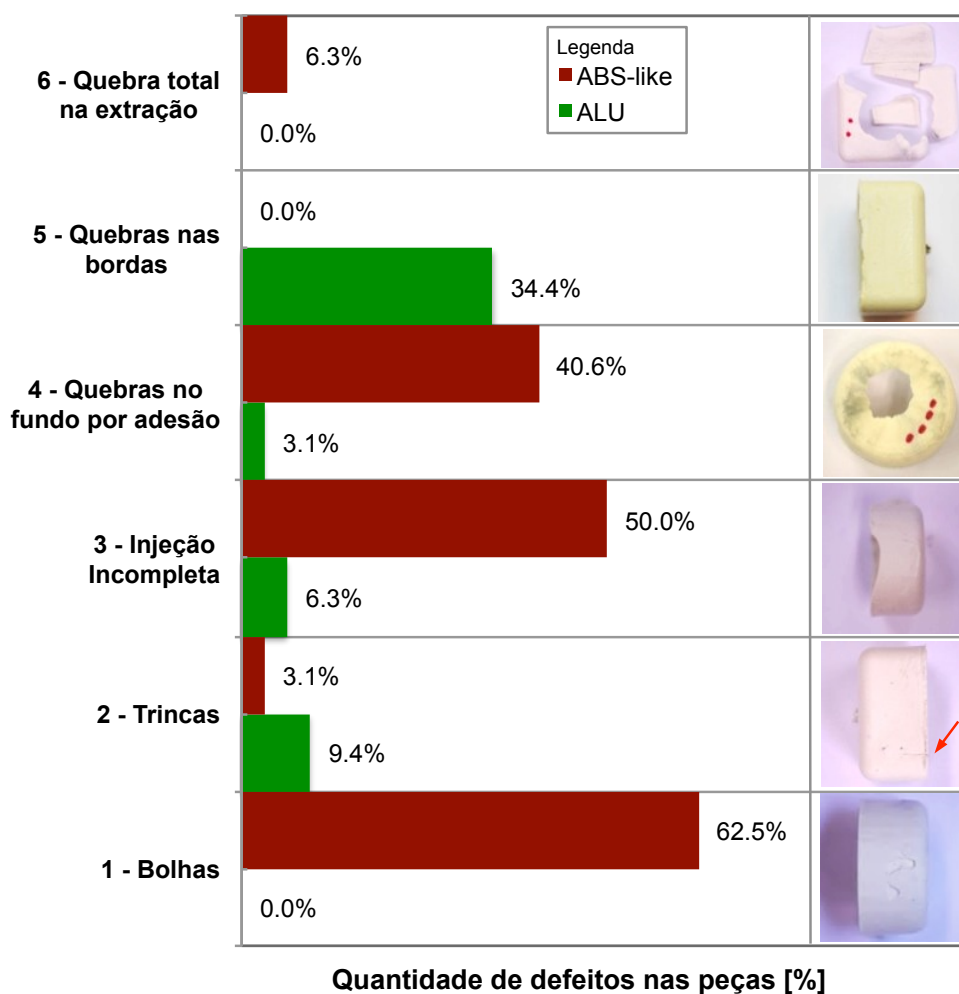
foram semelhantes. Ainda, para confirmar este fenômeno, foi realizado um teste aplicando-se os demoldantes no molde de alumínio, que também apresentou bolhas.

As amostras analisadas nas próximas seções foram obtidas utilizando o óleo de silicone para o molde de alumínio e a formulação com sabão para o de ABS-like.

4.2.4 Análise qualitativa das peças

Foram obtidos dois lotes de amostras, cada um contendo 8 conjuntos de 4 peças totalizando 32 peças para cada par de insertos. As amostras foram analisadas de forma qualitativa. Para esta análise uma lista de 6 defeitos foi criada e as peças foram avaliadas quanto a presença destes defeitos. A lista é mostrada na Figura 4.3, juntamente com um gráfico de percentual de peças com defeito para cada tipo de inserto.

Figura 4.3 - Resumo da análise qualitativa



Fonte: Autor

Para os insertos de *ABS-like* a quantidade de defeitos foi bastante elevada. Observa-se que a presença de bolhas foi o defeito mais pronunciado, ocorrendo em mais de 50% das peças, e possivelmente está relacionado ao desmoldante.

O defeito de quebra no fundo por adesão ocorreu em cerca de 40% das peças injetadas com os insertos de *ABS-like*. Conforme explicado pela literatura as propriedades térmicas do material do molde tem influência na adesão entre o produto e as paredes do molde, e conseqüentemente na força necessária para extração. A literatura aponta este fenômeno como resultado da penetração da parafina nas imperfeições da superfície (HEMRICK; STARR; ROSEN, 2001)

Para os insertos de alumínio a quantidade de defeitos foi menor de uma maneira geral. O defeito mais expressivo foi a quebra nas bordas. Este defeito foi consequência de uma rebarba obtida nas bordas das peças, e pode ser facilmente melhorada se executado um ajuste do molde visando impedir o vazamento de material e a formação da rebarba.

4.2.5 Medidas de densidade nas peças

A densidade da peça é um parâmetro importante para medir a qualidade das peças injetadas. Sendo assim, 10 amostras de cada material de inserto na condição a verde foram escolhidas aleatoriamente. Suas densidades foram medidas sob as mesmas condições de injeção e os resultados são mostrados na Tabela 4.2. Para fins de comparação são mostrados também valores comparativos relacionados a outros trabalhos.

Tabela 4.3 - Análise de densidade

Condição	Densidade a verde [g/cm ³]	Desvio Padrão [g/cm ³]
Insertos <i>ABS-like</i>	2,68	0,02
Insertos de alumínio	2,66	0,01
Thomazi, 2014 – C1	2,60	0,01
Barbieri, 2011	2,64	0,01
Ourique, 2012	2,67	0,01

Fonte: Autor

Devido a proximidade entre valores obtidos para o *ABS-like* e o alumínio, foi aplicado um teste estatístico do tipo teste t, a fim de avaliar a significância deste resultado. O intervalo de confiança escolhido foi o 99% e a hipótese inicial (H_0) foi a de que as médias fossem iguais. O teste t indica que a hipótese inicial pode ser rejeitada, sendo assim os valores de densidade encontrados para as amostras originadas dos insertos *ABS-like* são significativamente maiores do que para os insertos de alumínio. Esse resultado deve ser estudado em futuros trabalhos.

4.3 ESTUDO DOS CUSTOS DE FABRICAÇÃO DOS INSERTOS

A fim de realizar o estudo dos custos de fabricação foram realizados orçamentos para construir os dois tipos insertos, cada um com sua tecnologia de fabricação. A Tabela 4.3 mostra o comparativo entre os dois modelos, bem como o tempo de fabricação para cada uma das tecnologias empregadas.

Para cálculos dos tempos foram considerados que todos os materiais estejam *in loco*, sendo o tempo obtido o total de construção desde o início de fabricação até o molde estar pronto para testes. Para o molde de alumínio foi considerado um tempo de 3 dias destinado a aplicação da camada de PTFE e seu transporte até a empresa aplicadora.

Tabela 4.4 - Comparativo de custo e tempo vs. tecnologia de fabricação

Etapa	Quantidade	ABS- [R\$]	Alumínio [R\$]
Impressão 3D	4,5h	2100*	-
Matéria-prima	1,64kg	-	41
Programação CAM	2h	-	106
Usinagem CNC	8h	-	772
Bancadas e ajustes	4h	-	215
Revestimento PTFE	3 dias	-	90
Total		2100	1224
<i>Tempo</i>		<i>10h</i>	<i>3d,14h</i>

Fonte: Autor

*Inclui o valor da matéria-prima

Os valores considerados são baseados em custos industriais e não contemplam margem de lucro e tributação. O custo para o inserto de *ABS-like* é cerca de 70% maior que o alumínio. Em relação ao tempo de construção, observa-se que ele é maior para o alumínio principalmente devido ao tempo necessário para a aplicação da camada de PTFE que é de 3 dias.

5. CONCLUSÃO

Este estudo investigou a viabilidade de utilização de insertos do material *ABS-like* confeccionados por prototipagem rápida, dentro do conceito de ferramental rápido (*Rapid Tooling*), para uso no processo de injeção de cerâmica em baixa pressão.

Para esta investigação foi construído um molde experimental, no conceito de porta moldes com insertos intercambiáveis. Esta etapa permitiu a execução de testes de injeção utilizando os dois diferentes pares de insertos. Durante a injeção, a temperatura foi registrada usando um sistema de aquisição de dados e os tempos de processo foram registrados. As amostras obtidas foram avaliadas de forma qualitativa e suas densidades foram medidas.

De uma maneira geral pode-se dizer que o experimento foi confiável e que os resultados foram dentro do esperado. No geral o experimento poderia ter uma performance melhor com a implementação de alguns equipamentos, tais como uma unidade de água gelada, termoregulador e controle de potência das resistências automático. Estes equipamentos promoveriam um processo mais automatizado, mais rápido e com melhor repetibilidade.

Nos testes realizados, o material *ABS-like* não demonstrou ser um bom material para moldes de injeção de cerâmica, em comparação com o alumínio. Com este molde foram obtidas poucas peças isentas de defeitos, o que compromete seu uso até para RT. Suas características térmicas mostraram uma redução na produtividade e favoreceram a adesão do material de injeção, conseqüentemente aumentando o número de refugos no processo. Contudo, a real causa desta adesão não foi profundamente apurada e se fazem necessários mais estudos.

A aplicação de camada de PTFE, que seria uma possível solução para os problemas de adesão, ocasionou um empenamento que inutilizou os insertos. Outros métodos de cobertura antiaderente não foram testados, o que pode ser explorado em um trabalho futuro.

Os resultados com os desmoldantes mostraram uma melhora significativa quando utilizada a formulação com sabão para o *ABS-like*. Entretanto, esta melhora teve um efeito colateral que foram as bolhas. A origem das bolhas necessita ser investigada a fim de aperfeiçoar a performance deste desmoldante.

O porta moldes desenvolvido se mostrou uma boa ferramenta para controlar as temperaturas no molde. A desvantagem de utilizá-lo é uma diminuição da produtividade do processo de injeção devido a sua massa e propriedades térmicas. No caso deste trabalho de pesquisa isso não é um problema, porém em um processo de fabricação real é de grande importância.

Ainda, para melhor avaliar a aplicação desta resina, é necessário realizar um estudo para avaliar o comportamento de desgaste dos insertos com a alta abrasividade da suspensão cerâmica. Também é necessário avaliar a questão de perda de propriedades ao longo do tempo, uma vez que a resina *ABS-like* é fotossensível e possui um certo grau de envelhecimento.

Neste trabalho o foco foi o molde e o processo de injeção, não foi avaliado o comportamento das peças obtidas dos insertos de *ABS-like* nos processos pós-injeção (remoção do VO, pré-sinterização e sinterização). Recomenda-se realizar esta análise em trabalhos futuros.

Finalmente, é importante salientar que a aplicação da tecnologia de prototipagem rápida pode ser melhor explorada. Neste trabalho o objetivo foi comparar dois pares insertos idênticos e isso foi realizado. A refrigeração pode ser melhorada criando uma geometria com circuito de refrigeração no interior do inserto, o que pode ser facilmente obtido com a tecnologia de prototipagem ao contrário dos métodos convencionais. Contudo, esse recurso necessita ser estudado para avaliar seus reais benefícios.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for water absorption, bulk density, apparent porosity, and apparent specific gravity of fired whiteware products.** West Conshohocken, PA: ASTM, 2006. 2 f.

ANDREOLA, R.; ZORZI, J. E.; PEROTTONI, C. A. **Conformação de molas cerâmicas por moldagem por injeção em baixa pressão.** Caxias do Sul, RS, 2007. 114 f. : Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2007.

ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.** 10.ed. Materials Park: ASM International, 1990. v. 2.

BALIC, J.; VAUPOTIC, B.; BREZOCNIK, J. Use of Polyjet technology in manufacture of new product, **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering.** v.18, n. 1-2, p.319-322, 2006.

BARBIERI, R. A. **Influência da temperatura de sinterização nas propriedades mecânicas de molas de alumina injetadas em baixa pressão.** Caxias do Sul, RS, 2011. 119 f. : Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Materiais, 2011.

CALLISTER, W.D. **Materials science and engineering: an introduction.** 7.ed. New York, N.Y.: J. Wiley, 2006. xxi, 975 p. ISBN 0471736961.

CHUA, C. K.; HONG, K. H.; HO, S. L. Rapid Tooling Technology. Part 1. A Comparative Study. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,** v. 15, p. 604-608, 1999.

GERMAN, R. M.; BOSE, A. **Injection molding of metals and ceramics.** New Jersey: Metal Powder Industries Federation, c1997. 413p. ISBN 187895461X

HAGUE, R.; MANSOUR, S.; SALEH, N. Design opportunities with rapid manufacturing. **Assembly Automation,** v.23, n.4, p.346-356. 2003

HARPER, C. A. **Handbook of ceramics, glasses, and diamonds.** New York, N.Y.: McGraw-Hill, 2001. xv, 848 p (Materials engineering) ISBN 007026712X.

HEMRICK, J. G.; STARR, T. L.; ROSEN, D. W. Release behavior for powder injection molding in stereolithography molds. **Rapid Prototyping Journal.** v. 7, n. 2, p.115-121, 2001.

JOVANE, F.; YOSHIKAWA, H.; ALTING, L.; BOER, C.R.; WESTKAMPER, E.; WILLIAMS, D.; TSENG, M.; SELIGER, G.; PACI, A.M.. The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology,** n. 57, p. 641-659, 2008.

JUDSON, E. A.; STARR, T. L. **Using Injection Molding and Stereolithography**. Disponível em: <http://www.pelcor.com/library/judson_starr/>. Acesso em: 01 de set. 2013.

KNITTER, R.; BAUER, W.; GÖHRING, D.; HAUßELT, J. Manufacturing of Ceramic Microcomponents by a Rapid Prototyping Process Chain, **Advanced Engineering Materials**, n. 3, p. 49-54, 2001.

KOVACS, J. G.; KORTELYESI, G.; KOVACS, N. K.; SUPLICZ, A. Evaluation of measured and calculated thermal parameters of a photopolymer. **Int. Commun. Heat Mass Transf.**, v. 38, p. 863–867, 2011.

KRINDGES, I.; ANDREOLA, R.; PEROTTONI, C. A.; ZORZI, J. E. Low-Pressure Injection Molding of Ceramic Springs. **International Journal of Applied Ceramic Technology**. v.5, n.3, p.243-248, 2008.

MÜLLER, M.; BAUER, W.; RITZHAUPT-KLEISSL, H.-J. Low-pressure Injection Molding of Ceramic Micro Device using sub-micron and Nanoscaled Powders. **4M Conference**. p.203- 206, 2005.

OURIQUE, P. A. **Efeito das variáveis de processamento em misturas de alumina com ligantes orgânicos usadas na moldagem por injeção em baixa pressão**. 2012. xiv, 78 f. : Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Materiais, 2012.

PELTSMAN, M.; MEDVEDOVSKI, E. Low pressure moulding mass production technology of complex shape advanced ceramic components. **Advances in Applied Ceramics**, vol.111, no. 5&6, pp 333-344, 2012.

STRATASYS. **PolyJet Materials Datasheet**. Disponível em: <http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/Material%20Specs%20MS/PolyJet-Material-Specs/PolyJet_Materials_Data_Sheet.ashx> Acesso em 12 de out. 2013

STYROLUTION. **Product Specifications**. Disponível em: <http://www.styrolution.com/Product/Novodur_ID40120014.html> Acesso em 15 de out. 2013.

THOMAZI, E. **Influência do Ciclo de Resfriamento do Molde na Obtenção de Discos Cerâmicos por Injeção em Baixa Pressão**. 2014. 85 f. : Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2014.

TOY, Ç., PALACI, Y., BAYKARA, T.A. A new ceramic thread-guide composition via low-pressure injection molding. **Journal Material Processing Technology**, v. 51, p. 211-222, 1995.

VOLPATO, N. (Ed.). **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: E. Blücher, 2007. 244 p. ISBN 8521203888.

ZORZI, J.E., **Produção de peças de cerâmica avançada com perfil complexo**. 2001. f. Tese de doutorado – Programa de Pós-graduação em Ciências dos materiais (PGCIMAT), UFRGS, Porto Alegre, 2001.

ZORZI, J.E.; PEROTTONI, C.A.; JORNADA, J.A.H. Moldagem por injeção em baixa pressão de peças complexas de cerâmicas avançadas produzidas com pós submicrométricos. **Cerâmica**, n. 50, p. 202-208, 2004.

ZORZI, J.E., PEROTTONI, C.A., JORNADA, J.A.H. A new partially isostatic method for fast debinding of low-pressure injection molded ceramic parts. **Materials Letters**, v. 57, p.3784-3788, 2003.