

**Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo**

**João Francisco Amâncio de Moraes**

**Análise e otimização dos parâmetros de processo de injeção de compósito poliamida PA66 com 50% de fibra de vidro (Grivory GV-5H) usando o método de Taguchi**

**São Paulo  
2018**

João Francisco Amâncio de Moraes

Análise e otimização dos parâmetros de processo de injeção de compósito poliamida PA66 com 50% de fibra de vidro (Grivory GV-5H) usando o método de Taguchi

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Processos Industriais

Data da aprovação \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

---

Prof. Dr. Kleber L. Guimarães (Orientador)  
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Kleber Lanigra Guimarães  
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro  
FATEC – Centro Paula Souza

Prof. Dr. Márcio Yee  
UNIFESP – Universidade Federal de São Paulo

João Francisco Amancio de Moraes

**Análise e otimização dos parâmetros de processo de injeção de compósito poliamida PA66 com 50% de fibra de vidro (Grivory GV-5H) usando o método de Taguchi**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Processos Industriais.

Área de Concentração: Desenvolvimento e Otimização de Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Lanigra Guimarães

São Paulo  
Dezembro/2018

Ficha Catalográfica

Elaborada pelo Departamento de Acervo e Informação Tecnológica – DAIT  
do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT

M827a **Moraes, João Francisco Amâncio de**  
Análise e otimização dos parâmetros de processo de injeção de compósito poliamida PA66 com 50% de fibra de vidro (Grivory GV-5H) usando o método de Taguchi. / João Francisco Amâncio de Moraes. São Paulo, 2018.  
121p.  
  
Dissertação (Mestrado em Processos Industriais) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Área de concentração: Desenvolvimento e Otimização de Processos Industriais.  
  
Orientador: Prof. Dr. Kleber Lanigra Guimarães  
  
1. Injeção de polímero 2. Compósito poliamida 3. Fibra de vidro 4. Método Taguchi  
5. Propriedades mecânicas 6. Arranjo ortogonal 7. Tese I. Guimarães, Kleber Lanigra, orient. II. IPT. Coordenadoria de Ensino Tecnológico III. Título

19-06

CDU 678.82(043)

## DEDICATÓRIA

Dedico este mestrado à minha mãe, Maria Madalena Luciano, pela educação que ela proveu ao longo da minha vida e pela constante motivação, dada por ela, para que alcançasse meus objetivos profissionais, sempre alicerçado em estudos acadêmicos.

Também faço uma dedicatória à minha esposa, Marisa Fujiko Ishiko de Moraes e meu filho, Vinicius Almeida Amâncio de Moraes, por estarem sempre ao meu lado apoiando e incentivando a progredir sempre. O apoio e a admiração deles por este trabalho foi um fator determinante para minha alegria, motivação e objetivo.

Não posso deixar de mencionar meu filho, André de Almeida Moraes (*in memoriam*), por ter sido em vida, um companheiro constante nas alegrias e diversidades por qual passamos e que, com certeza, estaria muito orgulhoso de mais esta conquista de seu pai.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao Criador, razão de estarmos todos aqui, aprendendo suas leis precisas, sem as quais, não teríamos como fazer ciências.

Ao Prof. Dr. Kleber Lanigra Guimarães, pela orientação e por ter acreditado em mim e neste projeto de pesquisa.

Aos Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro e Dr. Márcio Yee pelas relevantes questões e sugestões dadas por ocasião da qualificação e defesa da dissertação, as quais foram de suma importância para o aprimoramento deste trabalho.

Ao Serviço de Aprendizagem Industrial, SENAI Mario Amato, que através de seu serviço de Apoio à Pesquisa, realizou todo o trabalho prático de produção dos corpos de provas e testes laboratoriais aplicado nessa dissertação, sem qualquer ônus à este pesquisador. Agradecimento especial ao técnico Ricardo C. Madi que trabalhou na produção dos corpos de prova e a Rosângela Scocco, analista de laboratório que conduziu os testes nos mesmos, de muita relevância para a dissertação.

## RESUMO

A necessidade de materiais mais leves e de maior produtividade em substituição às ligas metálicas se torna cada dia maior o que demanda o constante desenvolvimento de compósitos poliméricos e eficazes processos de fabricação.

A moldagem por injeção é um método de processamento de alta taxa de produção, e tem a capacidade de produzir formas complexas de produtos plásticos a um custo relativamente baixo e com tempo de processo relativamente curto.

Neste trabalho foram estudados os fatores, temperatura de processamento, fluxo volumétrico, pressão de recalque, contrapressão, velocidade da rosca e tempo de recalque, através de uma matriz ortogonal L16 e, como resposta do estudo, mediu-se a resistência máxima de tração ( $RT_{m\acute{a}x}$ ), numa poliamida 6.6 com carga de 50% de fibra de vidro, Grivory GV-5H®. Fez-se uso da metodologia ANOVA para indentificar-se os fatores de maior significância para o processo. A melhor resistência máxima de tração obtida de 242,6 N/m<sup>2</sup>, mostrou-se como uma opção na substituição à aplicações de ligas metálicas de alumínio.

O melhor resultado se obteve com a temperatura de processamento em 270°C, o fluxo volumétrico de 83 cm<sup>3</sup>/s, a pressão de recalque de 300 bar, a contrapressão de 10bar, velocidade da rosca de 50min<sup>-1</sup> e o tempo de recalque com valor de 5 s.

As porcentagens de contribuição encontradas foram pressão de recalque com contribuição de 61 %, seguido da temperatura de processamento, com contribuição de 17 % e em terceiro, o fluxo volumétrico com contribuição de 12 %. Para os demais fatores, tais como, contrapressão, velocidade da rosca e tempo de retenção, a porcentagem de contribuição ficou abaixo de 10 %.

**Palavras-chave:** Processo de injeção de polímeros; Propriedades mecânicas; Método Taguchi; Arranjos ortogonais; PA6.6.

## ABSTRACT

### **Analysis and optimization of the injection process parameters of polyamide composite PA66 with 50% glass fiber (Grivory GV-5H) using the Taguchi method**

Lighter materials and higher productivity in substitution of metal alloys becomes more and more necessary, what demands the constant development of polymeric composites and effective manufacturing processes.

Injection molding is a high-throughput processing method, and has the ability to produce complex geometry of plastic products at a relatively low cost and with relatively short process time.

In this work the factors, processing temperature, volumetric flow, holding pressure, backpressure, thread speed and holding time were studied through an orthogonal matrix L16 and, as a response of the study, the maximum resistance (RTmax) were measured, on a polyamide 6.6 with 50 % loading of glass fiber, Grivory GV-5H®. The ANOVA methodology was used to identify the most significant factors for the process. The best tensile strength obtained of 242.6 N/m<sup>2</sup> was shown as an option in the substitution of aluminum alloy applications.

The best result was obtained with the processing temperature at 270°C, the volumetric flow rate of 83 cm<sup>3</sup>/s, the holding pressure of 300 bar, holding pressure of 10bar, the thread speed of 50 min<sup>-1</sup> and the holding time value of 5s.

The contribution percentages found were 61 % contribution of holding pressure, followed by the processing temperature, with contribution of 17 % and in the third, the volumetric flow with contribution of 12 %. For the other factors, such as back pressure, thread speed and holding time, the contribution percentage was below 10 %.

**Keywords:** Injection molding process; Mechanical properties; Taguchi Method; Orthogonal arrangements; PA66.

## Lista de ilustrações

<b>Figura 1</b>	Diagrama em pirâmide dos plásticos.....	19
<b>Figura 2</b>	Curvas de tensão em função da deformação para a poliamida PA46 GF50.....	25
<b>Figura 3</b>	Ciclo de vida de um produto ( <i>Product Life Cycle</i> ).....	30
<b>Figura 4</b>	Três diferentes métodos na metodologia Taguchi: projeto dosistema/conceito, projeto do parâmetro e projeto da tolerância.....	34
<b>Figura 5</b>	Corpo de prova na cavidade do molde de injeção.....	54
<b>Figura 6</b>	Configuração do corpo de prova (posição do canal de injeção, canal de alimentação e a entrada de injeção).....	54
<b>Figura 7</b>	Corpos de prova embalados com sílica para envio ao laboratório de ensaios.....	55
<b>Figura 8</b>	Efeito principal das médias.....	60
<b>Figura 9</b>	Efeito principal da taxa sinal-ruído (S/R).....	60
<b>Figura 10</b>	Posições de coleta de material para as análises de DSC.....	63
<b>Figura 11</b>	DSC no corpo de prova 15 – Menor resistência à tração encontrada – lado do canal de injeção – Aquecimento.....	63
<b>Figura 12</b>	DSC no corpo de prova 15 – Menor resistência à tração encontrada – lado do canal de injeção – Resfriamento.....	64
<b>Figura 13</b>	DSC no corpo de prova 2 – Maior resistência à tração encontrada – lado do canal de injeção – Aquecimento.....	64
<b>Figura 14</b>	DSC no corpo de prova 2 – Maior resistência à tração encontrada – lado do canal de injeção – Resfriamento.....	65

## Lista de tabelas

<b>Tabela 1</b>	Estrutura química das amidas.....	23
<b>Tabela 2</b>	Propriedades físicas das poliamidas.....	23
<b>Tabela 3</b>	O efeito dos três métodos do projeto robusto de Taguchi em três fases do ciclo de vida do produto.....	35
<b>Tabela 4</b>	Arranjo ortogonal L9 (3 <sup>4</sup> ).....	37
<b>Tabela 5</b>	Distribuição dos dados para ANOVA dois fatores.....	48
<b>Tabela 6</b>	Fórmulas de cálculo para ANOVA dois fatores.....	49
<b>Tabela 7</b>	Propriedades mecânicas do compósito Grivory GV-5H.....	51
<b>Tabela 8</b>	Propriedades térmicas do compósito Grivory GV-5H.....	52
<b>Tabela 9</b>	Fatores e respectivos níveis de <i>set up</i> de máquina para produção dos corpos de prova.....	53
<b>Tabela 10</b>	Arranjo Ortogonal Taguchi L16.....	53
<b>Tabela 11</b>	Temperaturas no bico de injeção e nas zonas de aquecimento.....	55
<b>Tabela 12</b>	Resultado da resistência máxima de tração obtida (RT <sub>máx.</sub> ).....	57
<b>Tabela 13</b>	Resposta da taxa sinal – ruído, maior é melhor.....	59
<b>Tabela 14</b>	Resposta das médias.....	59
<b>Tabela 15</b>	Resultado de parametrização otimizada do processo.....	61
<b>Tabela 16</b>	Fatores e média das resistências máxima de tração para cada nível.....	61
<b>Tabela 17</b>	Análise da variância das médias e suas respectivas porcentagem de contribuição.....	62
<b>Tabela 18</b>	Comparação DSC: a) entre as condições de injeção 2 e 15 (maior e menor valores de Resistência máxima de tração e b) entre o lado do canal de injeção e o lado oposto ao mesmo.....	65

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
ANOVA	Análise de variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEP	Controle Estatístico de Processo
CF	<i>Correction fator</i>
CP	Contrapressão
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i> (Projeto de Experimentos)
FTIR	Espectroscopia de Infravermelhos com transformadas de Fourier
GF	Glass Fiber (Fibra de vidro)
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
MeT	Temperatura de processamento
MQ	Média dos desvios quadráticos (MS Excel 2013)
MQe	Média dos desvios quadráticos dos erros (MS Excel 2013)
MSD	Desvio quadrático médio ( <i>Mean Quadratic Deviation</i> )
PA	Poliâmidas
PET	Polietileno tereftalato
PVC	Policloreto de vinila
PR	Pressão de recalque
RT <sub>máx</sub>	Resistência máxima de tração
S/R	Relação Sinal/Ruído (Taguchi)
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SPC	<i>Statistical Process Control</i>
SQ	Soma dos desvios quadráticos (MS Excel 2013)
SS <sub>T</sub>	Soma quadrática total ( <i>Sum of Squares Total</i> )
SQ <sub>g</sub>	Soma quadrática dentro do grupo
SQ <sub>e</sub>	Soma quadrática dos erros
TGA	Termogravimetria ou análise termogravimétrica
T <sub>g</sub>	Temperatura de transição vítrea ( <i>Glass transition temperature</i> )
T <sub>m</sub>	Temperatura de processamento ( <i>Melting temperature</i> )
TQC	<i>Total Quality Control</i> (Controle da Qualidade Total)
TR	Tempo de recalque
VF	Fluxo volumétrico
VR	Velocidade da rêsca
$\mu$	Média da população
$\Sigma$	Desvio padrão da população

## Lista de Símbolos

$m$	massa	[kg]
$T$	temperatura	[°C]
$t$	tempo	[s]
VF	Fluxo volumétrico	[cm <sup>3</sup> /s)
$p$	pressão	[bar]
RT	Resistência a tração	[N/m <sup>2</sup> ]

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	16
2.1 Objetivo geral .....	16
2.2 Objetivo específico.....	16
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
3.1 O processo de moldagem plástica por injeção .....	17
3.2 Classificações dos plásticos .....	18
3.3 Modificações e adituações em plásticos .....	19
3.3.1 Fibras de reforço.....	20
3.4 Propriedades mecânicas .....	20
3.5 Requisitos básicos necessários em componentes plásticos com foco à substituição às ligas metálicas fundidas .....	21
3.6 Poliamidas.....	22
3.6.1 Produções de Poliamidas e propriedades.....	22
3.6.2 Poliamida 6.6 (Nylon 6.6).....	23
3.6.3 Presença de umidade em Poliamidas.....	24
3.6.4 Termoplásticos reforçados com fibra de vidro.....	24
3.7 Conhecimentos básico sobre o método Taguchi.....	27
3.7.1 A aplicação da estatística.....	27
3.7.2 As primeiras aplicações de estatística na indústria.....	27
3.7.3 Contexto do Método Taguchi.....	29
3.7.4 Breve história do método Taguchi.....	31
3.7.5 Os passos do método Taguchi.....	32
3.7.6 Método de Taguchi versus outros métodos de qualidade.....	38

3.7.6.1 Pesquisas de aplicação do Método Taguchi (arranjos ortogonais)..	38
3.8 Análise de variância (ANOVA).....	45
3.8.1 ANOVA Um Fator.....	46
3.8.2 ANOVA Um Fator.....	47
3.8.3 Projeto do experimento, efeito do tamanho, tamanho da amostra e poder do teste estatístico.....	49
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>51</b>
4.1 Material .....	51
4.2 Máquina e molde .....	52
4.3 Condições de processamento .....	52
4.3.1 Preparação do composto e <i>set up</i> da maquina injetora.....	54
4.3.1.1 Secagem.....	54
4.3.1.2 Rosca.....	55
4.3.1.3 Aquecimento.....	55
4.4 Ensaio mecânico .....	55
4.5 Temperaturas de fusão e de cristalização através do DSC.....	56
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>57</b>
5.1 Resultados das resistências máxima de tração.....	57
5.2 Relação sinal/ruído (S/R) do arranjo ortogonal.....	58
5.3 Análise de variância (ANOVA) .....	61
5.4 Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) .....	62
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>66</b>
<b>7 RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>72</b>

<b>APÊNDICE A – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A</b>	
<b>TRAÇÃO.....</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE B – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE CALORIMETRIA</b>	
<b>EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC).....</b>	<b>108</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As indústrias em geral, que vão da automação à produção de energia, estão exigindo cada vez mais ideias inovadoras para substituição de metal por polímeros, como oportunidade de se obter vantagem competitiva em seus respectivos mercados de atuação. Nesse contexto, a indústria automotiva, que tem alto impacto em volume de negócios, em nível mundial, aplica significativa parcela de seus recursos em pesquisas para desenvolvimento de alternativas inovadoras objetivando sair com novas soluções à frente de seus concorrentes (DU PONT, 2018).

A fabricação e o desenvolvimento de novos produtos são mais rápidos e mais complexos do que nunca, com a substituição de metais, muitas vezes, sendo a chave para reduzir o peso, o custo e os tempos de produção.

O interesse e a necessidade de substituição de componentes metálicos por polímeros é facilmente constatada pois, atualmente, aproximadamente 16 % do peso de um veículo é de plástico, com uma tendência crescente de atingir 25 % nos próximos cinco anos (DU PONT, 2018). Esta demanda por redução no peso dos componentes, exigirá cada vez mais compósitos de plásticos de engenharia para peças robustas à exposição de tensão mecânica, vibração, calor e meios agressivos.

Plásticos de engenharia proporcionam resistência e rigidez consistentes e excelente desempenho de impacto para a substituição de metal. Eles também oferecem excelente resistência à fluidez, podem manter o desempenho estrutural em altas temperaturas e resistir à corrosão, qualidades que o metal nem sempre consegue igualar. São mais leves e mais resistentes do que o alumínio, a liga de magnésio, a liga de alumínio e outros metais, por isso, oferecem um grande potencial para substituição de peças de metal tradicionais. Seu desempenho, associado a perfis mais finos, reduz o custo total e o peso das peças. Em aplicações automotivas, o peso menor ajuda a se traduzir em maior eficiência de combustível. Também contribuem para outras vantagens no produto e de processo de fabricação, incluindo: benefícios funcionais através da integração de peças, maior resistência à corrosão, melhor acabamento superficial com possibilidades de cores integradas e menores custos logísticos (PLASTIX WORLD, 2016)

Outra grande vantagem de componentes plásticos injetados na substituição de metal, é o seu tempo para processamento mais curto na produção de componentes de diferentes formatos e geometrias.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi estudar a aplicação da metodologia de projetos de arranjos ortogonais desenvolvidos por Taguchi num processo de injeção de um compósito polimérico – Poliamida PA66 com 50% de carga de fibra de vidro.

### 2.1 Objetivo Geral

Aplicar uma metodologia para definição de parâmetros otimizados de *set-up* no processo de injeção de plástico, avaliando os resultados da resistência máxima de tração obtida, como reposta do processo.

### 2.2 Objetivo Específicos

- Evidenciar que os parâmetros de injeção temperatura de processamento, fluxo volumétrico, pressão de recalque, contra-pressão, velocidade da rosca e tempo de retenção propiciaram o atingimento de valores de resistência máxima de tração próximo aos de ligas metálicas de alumínio, reportado pelo fabricante do compósito Grivory GV-5H;

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica, foi pesquisado o básico sobre o processo de moldagem plástica por injeção, definições básicas de plásticos, aditivos e compósitos, propriedades térmicas em polímeros, e o básico das poliamidas, em particular.

Também foi pesquisado o desenvolvimento da metodologia Taguchi (Arranjos Ortogonais) para definição dos parâmetros otimizados para a injeção, mais a aplicação do método estatístico ANOVA para caracterizar os parâmetros de injeção com maior significância dentro das parametrizações apontadas como a de melhor condição para o atingimento da maior resistência máxima de tração.

#### 3.1 O processo de moldagem por injeção

O processamento de materiais poliméricos é uma das indústrias de mais rápido crescimento no mundo. Um dos métodos mais importantes para o processamento de materiais poliméricos é a moldagem por injeção. As propriedades de uma peça moldada por injeção dependem da matéria-prima utilizada e dos parâmetros de processamento, tais como, pressão de injeção, pressão de retenção, temperatura de processamento, velocidade de injeção, etc. (ENSINGER, 2012)

A moldagem por injeção é um processo cíclico de enchimento rápido do molde seguido de resfriamento do moldado e sua respectiva ejeção. Uma variedade de materiais tanto plásticos quanto metálicos podem ser utilizados como matéria-prima.

O material, que geralmente está disponível na forma de *pallets*, é plastificado em uma unidade de injeção e injetado em um molde sob alta pressão. A principal vantagem da moldagem por injeção é ser um método muito econômico de produção em massa. Peças prontas com tolerâncias reduzidas podem ser produzidas em um único passo, muitas vezes de forma totalmente automática. Em geral, o processamento posterior não é necessário. Também é possível integrar diferentes funções em um único componente, evitando assim a produção de diversos outros componentes que ficariam assim mais caros (ENSINGER, 2012 apud GOODSHIP, 1994.)

Como já mencionado, as propriedades de uma peça moldada por injeção dependem do material de trabalho (matéria-prima) e dos parâmetros de processamento. Como uma regra básica, a pressão de injeção e a pressão de retenção selecionadas devem ser tão altos quanto necessários para preencher a

cavidade de forma suficientemente rápida, completa e eficiente, mas, por outro lado, tão baixo quanto necessário para produzir componentes moldados por injeção com baixa tensão residual e evitar deformações e/ou alterações dimensionais na operação de ejeção do componente da cavidade (ENSINGER, 2012 apud GOODSHIP, 1994).

Para peças de paredes finas, a velocidade de enchimento ideal é maior do que para as peças de paredes grossas, de modo a se obter enchimento uniforme da moldagem. Velocidade de enchimento muito baixa provoca uma variação maior de temperatura entre a porção mais próxima do ponto de injeção em relação às regiões mais distantes dele, devido ao aumento do resfriamento do composto enquanto a cavidade do molde está sendo preenchida.

A maior viscosidade dos compostos mais frios também requer maiores pressões de injeção, que por sua vez exigem pressões de compactação mais fortes (ENSINGER, 2012 apud GOODSHIP, 1994).

Uma grande quantidade de produtos de plástico são fabricados por meio de máquina de moldagem por injeção, que se encontra no grupo de processos, como um dos mais adequados para a fabricação de grandes quantidades de componentes de estrutura e tamanhos complexos.

Embora o processo seja muito simples, a previsão da qualidade final da peça é uma tarefa difícil devido ao grande número de variáveis que interagem entre si.

### 3.2 Classificações dos plásticos

Os novos materiais poliméricos representam uma importante força motriz para o progresso tecnológico. Eles têm toda uma série de benefícios a oferecer e, em muitos casos, podem efetivamente substituir metais ou cerâmicas. Entre os diferentes tipos de polímeros, é feita uma distinção entre os termofixos, os elastômeros e os termoplásticos. Os polímeros termofixos não permitem mais deformação ou moldagem após sua reticulação química tridimensional. Os elastômeros também são materiais que dispõem de ligações cruzadas, mas têm a capacidade de deformação elástica e retornam à sua forma original após alívio da carga aplicada. Os termoplásticos, são fusíveis de forma reversível, uma vez que não são reticulados tridimensionalmente. As forças inter cadeia que operam nesta categoria de material são de menor intensidade, a exemplo das forças de Van der Waals.

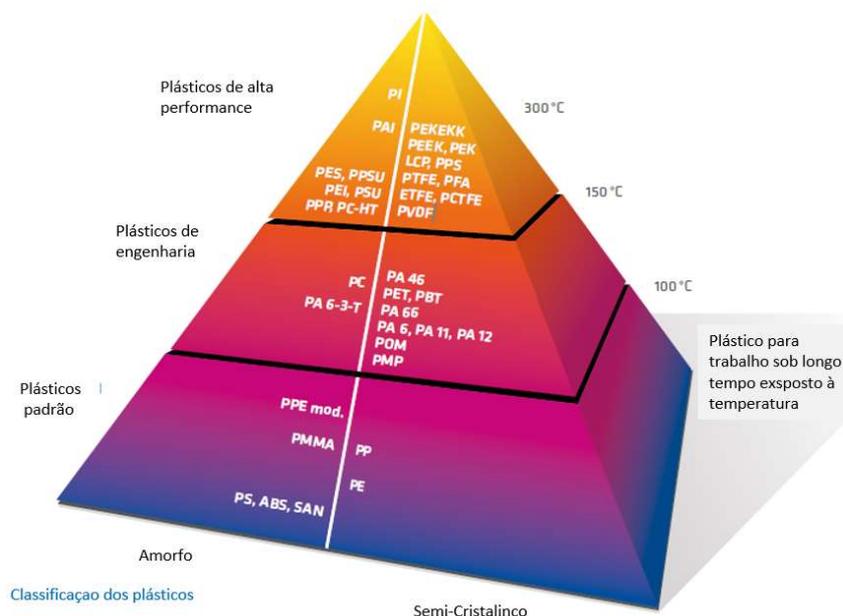
O grupo termoplástico dos polímeros é subdividido novamente em dois subgrupos diferentes, com base em sua estrutura, a saber, termoplásticos amorfos e os parcialmente cristalinos (ENSINGER, 2012).

Quando se trata de processamento dos termoplásticos, uma das características de grande interesse da indústria de processamento é a de que os mesmos possam ser conformados repetidamente e que também possam oferecer ampla gama de modificações através da incorporação de aditivos e cargas de reforços.

Em princípio, todo o grupo termoplástico é subdividido em três seções com base em sua estabilidade térmica: padrão, plásticos de engenharia e plásticos de alto desempenho. Todos esses grupos estão representados no diagrama em pirâmide dos plásticos, na **Figura 1**.

Além de descrever as distinções explicadas acima, a pirâmide também ilustra as quantidades relativas de fabricação dos diferentes grupos de produtos (em ordem decrescente para a ponta da pirâmide).

**Figura 1** – Diagrama em pirâmide dos plásticos



Fonte: Engineering Plastics – The Manual, Ensinger (2012).

### 3.3 Modificações e aditivações em plásticos

Os termoplásticos podem ser modificados em um espectro extremamente abrangente pela integração seletiva de aditivos e enchimentos (cargas). Isso permite

que as características de um material sejam adaptados para uma área específica de aplicação.

As modificações mais comuns no campo dos plásticos de engenharia e de alta temperatura, com foco à melhorar sua resistência mecânica, está associado à inclusão de fibras na matriz polimérica.

As fibras de reforço mais comumente utilizadas serão resumidas, a seguir.

### 3.3.1 Fibras de reforço

- As fibras de vidro são usadas principalmente para aumentar os valores de resistência.
- Aumento da resistência à tração, resistência e rigidez à compressão
- Melhoria da fluência
- Estabilidade dimensional térmica aumentada
- Redução de expansão térmica e encolhimento
- Redução na resistência ao impacto

Vale considerar que as fibras de vidro têm um efeito abrasivo. Por esta razão, os materiais reforçados com fibra de vidro são menos adequados para aplicações de fricção deslizante (causa alta abrasão no componente em que se desliza sobre) e, quando processadas, causam um nível elevado de desgaste da ferramenta de injeção, reduzindo assim, sua vida útil (ENSINGER, 2012).

### 3.4 Propriedades mecânicas

Quando os componentes plásticos são projetados para resistir a esforços mecânicos, suas características específicas têm um papel particularmente importante a desempenhar. As propriedades mecânicas fundamentais incluem:

- Resistência: resistência de um material em relação à deformação plástica sob uma tensão externa;
- Maleabilidade: a capacidade de um material de ser conformado sob tensão externa
- Rigidez: dimensão para a resistência de um material à deformação
- Tenacidade: dimensão para a capacidade de absorção de energia de um material sob tensão externa

Estas características do material são geralmente determinadas pela aplicação de curta duração de uma carga de tração em uma direção, com um teste de tração (por exemplo, de acordo com DIN EN ISO 527 ou ASTM D638).

Com base em teste de flexão, compressão e resistência ao impacto, métodos de teste adicionais estão disponíveis para caracterizar materiais e diferentes casos de carga. No entanto, para um adequado projeto de um componente, as condições de aplicação relevantes também devem ser levadas em consideração, pois devido à sua estrutura macromolecular, as propriedades mecânicas dos plásticos dependem fortemente das condições ambientais, como temperatura, período de exposição, tipo e velocidade de carga e teor de umidade (EMS-GRIVORY, 2018).

### 3.5 Requisitos básicos necessários em componentes plásticos com foco à substituição à ligas metálicas fundidas

Componentes plásticos técnicos devem ser caracterizados por:

- alta rigidez e força
- valores de propriedade que são pouco influenciados pela absorção de umidade
- Alta estabilidade dimensional e baixa deformação
- boa resistência a produtos químicos
- boa qualidade de acabamento superficial
- fabricação eficiente e econômica

Este forte perfil nas propriedades deve ser assegurado como condição para a substituição do metal, particularmente para peças previamente feitas de ligas fundidas (EMS-GRIVORY, 2018).

Os parâmetros importantes para a substituição de metal, como rigidez e resistência, não devem ser afetados pela absorção de umidade.

Há dois pontos fundamentais para se obter sucesso nessa substituição: O primeiro deles, as propriedades térmicas mecânicas devem ser adequadas para garantir o funcionamento confiável como material de substituição ao metal, o segundo motivo, está relacionado à vantagem do peso das peças feitas de compósitos poliméricos e sua resistência à corrosão.

Os custos de fabricação podem ser reduzidos através da substituição de metais através da eliminação de pós-tratamento típicos para ligas fundidas sob pressão, tais como, rebarbação, revestimento (pintura) e/ou subsequente corte de rosca produzindo-se o componente em sua forma final obtido diretamente do processo de injeção.

Além disso, economia de custos substanciais também podem ser alcançadas através de uma maior integração funcional no componente. Peças compostas (metal/plástico) podem ser substituídas por apenas um compósito polimérico (plástico de engenharia).

Da mesma forma, os subconjuntos compreendendo uma série de peças podem ser fabricados como um único componente moldado por injeção, prontos para produção em série. As inserções de metal (buchas, inserções roscadas) podem ser eliminadas.

### 3.6 Poliamidas

Poliamidas são mais comumente conhecidas como nylons. Uma poliamida comercialmente viável (mais especificamente nylon 6.6) foi descoberto por Wallace Carothers em 1935 na DuPont, que introduziu a poliamida para cerdas de escova de dentes em 1938 e fibras para meias de nylon em 1940. Uma segunda poliamida (nylon 6) foi descoberta na Europa em *I.G. Farbenindustrie* como resultado de esforços para contornar as patentes de nylon 6.6. Assim, no início, o nylon 6 foi produzido predominantemente na Europa Ocidental e no Japão e o nylon 6.6 foi produzido predominantemente nos Estados Unidos, embora a produção de ambos os tipos de poliamidas seja comum em todo o mundo agora. Poliamidas modificadas são usadas para peças e componentes flexíveis e resistentes. Um volume muito grande de poliamidas são usadas com reforços de fibra de vidro (para maior resistência) e cargas minerais (para menor empenamento e melhor estabilidade dimensional) para aplicações que exigem alta resistência, durabilidade e resistência (SASTRI, 2013).

#### 3.6.1 Produção de Poliamidas e propriedades

As poliamidas são tipicamente produzidas pela reação de condensação de um diácido e uma diamina. A nomenclatura da poliamida é derivada do número de átomos de carbono contidos na diamina seguido pelo número de átomos de carbono contidos no diácido, como pode ser visto na **Tabela 1**. Assim, a poliamida 6.6 ou nylon 6.6 é

feita a partir de hexametilenodiamina (seis átomos de carbono) e ácido adípico (seis átomos de carbono); e poliamida 4.6 ou nylon 4.6 é feito de 1,4-diaminobutano (quatro átomos de carbono) e ácido adípico (seis átomos de carbono). Poliamida 6 ou nylon 6 é feita de caprolactama, uma molécula com seis átomos de carbono que contém ambos os grupos reativos (ácido e amina). Similarmente, o nylon 6, a poliamida 12 ou o nylon 12 são feitos de dodecil-lactama, uma molécula com 12 átomos de carbono (FAUSTINO, 2014)

**Tabela 1** - Estrutura química das amidas

<i>Estrutura química da Amida</i>	<i>Número de Carbonos (C)</i>	<i>Poliamida</i>
$- [NH - (CH_2)_5 - CO]_n -$	6	PA 6
$- [NH - (CH_2)_6 - NH - CO - (CH_2)_4 - CO]_n -$	6+6	PA 6,6
$H - [NH - (CH_2)_4 - NH - CO - (CH_2)_4 - CO]_n - OH$	4+6	PA 4,6

Fonte: Adaptado de CUNHA, 2004

### 3.6.2 Poliamida 6.6 (Nylon 6.6)

O nylon 6.6 é produzido pela reação de condensação de hexametilenodiamina e ácido adípico. Os dois co-monomeros são primeiro reagidos para formar um sal. O sal purificado é então polimerizado em altas temperaturas sob vácuo para polímeros de alto peso molecular (SASTRI, 2013).

Existem pequenas diferenças nas características de desempenho entre o náilon 6.6 e o náilon 6. O náilon 6.6 geralmente tem maior cristalinidade e, portanto, maior resistência à tração, maior dureza e rigidez, mas menor resistência ao impacto do que o náilon 6.

O náilon 6.6 também tem uma temperatura de deflexão térmica mais alta e absorção de umidade ligeiramente menor comparada ao nylon 6.

A umidade absorvida atua como um plastificante e causa pequenas mudanças dimensionais que devem ser consideradas no processamento e no design (SASTRI, 2013).

As poliamidas combinam flexibilidade, dureza, tenacidade e resistência à deformação e suas principais características térmicas, mecânicas e químicas podem ser vistas na **Tabela 2**.

**Tabela 2** - Propriedades físicas das poliamidas

Propriedade	Unidade	PA6	PA6 30%GF	PA66	PA66 30%GF	PA 6.12	PA 12	NYLON 4.6
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	1,14	1,32	1,14	1,35	1,06	1,01	1,18
Absorção de água em equilíbrio	%	2,6	2,1	2,5	1,9	1,3	0,8	2,8
Temperatura de transição vítrea	°C	60	60	65	65	46	41	78
HDT (0,46 Mpa)	°C	170-180	213	200	255	135	121	285
HDT (1,8 Mpa)	°C	55-65	200	70-75	250	60	42	160
Ponto de fusão	°C	223	222	268	255	218	177	295
Tensão de ruptura	Mpa	45-85	90-150	50-85	130-175	41	45-52	7
Módulo de elasticidade	%	100-150	10-12	30-100	10/dez	100-250	275-325	25
Módulo de flexão	Gpa	1,2-1,7	4,5-7,5	1,5-2,8	5-9	0,5-12	0,8-1,2	3,7
Força de impacto (entalhado) a 23°C	J/m	25-90	175-320	40-120	90-120	45-70	106-133	125-200
Temperatura de processamento	°C	280	260	285-300	285-305	230-290	200-220	300-320

Fonte: Adaptado de Plastic in Medical Device – 2<sup>a</sup>ed. 2013

### 3.6.3 Presença de umidade em Poliamidas

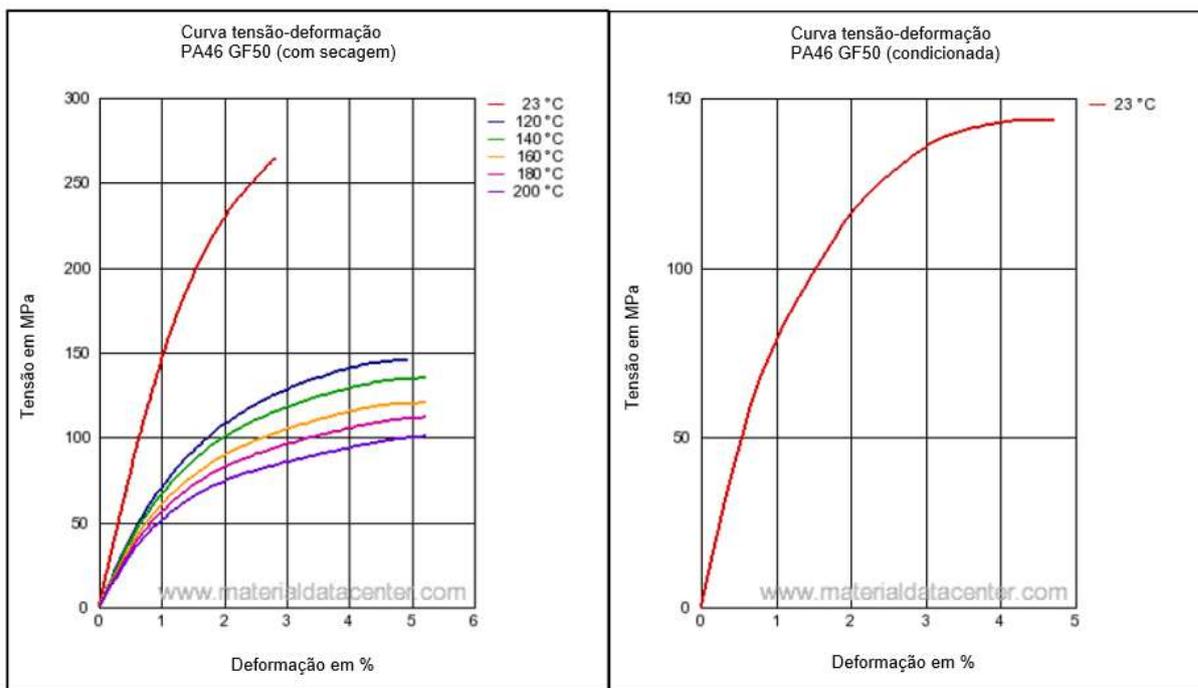
Nas poliamidas, os grupos polares de amida geram fortes interações nas fases cristalina e amorfa através das ligações de hidrogênio estabelecidas entre as moléculas vizinhas. No entanto, apesar destas fortes interações, as ligações de hidrogênio apresentam a desvantagem de não impedir a absorção de água (CARRASCAL et al, 2005; MONSON et al, 2008).

Neste sentido, a quantidade de água absorvida pelo material é significativa e depende das condições ambientais, tais como, temperatura e umidade relativa, pois, são condições que influenciam fortemente as propriedades física, térmica e mecânica do compósito, pois as moléculas de água na fase amorfa conseguem interagir com os grupos amida e, conseqüentemente, enfraquecem as ligações de hidrogênio existentes, gerando uma modificação no comportamento mecânico, bem como na transição vítrea da matriz. A este efeito, crescem-se fenômenos de dilatação dimensional (CRUM et al, 1967; ARIF et al, 2014).

A título de exemplo, apresentam-se dois gráficos, os quais podem ser vistos na **Figura 2**, que relacionam o comportamento da mesma poliamida, PA46 GF50, na

presença de umidade e na ausência desta. Ensaios realizados à mesma temperatura, demonstram que na presença de umidade verifica-se a uma redução de resistência e aumento de ductilidade.

**Figura 2** – Curvas de tensão em função da deformação para a poliamida PA46 GF50 na ausência (esq.) e presença (dir.) de umidade



Fonte: Material Data Center Datasheet of Stanyl® TW241F10 - PA46-GF50 – DSM Engineering Plastics.

### 3.6.4 Termoplásticos reforçados com fibra de vidro

Na indústria, de forma a melhorar as propriedades mecânicas, físicas, químicas e/ou elétricas dos materiais termoplásticos, é frequente a incorporação de reforços nos materiais plásticos. Além de reforços, podem ser usados outros aditivos com o intuito de conferir à matriz polimérica propriedades variadas que afetam as condições de processamento, o desempenho, a estética, o peso e até o custo global do material.

Tradicionalmente, as fibras foram consideradas como aditivos contribuindo na redução de custos dos materiais, e também na redução de ciclos de moldagem.

No entanto, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas dos polímeros, nomeadamente a resistência mecânica, aplicaram-se adições de fibras curtas aos polímeros. Como os reforços inorgânicos de fibras possuem maior dureza e sofrem menor deformação do que a matriz, origina-se uma redução generalizada da deformação desta. Esta redução é conseguida na interface entre a área superficial

das fibras adicionadas e a matriz polimérica. Significa isto que, quanto maior o número de fibras por unidade de volume de plástico, maior será a tensão de ruptura (FAUSTINO, 2014 apud MASCIA, 1995).

Hoje em dia, os reforços encontram-se geralmente sob a forma de fibras cilíndricas, apesar de também poderem ser utilizados noutras formas geométricas, nomeadamente flocos, esferas ou partículas. No caso dos termoplásticos, os fabricantes, através do processo de extrusão, por exemplo, adicionam fibras com comprimentos inferiores a 5 mm que são misturadas com a matriz polimérica, produzindo-se assim grânulos de termoplástico reforçado que, posteriormente, são utilizados no processo de moldagem por injeção (FAUSTINO, 2014 apud XANTHOS, 2010).

No entanto, a fibra de vidro, pelo facto de aliar um bom comportamento mecânico a um baixo custo, é o material mais utilizado como reforço na indústria dos plásticos, representando mais de 90% de todos os reforços utilizados em matrizes de materiais poliméricos (FAUSTINO, 2014 apud XANTHOS, 2010; RAHMAN, HASSAN e ROSIYAH, 2010).

Estudos realizados na poliamida 6.6 e apresentados em diversos artigos científicos, permitiram demonstrar a influência da incorporação de fibras de vidro nas propriedades deste polímero. Mais detalhadamente, experiências realizadas através de análises termogravimétricas revelaram que a aplicação de fibra de vidro permite melhorar a estabilidade térmica dos compósitos. Por outro lado, análises de calorimetria exploratória diferencial revelaram que a incorporação de fibra de vidro e percentagens de umidade na matriz polimérica resultam numa redução significativa do grau de cristalinidade. Aliás, esta redução ocorre independentemente da presença ou não de umidade. De forma quantitativa, verificaram-se reduções de cerca de 5% no grau de cristalinidade (RAHMAN, HASSAN e ROSIYAH, 2010).

Não obstante, através de métodos de determinação das propriedades mecânicas, resultados indicaram que as temperaturas de transição vítrea são sensíveis à absorção de umidade, no sentido de que, estas se reduzem na presença de umidade. No entanto, a incorporação de fibra de vidro na poliamida 6.6 fornece um aumento significativo na resistência do material, enquanto que, a extensão associada à fratura diminui.

### 3.7 Conhecimentos básico sobre o método Taguchi

#### 3.7.1 A aplicação da estatística

A estatística é o ramo de matemática que analisa dados numéricos. A estatística ajuda a transformar esses dados em uma forma compreensível para determinar as causas de padrões estatísticos de uma maneira mais eficaz. Uma causa do padrão pode então ser proposta, estudada e confirmada e uma ação para corrigir o padrão (se desejado) pode ser elaborada, estudada e implementada de forma semelhante. Cada uma dessas etapas subsequentes - identificando a causa dos padrões estatísticos, estudando os padrões, etc. - são, por sua vez, estudadas com o uso de modelos matemáticos e estatísticos.

A estatística como ciência teve sua origem na Alemanha do século XVIII e XIX. Governos utilizaram técnicas estatísticas para conduzir os censos, o que proporcionou uma base a partir da qual os impostos poderiam ser cobrados. O primeiro censo nos Estados Unidos, acontecido em 1790, permitiu que as técnicas estatísticas fossem trazidas para os Estados Unidos (STATISTICS-WORLD BOOK, 1984).

#### 3.7.2 As primeiras aplicações de estatística na indústria

Apesar da popularidade no mundo do esporte, as estatísticas não se espalharam prontamente para a indústria americana.

Antes da revolução industrial, a qualidade de um produto era conseguida durante sua fabricação. Era muito caro fazer um produto que era inaceitável. Os artesãos conheciam em detalhes a qualidade e as características de seus produtos. Cada item era produzido, do começo ao fim, por um artesão ou por uma grupo deles com os critérios que os clientes esperavam do produto. Com a revolução industrial, houve de repente milhares de trabalhadores não qualificados envolvidos em operações de fabricação de alta velocidade. Para a maior parte desses operadores, não havia o menor entendimento sobre os processos de fabricação ou a tecnologia envolvida por trás deles (ZAMBINI R.A., 1992 *apud* LOCHNER, R.H e MATAR J.E, 1990).

O primeiro esforço significativo para melhorar a qualidade da indústria coincidiu com a primeira aplicação da estatística aos processos industriais. Em 16 de maio de

1924, Walter A. Shewhart apresentou formalmente um memorando a seu supervisor no Bell Labs (ZAMBINI R.A., 1992 *apud* DOBYNS L., 1991). No memorando, ele propunha um método de usar estatísticas com vistas a melhorar a qualidade de um processo e/ou de um produto. O memorando também incluiu um esboço do primeiro gráfico de controle. A ideia de gráficos de controle foi inovadora e revolucionária. Ao monitorar o desempenho de um processo ou produto e estabelecer limites para valores aceitáveis e não aceitáveis (Limites de Controle), os gráficos de controle permitiam aos trabalhadores determinar quando seu trabalho apresentava uma má qualidade.

Na mesma época, Sir Ronald Fisher descobriu os princípios básicos de DOE (*Design of Experiments*), num esforço para melhorar os rendimentos agrícolas (FISHER, R. A., 1951). O projeto de experimento estatístico foi então, alternativamente denominado, como *Design of Experiments* (DOE), Desenho Fatorial ou *Fatorial Design of Experiments* (FDE) (ROY RANJIT, 1990), uma vez que utiliza várias das combinações possíveis de parâmetros de um processo e seus níveis associados (fato que pode levar a um número impraticável de experimentos à medida que o número de parâmetros e/ou níveis aumentam). Fisher também criou uma técnica chamada ANOVA (Análise de Variância) para analisar os dados obtidos a partir dos experimentos planejados.

Os dois conceitos – SPC (*Statistical Process Control*) e DOE (*Design of Experiments*) - trabalharam lado a lado para fornecer uma excelente maneira de melhorar a qualidade nas indústrias americanas das décadas anteriores à Segunda Guerra Mundial. O controle estatístico do processo (CEP) seria usado para identificar variações anormais em um processo ou produto e o delineamento de experimentos (DOE) seria usado para identificar as causas dessas variações.

Ações corretivas poderiam então ser tomadas para reduzir a variação do processo ou produto. Como resultado, as ideias de Shewhart foram implementadas na Bell Labs, em sua respectiva ala de produção, na Western Electric. De fato, a Western publicou um livro *inhouse* em 1956 intitulado Controle de Qualidade Estatística. Este texto abrangente (que é recomendado como uma referência excelente para detalhes sobre o básico de ambos, SPC e DOE) foi um dos primeiros livros a combinar CEP e DOE em um único livro, cunhando o título do livro como o

novo termo para esta combinação (STATISTICAL QUALITY CONTROL HANDBOOK, 1985).

Também foram feitas diversas outras contribuições para o campo de DOE. Algumas dessas contribuições foram delineadas por Namini (1989), como segue: Finney (1945) introduziu a replicação fracionária; R.C. Bose (1947) desenvolveu a teoria matemática II de experimentos fatoriais simétricos; C.R. Rao (1946) apresentou o uso de arranjos em experimentos fatoriais; R.L. Plackett e J. P. Burmam (1946) introduziram planos fatoriais fracionários ortogonais saturados (NAMINI, H., 1989). Além disso, outros estatísticos, como Dodge e Romig, acrescentaram ao sistema de controle de qualidade os planos de amostragem para inspeção de recebimento e para inspeção final do produto em uma base estatística (ZAMBINI R.A., 1992 apud LOCHNER, R. H., MATAR, J. E., 1990).

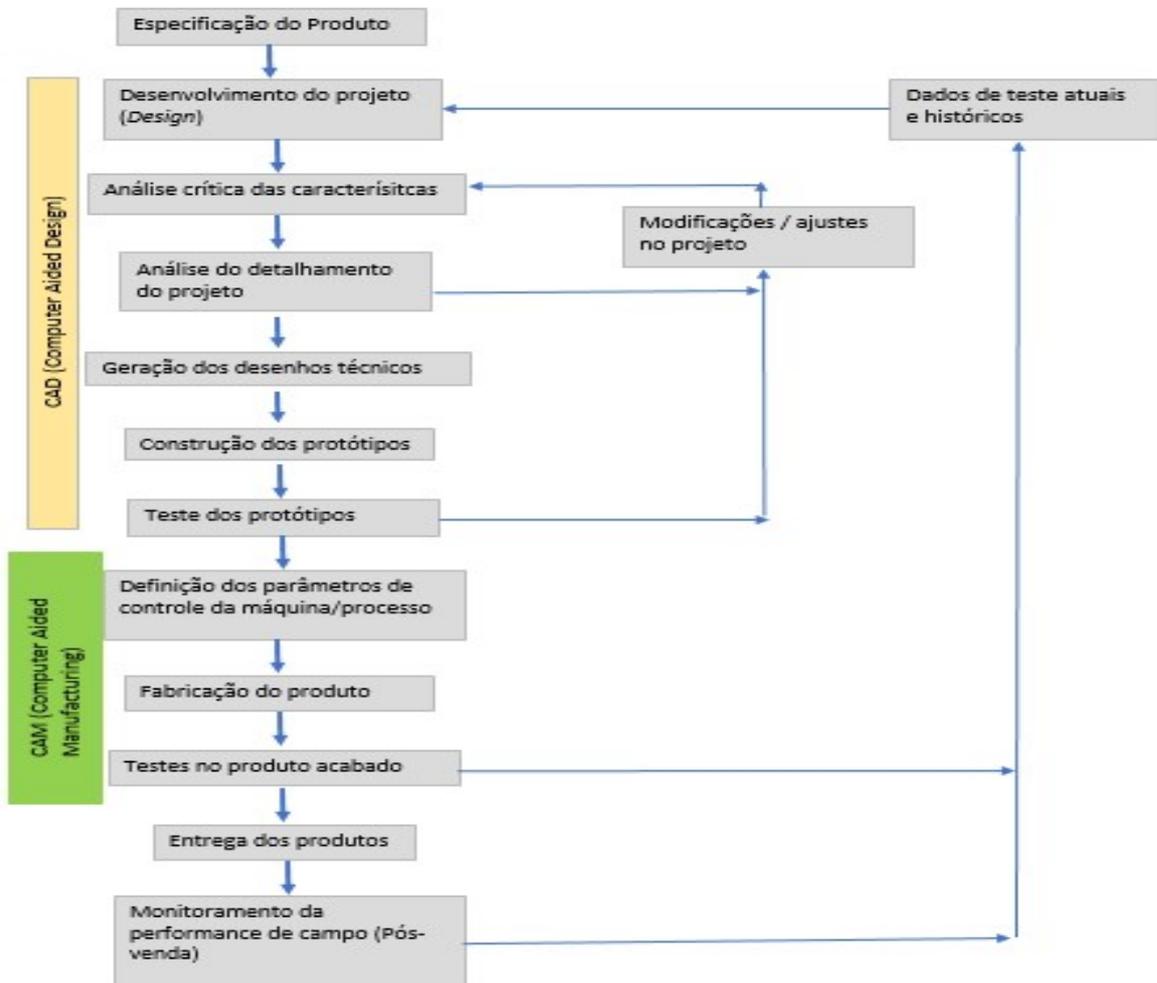
No entanto, eles também observam que o foco ainda era a de garantir a qualidade através da inspeção ou, na melhor das hipóteses, da qualidade através do monitoramento dos processos de produção (ZAMBINI R.A., 1992 apud PHADKE, M. S., 1989).

Depois da Segunda Guerra Mundial, com a maioria das indústrias do mundo em desordem, a indústria americana assumiu uma posição de monopólio no mundo. Uma vez que não havia outros grandes fabricantes para competir com os fabricantes americanos, quaisquer produtos defeituosos eram simplesmente reparados ou substituídos.

### 3.7.3 Contexto do Método Taguchi

As ideias de Genichi Taguchi, foram revolucionárias porque enfatizavam a colocação de técnicas de melhoria da qualidade nas fases iniciais (*design*) do ciclo de vida do produto em oposição às fases posteriores (fabricação/inspeção) do ciclo de vida do mesmo, que está resumido na **Figura 3**. Taguchi enfatizou que os produtos deveriam ser projetados para que fossem “insensíveis” às fontes de variação - um termo que ele cunha de, robusto.

**Figura 3 – Ciclo de vida de um produto (*Product Life Cycle*)**



Fonte: (ZAMBINI R.A., 1992), adaptado pelo autor.

Se um produto for projetado para ser robusto, na conceituação de Taguchi, pode-se então fazer uso de componentes de menor grau de qualidade (uma vez que a variação do produto final teria seu impacto minimizado, mesmo com a aplicação de um ou mais componentes com menor grau de qualidade) e a qualidade pode então ser alcançada com uma economia de custos e, não o oposto.

Mas o método de Taguchi não afeta somente o lado controle estatístico do processo (CEP) do controle total da qualidade (TQC) – ele também impacta fortemente no delineamento estatístico de experimentos (DOE). Usando matrizes ortogonais (ou "equilibradas") do método Taguchi, o número de experimentos necessários para fornecer ao experimentador a mesma quantidade de dados significativos de fatoriais tradicionais, acaba por ser reduzido significativamente, reduzindo assim, também os custos de experimentação.

Obviamente, uma vez que o método de Taguchi reduz o custo dos materiais e os custos de experimentação, ao mesmo tempo em que proporciona uma boa

qualidade de análise, resulta, ao final, numa enorme economia de custos para toda a organização.

#### 3.7.4 Breve história do método Taguchi

Taguchi desenvolveu seus métodos nos anos 50 e 60. A ele foi dada a tarefa de desenvolver uma metodologia para desenvolver produtos de alta qualidade. Taguchi, que na época era um gerente de desenvolvimento de produtos do Laboratório de Comunicações Elétricas da *Nippon Telephone and Telegraph Company*, conseguiu desenvolver os princípios do *design* robusto e recebeu o Prêmio Deming individual em 1962. Uma aplicação prática de seu método ocorreu no *Ina Tile Company*, no final dos anos 1950 (PHADKE, 1989). A empresa, à época, enfrentava uma crise de qualidade devido a grandes variações nas dimensões de azulejos, durante sua produção.

A classificação de azulejos defeituosos foi rejeitada, à época, por ser uma atividade demasiadamente cara como uma solução para o problema. Uma equipe de pesquisa foi criada para estudar o problema e descobriu-se que, a principal causa da variação dimensional estava na variação da temperatura dentro dos fornos que queimavam as azulejos. Para eliminar a causa da variação, a empresa teria que redesenhar e reconstruir o próprio forno, um projeto de meio milhão de dólares. No entanto, a equipe decidiu minimizar a sensibilidade das dimensões dos azulejos em relação à variação de temperatura no forno. Eles descobriram, através de “um pequeno conjunto de experimentos bem planejados de acordo com a metodologia *Robust Design* (PHADKE, 1989), que alterando-se o teor da cal nos azulejos, reduzia-se, significativamente, sua variação dimensional com um custo mínimo (uma vez que a cal também era o ingrediente de menor custo num azulejo). Desta forma, a *Ina Tile Company* obteve uma melhoria significativa na qualidade de seus azulejos, a um custo significativamente menor, fazendo uso da técnica de projeto robusto.

O planejamento Taguchi de experimentos faz uso de tabelas especialmente projetadas conhecidas como matriz ortogonal. Com a ajuda dessas tabelas, o projeto de experimentos se mostra mais simples em relação à aplicação e se mostra também consistente (ZAMBINI R.A., 1992 apud ROY R.K., 1990), requerendo apenas alguns poucos ensaios experimentais para estudar todo o sistema. Desta forma, todo o trabalho experimental se mostra mais econômico.

O resultado experimental é então transformado numa relação S/R (sinal/ruído). Taguchi sugere o uso da relação S/R para investigar o desvio na característica de qualidade em relação aos valores padrões. Como regra geral, são três os tipos de classificação de características de qualidade consideradas no estudo da relação S/R: o menor é melhor, o maior é melhor e o nominal é melhor. Independentemente da categoria da característica de qualidade, a relação S/R deve corresponder a característica de melhor qualidade. Portanto, o nível ótimo dos parâmetros do processo é o nível com a melhor relação S/R, de modo que, desta forma, a combinação ideal dos parâmetros do processo possa ser prevista.

### 3.7.5 Os passos do método Taguchi

Os métodos de Taguchi começam com a definição da palavra qualidade. Taguchi empregou uma definição revolucionária: "A qualidade é a perda conferida à sociedade, desde o momento em que um produto é fornecido" (WINNER, R.I., 1989). Phadke (1999) definiu ainda que, a qualidade ideal que um cliente pode esperar é que "cada produto forneça o desempenho alvo sempre que o produto for utilizado, em todas as condições de operação pretendidas, sem nenhum efeito colateral (DOBYNS L., CRAWFORD-MASON C., 1991).

Taguchi incluiu todos os custos associados a um produto ruim. Por exemplo, se uma parte importante não funcionar em um fim de semana, num conceito tradicional, a perda total para a sociedade seria o do valor da produção perdida e do custo dos salários do reparador (como taxa de horas extras, por exemplo). No entanto, para Taguchi a perda deve incluir também a perda do repouso e relaxamento do reparador, talvez a chance de ensinar ao filho a jogar futebol e um desgaste extra no carro do reparador.

No método de Taguchi, as fontes de variação são chamadas de fatores de ruído. Existem três tipos de fatores de ruído: externos (como o ambiente); unidade-por-unidade (a variação que todos os principais gurus estatísticos afirmam ser inerente a todos os processos de fabricação) e deterioração (diminuição do desempenho ao longo do tempo) (SUH, N.; 1990).

Os fatores de ruído formam um tipo de entrada para um produto ou processo. Os outros fatores de entrada são fatores de sinal e fatores de controle, enquanto geralmente, um sinal de saída único é a resposta.

Os tipos de fatores são melhor definidos usando o exemplo de um automóvel. Uma das respostas do carro é a sua aceleração. Neste caso, o fator de sinal (fator que é definido pelo usuário do produto para se obter uma resposta desejada) seria o pedal de aceleração. Os fatores de controle (fatores especificados livremente pelo projetista e inalteráveis pelo usuário do produto) incluem a potência do motor, o número de cilindros, o tipo de transmissão e muitos outros. Os fatores de ruído incluiriam itens como resistência ao vento (externa), pavimento úmido em relação ao pavimento seco (externo), desgaste das partes do motor (deterioração) e o fato de que o pedal de aceleração pode ser ligeiramente mais espesso que seu valor nominal (variação entre cada unidade produzida).

Os métodos de Taguchi consistem em três métodos diferentes: projeto do sistema/conceito, projeto do parâmetro e projeto da tolerância. Estes três métodos estão resumidos na **Figura 4** (que é reproduzida a partir de Chen, 1990) e são descritos abaixo com mais detalhes.

- Projeto de sistema/conceito refere-se à concepção do sistema global. No exemplo do automóvel, um sistema potencial seria um turbocharged, 146-hp motor de transmissão padrão, enquanto outro sistema potencial seria um V8, motor de transmissão de 200-hp automático.
- A concepção dos parâmetros refere-se à concepção dos componentes reais do sistema. Nesta etapa, o sistema global é agora fixo, e o *designer* deve decidir que tipo e quais níveis de fatores de controle serão usados para minimizar a perda de qualidade. No exemplo do automóvel, se o primeiro sistema acima fosse escolhido, um dos parâmetros seria escolher entre um cilindro de duas polegadas de diâmetro ou um cilindro de três polegadas de diâmetro.
- A concepção de tolerância refere-se à determinação da variação aceitável nos componentes individuais. Geralmente, essa etapa é executada somente se as duas primeiras etapas não tiverem êxito. Uma vez que tolerâncias mais apertadas significam custos de fabricação mais elevados, este passo envolve uma troca. No exemplo do automóvel, se todos os diâmetros de cilindro possíveis não permitissem ao motor atingir uma aceleração requerida, então as tolerâncias em componentes chaves do sistema teriam que ser reduzidas.

**Figura 4** - Três diferentes métodos na metodologia Taguchi: projeto do sistema/conceito, projeto do parâmetro e projeto da tolerância.



Fonte: CHEN 1990 – adaptada pelo autor.

É de se observar que o método ideal de Taguchi é o projeto de parâmetros, já que projetos robustos podem ser alcançados facilmente e a baixo custo nesta etapa. O projeto de sistema / conceito exige avanços significativos para fazer melhorias significativas e essas descobertas, que não podem ser agendadas ou previstas, podem levar a longos ciclos de desenvolvimento. O projeto de tolerância, como mencionado, envolve custo adicional para o ciclo de fabricação.

Na **Tabela 3**, o efeito dos três métodos de Taguchi sobre cada uma das quatro etapas de realização do produto é resumido. Note que é somente durante a concepção do produto que todos os métodos de Taguchi podem reduzir os efeitos de todos os tipos de fatores de ruído. Por isso, Taguchi enfatiza a aplicação de seus métodos na fase de projeto (ZAMBINI, 1992 *apud* PHADKE, 1999).

Os passos reais no uso do método de projeto de parâmetros de Taguchi são divididos em três grupos: planejar a experiência, realizar a experiência e analisar os dados da experiência (ZAMBINI, 1992 *apud* PHADKE, 1999). As etapas são divididas da seguinte maneira:

#### PLANEJANDO O EXPERIMENTO:

1. Identificar a resposta-alvo, os efeitos colaterais e os modos de falha;
2. Identificar fatores de ruído e condições de teste;

3. Identificar a característica de qualidade mais a função objetiva a ser observada;
4. Identificar os fatores de controle e seus níveis;
5. Conceber a experiência matricial e definir o procedimento de análise de dados;

#### EXECUÇÃO DA EXPERIÊNCIA:

6. Realizar a experiência matricial;

#### ANALISAR OS RESULTADOS:

7. Analisar os dados para determinar os níveis ótimos e prever a resposta do produto / processo nestes níveis;
8. Realizar uma experiência de confirmação para verificar os níveis otimizados (SUH N, 1990).

**Tabela 3** - O efeito dos três métodos do projeto robusto de Taguchi em três fases do ciclo de vida do produto.

Passos na realização do produto	Atividade do Controle de Qualidade	Eficácia na redução dos fatores de ruído			Observações
		Externo	Unidade a unidade	Deteriorização	
Projeto do produto	a. Conceito do projeto	Sim	Sim	Sim	a. Envolve inovações para redução da sensibilidade à todos os fatores de ruído b. O passo mais importante para a redução de todos os fatores de ruído c. Método para selecionar os “grades” de material, componentes e equipamentos mais viáveis economicamente e do ambiente de produção do produto
	b. Parâmetros do projeto	Sim	Sim	Sim	
	c. Projeto de tolerâncias	Sim	Sim	Sim	
Projeto do processo / manufatura	a. Conceito do projeto	Não	Sim	Não	a. Envolve inovações para redução da sensibilidade à variação unidade a unidade b. Importante para a redução da sensibilidade unidade a unidade em função da variação do processo produtivo c. Método para determinar as tolerâncias em relação aos parâmetros de processo
	b. Parâmetros do projeto	Não	Sim	Não	
	c. Projeto de tolerâncias	Não	Sim	Não	

Manufatura	a. Detecção e correção	Não	Sim	Não	a. Método para detecção do problema e para corrigi-lo, quando o mesmo acontece b. Método para compensação do problema, quando o mesmo acontece c. Última alternativa, útil quando a capacidade técnica do processo é insuficiente
	b. Controle de retroalimentação	Não	Sim	Não	
	c. Seleção	Não	Sim	Não	
Aplicação pelo usuário	Garantia e conserto (Serviços)	Não	Não	Não	

Fonte: Zambini R.A, 1992; Adaptado de G. Taguchi, "Sistema de controle de qualidade *off-line* e *on-line*", Conferência Internacional sobre Controle de Qualidade, Tóquio. Japão, 1978.

A característica de qualidade é então, chamada de relação sinal-ruído (S/R).

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left( \frac{\mu^2}{\sigma^2} \right) \quad (1)$$

Onde:

$\mu^2$ = média das respostas para determinado níveis de fatores

$\sigma^2$ = desvio padrão das repostas para determinada combinação de níveis de fatores

Esta relação (1) é definida para um procedimento nominal-o-melhor e como tal, é uma medida do sinal do processo (sua resposta) aos fatores de ruído no processo. De acordo com Phadke, maximizar esta razão é equivalente a minimizar a perda de qualidade após o ajuste, bem como maximizar a robustez do produto. Note que a equação (1) pode ser reescrita como:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} (MSD)^2 \quad (2)$$

Onde MSD é a resposta real menos a resposta alvo. Minimizar o MSD maximiza a razão S/R.

O outro termo a ser explicado é o da matriz ortogonal. Uma matriz ortogonal, a L9, por exemplo, é mostrada na **Tabela 4**, onde há quatro fatores de controle cada um com três níveis que serão combinados para formar nove ensaios.

A matriz ortogonal é um dispositivo que lista os níveis particulares de cada fator de controle para cada tentativa de interação. Como Sandgren aponta, "o termo experimento não se refere, necessariamente, a um teste em peças fabricadas, mas pode, ao invés disso, ser o resultado de uma operação computacional" (ZAMBINI, 1992 *apud* SANDGREN, 1991).

Cada coluna representa um fator de controle. Um fator de controle pode ser temperatura, tempo, tamanho, etc. Para cada fator de controle é atribuído níveis, tais como baixo, médio e alto. Pode se ver um exemplo na **Tabela 4**, onde cada linha representa o ensaio individual e os níveis de cada fator de controle a serem utilizados no ensaio. Os três níveis possíveis para um determinado fator de controle (p.ex., fator 1) pode representar um ajuste de temperatura, em nível baixo (nível um), nível médio (nível dois) e em nível alto (nível três), para uma máquina de termoformação, por exemplo. Similarmente, um outro fator de controle (p.ex., fator 2) pode representar o tempo de formação, com níveis de 1 segundo (baixo), 20 segundos (médio) e 40 segundos (alto). Mais uma vez, por exemplo, o quinto ensaio seria conduzido com os fatores de controle um e dois no nível dois, o fator de controle três no nível três e o fator de controle quatro, no nível um. Note que entre quaisquer duas colunas, cada par de níveis de fator de controle possível é encontrado e nenhum par é repetido.

Assim, a matriz é ortogonal ou equilibrada. Observe também que apenas 9 ensaios são necessários para conduzir esta experiência, enquanto que  $3^4 = 81$  ensaios teriam sido necessários para conduzir o experimento fatorial correspondente.

Finalmente, é assumido, neste exemplo de arranjo, que os fatores de controle são variáveis independentes - ou seja, os fatores de controle não interagem.

Para sistemas onde as interações existem, uma matriz ortogonal maior deve ser usada para estimar o efeito de tais interações (ZAMBANINI, 1992)

**Tabela 4** – Arranjo ortogonal L9 ( $3^4$ )

Condição	Fator A	Fator B	Fator C	Fator D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	3	3
5	2	2	1	1
6	2	3	3	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Fonte: criado pelo autor

### 3.7.6 O método de Taguchi versus outros métodos de qualidade

Os métodos de Taguchi apresentam semelhanças com outros métodos de qualidade de várias maneiras. Por exemplo, Taguchi tenta calcular o custo da qualidade, como Feigenbaum e Crosby. Além disso, Taguchi enfatiza, assim como os outros gurus da qualidade, a necessidade de reduzir a variação final, global, da resposta do produto e/ou do processo desejada. Finalmente, os Métodos de Taguchi também se utilizam de CEP, DOE e ANOVA.

Os métodos de Taguchi diferem dos métodos tradicionais na forma como são aplicados. Taguchi insiste (por razões demonstradas acima) que seus métodos sejam aplicados na fase de projeto, enquanto que a maioria das técnicas estatísticas são aplicadas na fase de fabricação. Além disso, Taguchi mede a perda total de qualidade como a perda incorrida por toda a sociedade, não somente as perdas na fabricação ou do cliente (ZAMBINI R.A., 1992 *apud* TAGUCHI, G., CLAUSING, D.;1990). Talvez a maior diferença entre o método de Taguchi (particularmente o delineamento de parâmetros) e os métodos tradicionais seja que Taguchi não propõe eliminar ou simplesmente reduzir as fontes da variação geral do produto ou processo, mas propõe reduzir a sensibilidade do produto ou processo a essas fontes. As fontes de variação ainda estão presentes, mas a variação real do produto ou do processo pode ser eliminada (ou reduzida).

#### 3.7.6.1 Pesquisas de aplicação do Método Taguchi (arranjos ortogonais) em otimização de processo de injeção de polímeros.

Hilmi e Yulis (2012), pesquisaram quais parâmetros de moldagem por injeção mais influenciavam na qualidade de peças de policarbonato usando o arranjo ortogonal do método de Taguchi. Os critérios selecionados para inferir na qualidade das peças em estudo foram: abaulamento, contração e resistência à tração final.

Para a condução do experimento, foram escolhidos quatro parâmetros de processo, como os mais significativos: temperatura de processamento, pressão de injeção, pressão de recalque e tempo de injeção, baseando-se em resultados de pesquisa anteriores. Foi aplicado o arranjo ortogonal Taguchi L9, calculado a relação sinal/ruído (S/R) e, em seguida, a análise de variância (ANOVA). Concluiu-se que o parâmetro de processo mais significativo que gerou o menor número de defeitos (abaulamento e contração) e o melhor valor para propriedade mecânica (resistência à

tração final) foi o tempo de injeção. Para validar o resultado experimental, o teste de confirmação foi feito com base no conjunto de melhores parâmetros de processo de combinação determinados a partir da relação S/R. Como resultado, a distorção e a resistência à tração final foram melhoradas cerca de 36,73% e 2,71%, respectivamente e chegou a uma contração de 0,0066mm como melhor resultado dos arranjos. Como conclusão, o método de Taguchi foi reconhecido como o método efetivo a ser usado para otimizar a configuração dos parâmetros de processo e para prever e resolver os problemas de qualidade que venham a ocorrer nas peças moldadas por injeção.

Kingsun Lee e Jui-Chang Lin (2012), aplicaram análise de elementos finitos para explorar as influências dos parâmetros de injeção na contração em abajures de diodos emissores de luz (LED) em moldes multi-cavidades. O estudo aplicou o método de Taguchi na moldagem por injeção de abajures LED para otimizar parâmetros de injeção com o objetivo de reduzir a contração do componente. O resultado alcançado satisfaz o padrão exigido na produção de LED e forneceu assistência prática aos engenheiros na seleção de parâmetros adequados na moldagem por injeção. Os resultados experimentais podem ser resumidos da seguinte forma:

1. O experimento para otimização do processo de injeção mostrou que se obtém a contração mínima durante o estágio de resfriamento e contração, dentro do molde. A contração mínima atingida foi de 0,03mm.

2. A ANOVA verificou que a temperatura de processamento da massa plástica é muito significativa nas injeções dos LED. O fator tempo de resfriamento teve a menor influência e, portanto, foi categorizado como erro estatístico.

3. A combinação ótima dos parâmetros de injeção foi confirmada através de experimento de confirmação. Os resultados indicaram que o erro entre os testes de confirmação e os valores previstos foi de 3,82%.

Kavade (2012), estudou a otimização dos parâmetros do processo de moldagem por injeção usando o polipropileno (PP) como o material de moldagem, em busca de uma combinação otimizada de parâmetros de processo capaz de produzir a qualidade desejada do produto em um tempo relativamente menor (aprimoramento na produtividade) e, de acordo com seu estudo, ele conclui que a metodologia de Taguchi tem sido caracteristicamente bem-sucedida para tal fim. Foi aplicada uma matriz

ortogonal Taguchi L18, sem considerar eventuais interações entre os fatores de entrada. Porém, algum efeito de interação poderia estar presente durante o experimento. Isso pode resultar em algumas observações que não acompanham *ipsis litteris* a teoria pura, embora ele não as tenha observado durante a experimentação. Kavade (2012) também comenta que uma vez que o material é um polímero de grade específico, resultados paralelos podem não ser conseguidos em experimentos similares. Mas, o método experimental pode ser aplicado analogamente Radhwan et al (2015) à maioria dos polímeros com alguns desvios menores. Os principais resultados extraídos de seu estudo foram: O tempo de ciclo foi reduzido em 4 segundos, contra o tempo de ciclo de 32,4 segundos antes da experimentação. A produtividade foi aumentada em 12,5%. Observou-se também redução na pressão de injeção, diminuindo-se assim a força de fechamento necessária que, por sua vez, resultou na redução do consumo de energia devido à redução de potência necessária para o fechamento do molde. E, por fim, conseguiu-se redução no peso da peça injetada, o que significou, ganho em relação ao consumo de matéria-prima.

Emel Kuram et al (2013), estudaram o reprocessamento do nylon 6 (PA6-GF) reforçado com fibra de vidro em cinco ciclos de processamento. As amostras de PA6-GF recicladas foram caracterizadas por suas propriedades químicas, térmicas e mecânicas em função do número de ciclos de processamento. Também foi investigado como os fatores controlados afetaram os fatores de saída e quais seriam as configurações de injeção otimizadas dos fatores controlados que deveriam ser empregadas para se obter as melhores propriedades mecânicas. Para atingir esses objetivos, um projeto de parâmetro de nível misto de Taguchi (L18) foi empregado como projeto experimental.

O número de reciclagem, temperatura de processamento, temperatura do molde, pressão de injeção e pressão de recalque foram considerados como fatores de controle. Análises de regressão foram aplicadas para prever a resistência à tração, resistência ao escoamento, energia de impacto e resistência ao impacto.

A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para determinar os efeitos dos parâmetros de controle na resistência à tração, resistência ao escoamento, energia de impacto e resistência ao impacto.

Na injeção plástica de PA6-GF, o número de reciclagem foi considerado o fator mais efetivo nas propriedades mecânicas. Dos resultados experimentais concluiu-se

que houve diminuição nas propriedades mecânicas após cada ciclo de reprocessamento. Os resultados do FTIR indicaram que a natureza química do PA6-GF permaneceu inalterado como consequência do reprocessamento múltiplo. Da análise DSC verificou-se que  $T_m$  e a porcentagem de cristalinidade não apresentou alteração significativa com o número crescente de reciclagem. As curvas TGA das amostras recicladas e virgens ficaram próximas uma da outra. O peso residual de todas as amostras a  $700^\circ\text{C}$  mostrou-se em conformidade para um PA6-GF. Dos resultados experimentais concluiu-se que o PA6-GF virgem apresentou melhores resultados para as propriedades mecânicas quando comparado com o PA6-GF reciclado.

Embora os resultados tenham demonstrado que as propriedades mecânicas do PA6-GF virgem apresentaram melhores resultados, os resultados das propriedades mecânicas ainda se mostraram aceitáveis até a 3ª reciclagem.

Especialmente, as propriedades mecânicas do PA6-GF reciclado obtidos a partir da 1ª reciclagem não eram muito diferentes daqueles de PA6-GF virgem e, portanto, poderia ainda ser usado para diferentes aplicações na indústria.

ANOVA foi usada para determinar os efeitos do parâmetro de controle sobre a resistência à tração, resistência ao escoamento, energia de impacto e força de impacto. Dentre os parâmetros investigados neste estudo, o número de reciclagem teve o maior efeito nas propriedades mecânicas.

Foram usadas análises de regressão para prever a resistência à tração, força de elasticidade, impacto e força de impacto. As comparações dos resultados obtidos provaram que os valores previstos para cada resposta ficaram próximo dos valores medidos experimentalmente.

Os erros absolutos médios de resistência à tração, resistência ao escoamento, energia de impacto e resistência ao impacto obtidos foram de 2,42%, 2,37%, 4,70% e 4,77%, respectivamente. Assim, as equações matemáticas desenvolvidas neste estudo podem ser usadas para inferir nas propriedades mecânicas da moldagem por injeção de um PA6-GF.

Radhwan et al (2015), pesquisaram sobre uma otimização em relação à contração na moldagem por injeção, usando o método Taguchi. Os parâmetros de processo selecionados foram: a temperatura do molde, temperatura de

processamento, pressão de recalque, tempo de recalque e tempo de resfriamento. Foi utilizado o *software Moldflow Plastic Insight* (MPI) para a simulação do processo de moldagem por injeção. O número de simulações foi baseado na tabela L27 de arranjo ortogonal com três níveis por fator. O *software* Minitab foi usado para analisar o resultado onde a relação S/R (sinal/ruído) e análise de variância (ANOVA) foram utilizadas para se identificar os fatores mais significativos que contribuíram para a contração.

Do estudo se concluiu que o método de Taguchi é um método muito útil que pode ser usado para fornecer maneiras econômicas em vez de métodos de tentativa e erro que contribuem para o desperdício. As conclusões do projeto foram as seguintes: A configuração recomendada de parâmetros para encolhimento foi produzida pela combinação de ajustes na temperatura de processamento com 220°C, temperatura do molde com 58°C, pressão de recalque de 85 MPa, tempo de recalque de 2,8 segundos e tempo de resfriamento de 50 segundos.

A partir do estudo da ANOVA, mostrou-se que a temperatura de processamento contribui numa porcentagem de 96,1% seguido pela temperatura do molde com 2,47%. O fator do tempo de recalque contribuiu com apenas 0,57%, seguido da pressão de recalque com 0,51% e, por último, o tempo de resfriamento que contribuiu com apenas 0,35%.

Do resultado sobre a contração, a resposta mostrou que o fator que menos contribuiu está relacionado ao tempo de resfriamento. Isso pode ser devido à pequena diferença entre os tempos de resfriamento definidos para cada nível que só difere em 5 segundos um do outro.

Abohashima *et al* (2015), apresentaram uma maneira simples e eficiente de estudar a influência dos parâmetros de moldagem por injeção na porcentagem de defeitos. Usando delineamento de experimentos e a abordagem de Taguchi, os parâmetros mais significativos, tais como, pressão de injeção, pressão de recalque, velocidade de injeção e temperatura da cavidade, foram otimizados para minimizar a porcentagem de defeitos mais comuns, extraídos de um estudo de gráfico de Pareto, a saber: rótulo invertido e enchimento de plástico incompleto, os quais apareciam em recipientes de paredes finas para embalagens de alimentos.

Os resultados do estudo experimental indicaram que a velocidade de injeção e a pressão de injeção foram os fatores determinantes para a qualidade do componente. Com um fluxo volumétrico de injeção de 300cm<sup>3</sup>/s, se conseguiu o menor

número de defeito de etiqueta invertida e a pressão de injeção de 2000 bar foi o fator que levou ao menor número de defeitos de enchimento incompleto.

Maosheng et al (2016) trabalharam nos parâmetros de otimização do processo de moldagem por injeção plástica de polipropileno PP-4025 em dois estágios. Na primeira etapa, os parâmetros temperatura de injeção, velocidade de injeção, pressão de recalque, tempo de recalque e tempo de resfriamento, foram selecionados. O experimento foi realizado com arranjo ortogonal de Taguchi, e as características de qualidade (comprimento do produto e empenamento) foram estudados como resposta do processo. Calculou-se a relação S/R e aplicou-se o método ANOVA, a qual foi utilizada para identificar os parâmetros mais significativos do processo para as combinações iniciais ideais.

Na sequência, na otimização multiobjetiva dos parâmetros do processo considerou-se, além dos resultados das características de qualidade (comprimento e empenamento), o peso da peça, e a eficiência energética, através da metodologia NSGA-II (*Non Sorting Genetic Algorithm II*). Os resultados obtidos podem ser resumidos da seguinte forma: a temperatura de injeção tem um efeito extremamente importante na relação S/R no resultado do comprimento do produto e no empenamento. Os parâmetros ideais encontrados foram, temperatura de injeção de 230°C, velocidade de injeção de 90mm/s, pressão de recalque de 65MPa, tempo de recalque de 4,5s e tempo de resfriamento de 5s.

Através de Taguchi e do algoritmo NSGA-II, para as otimizações do três objetivos, chegou-se às configurações de parâmetros cujo erros médios ficaram abaixo de 15%, em relação ao esperado.

Chi-Hung (2016), utilizou o método de Taguchi e o método *grey relational analysis*, para resolver o problema de deformações de uma ventoinha de refrigeração de computador.

Os resultados indicaram que as razões S/R dos fatores de variância que levaram ao desvio na distribuição do esforço de cisalhamento correspondiam aos resultados do método *grey relational analysis*. O fator mais influente encontrado foi a temperatura do molde, seguido pelo tempo de injeção, pressão de injeção e temperatura de processamento. Além disso, a análise dos graus relacionais, que representam uma taxa de contribuição dos fatores, indicou que o fator de variância mais significativo foi a temperatura do molde, seguido do tempo de preenchimento.

Os fatores, pressão de enchimento e a temperatura de processamento foram os que apresentaram variação menos significativa e, que podem portanto, ser ajustados de forma a atingir o objetivo de redução de custo durante a produção.

Com base nos resultados, concluiu-se que a abordagem proposta pode garantir o sucesso de um processo, reduzir o número de testes de moldes (*try out*) e economizar o custo e o tempo que, de outra forma, poderiam ser desperdiçados.

Chi-Hung (2016), mostrou que um processo pode ser otimizado de forma científica e racional, obtendo como resultado, um produto que é fabricado através de um processo otimizado, atendendo aos requisitos de projeto, levando-se a obtenção de um maior nível de competitividade devido aos efeitos de redução de custos.

Yizong et al (2017), aplicou a metodologia Taguchi para determinar os efeitos dos parâmetros de processamento nas propriedades de amostras moldados de poliestireno (PS) em corpo de prova ASTM D638. Seis parâmetros foram selecionados para o processo de moldagem por injeção que incluiu número de portas (*gates*), velocidade de injeção, pressão de injeção, temperatura do molde, temperatura de injeção e pressão de recalque.

A cada parâmetro foram atribuídos três níveis, exceto pelo número de *gates* que foi definido com apenas dois níveis. De acordo com o número de fatores (parâmetros) e o número de níveis, o arranjo ortogonal L18 foi utilizado para a realização dos testes, portanto, uma quantidade total de 18 testes com 60 amostras ASTM D638 produzidas. Os dados obtidos foram analisados calculando-se a relação sinal-ruído (S / N), "maior-é-melhor".

A linha de solda (2 *gates*) foi a responsável pela maior redução na resistência à tração. Os outros parâmetros tiveram aproximadamente o mesmo grau de influência sobre a resistência, mas a temperatura do polímero fundido teve um impacto ligeiramente maior em comparação com os demais. A temperatura de processamento foi a que teve a segunda maior influência na resistência à tração, onde se constatou que o aumento na temperatura fez com que a resistência à tração diminuísse. Isso foi explicado pela baixa tensão residual apresentada nas amostras quando a temperatura de processamento foi aumentada. À medida que a temperatura de processamento era aumentada, o polímero fundido necessitava de mais tempo para arrefecer até sua solidificação. Isto deu ao polímero fundido mais tempo para aliviar a tensão residual induzida pelo fluxo rápido da moldagem por injeção. Esta explicação também foi

usada para o caso da temperatura do molde, onde a temperatura crescente do molde causou diminuição da tensão residual e uma respectiva diminuição na resistência à tração. O menor gradiente de temperatura entre o polímero fundido e a temperatura do molde levou o polímero fundido a esfriar mais lentamente e deu mais tempo para a tensão residual se dissipar. O aumento na temperatura de processamento também poderia causar a degradação da cadeia polimérica e ter, portanto, um efeito negativo sobre a resistência à tração.

Constatou-se também que o peso molecular diminuía à medida que a temperatura de processamento aumentava, causada pela degradação do material, mas o efeito se mostrou insignificante quando comparado com a alteração da largura nas amostras, que é um efeito da tensão residual.

Kiatcharoenpol e Vichiraprasert (2018), usou o método Taguchi e ANOVA com o objetivo primário de desenvolver uma modelagem matemática para otimizar e encontrar a condição adequada que pudesse produzir peças com contração volumétrica e contração linear mínimas, estudando os parâmetros tempo de injeção, temperatura de injeção, temperatura do molde, pressão máxima de injeção, tempo de recalque, pressão máxima de recalque e tempo de resfriamento como fatores controláveis e, como fatores incontroláveis estudados foram temperatura do ar e temperatura de ejeção.

Os experimentos foram realizados com uma matriz ortogonal (L16). Realizou-se 64 ensaios experimentais. Com base no teste ANOVA, três fatores e duas interações foram encontrados como significativos estatisticamente. Os fatores de maior significância foram temperatura de injeção, tempo de recalque e tempo de resfriamento.

Em relação às interações, foram significativas: a interação entre tempo de injeção e tempo de recalque e a interação entre o tempo de recalque e o tempo de resfriamento. A condição otimizada encontrada foi, temperatura de fusão de 215°C, tempo de recalque de 6s e tempo de resfriamento de 14s, em associação com encolhimento de volume de 6,5% e contração linear de 0,94 mm.

### 3.8 Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística para analisar a variação de uma variável de resposta. Frequentemente, usa-se ANOVA para testar a

igualdade entre várias médias, comparando a variância entre os grupos em relação à variação dentro dos grupos (erro aleatório).

Sir Ronald Fisher (1925) foi pioneiro no desenvolvimento da ANOVA para analisar os resultados de experimentos agrícolas (FISHER R.A., 1925). Hoje, a ANOVA está incluída em quase todos os pacotes estatísticos, o que a torna acessível aos pesquisadores em todas as ciências experimentais. É fácil inserir um conjunto de dados e executar uma ANOVA simples, mas é desafiador escolher a ANOVA apropriada para diferentes projetos experimentais, para examinar se os dados aderem aos pressupostos de modelagem e, para interpretar os resultados corretamente.

São dois os modelos mais comuns de aplicação ANOVA. O primeiro modelo, ANOVA de Um Fator (*One Way*), é uma extensão do teste t de *Student* que nos permite comparar as médias entre várias amostras independentes. O segundo modelo, ANOVA de Dois Fatores (*Two Way*), tem 2 fatores, A e B e cada nível de fator A aparece em combinação com cada nível do fator B. Este modelo nos permite comparar médias entre os níveis de fator A e entre os níveis do fator B; Além disso, pode-se examinar se fatores combinados induzem à efeitos de interação (sinérgicos ou antagônicos) na resposta (LARSON, 2008).

### 3.8.1 ANOVA Um Fator

Considerando-se um experimento que tenha dois ou mais tratamentos e múltiplas repetições para cada tratamento, usa-se um modelo de ANOVA de Um Fator (*One Way*) para testar a hipótese nula de que todos os tratamentos têm a mesma média de população. A hipótese alternativa é que pelo menos uma média de população difere dos outros. Avalia-se, se a variabilidade entre as médias das amostras é suficientemente grande, em relação à variação de erro aleatório, onde se rejeita então a hipótese nula e conclui-se que existem diferenças verdadeiras entre as médias das populações (LARSON, 2008).

#### Premissas

Quando se modela dados usando ANOVA de Um Fator, faz-se quatro suposições:

- (1) as observações individuais são mutuamente independentes;
- (2) os dados aderem a um modelo estatístico aditivo que compreende efeitos fixos e erros aleatórios;

(3) os erros aleatórios são normalmente distribuídos; e

(4) os erros aleatórios têm variação homogênea.

Violações desses pressupostos podem comprometer ou invalidar os resultados da ANOVA, então, vamos examinar cada um, individualmente.

#### Independência

O valor de uma observação não deve influenciar o valor de outras observações. Todas as unidades experimentais devem ser independentes e cada unidade experimental deve contribuir com apenas um valor de resposta.

#### Aditividade

Pode-se representar os dados usando um modelo estatístico com componentes aditivos. O modelo de ANOVA de Um Fator pode ser escrito da seguinte forma: resposta individual = (média geral) + (Efeito do tratamento) + (Erro aleatório).

#### Normalidade

Assume-se que os erros aleatórios dentro de cada grupo de tratamento e os desvios entre as médias de cada grupo, têm uma distribuição de probabilidade normal ou gaussiana. Procedimento de Shapiro-Wilk (SHAPIRO S.S., WILK M.B.; 1995) pode ser usado para testar a normalidade em amostras de tamanho menor do que 2000 observações.

#### Variação homogênea

Finalmente, assume-se que os erros aleatórios dentro de um grupo têm variação idêntica à todos os demais grupos de tratamento, representados pelo parâmetro  $\sigma^2$ . O teste de Levene é amplamente utilizado para testar a hipótese nula de que as variâncias são homogêneas (LARSON, 2008 apud LEVENE, 1990).

Juntos, os pressupostos de independência, variações homogêneas e normalidade implicam que os erros residuais são uma amostra de desvio normal distribuído de maneira independente e idêntica.

### 3.8.2 ANOVA Dois Fatores

Em um delineamento de experimentos fatorial, cada fator é cruzado com os outros fatores. Considere, por exemplo, dois fatores fixos, A e B, com x níveis para o fator A e y níveis para o fator B e xy formados por combinações de A e B. Os fatores

individuais estão associados a efeitos "principais", enquanto os fatores cruzados criam "interação" entre os efeitos. Se existem repetições para todos os níveis xy, então diz-se que se tem um projeto fatorial "completo", caso contrário, trata-se de um projeto fatorial "incompleto" ou fracionado.

O experimento fatorial permite examinar fatores individuais e suas interações; Além disso, o planejamento fornece replicações naturais que resultam de fatores cruzados (LARSON, 2008).

Testes de efeitos principais são testes da média de um fator em relação aos níveis dos outros fatores. A ausência de interação entre dois fatores implica que o efeito aditivo de um fator é idêntico em todos os níveis do outro fator. Nessa situação, os testes e a interpretação dos fatores principais são diretos. Se as interações existem, é preciso interpretar os principais efeitos com cautela, porque as relações entre os níveis médios de um fator diferem de acordo com os níveis do segundo fator (LARSON, 2008).

A definição formal de experimento fatorial de ANOVA de Dois Fatores requer notação estatística para identificar níveis específicos de A e B e de sua combinação, bem como indicar cada repetição dentro de cada combinação. Conceitualmente, o modelo para cada observação é o seguinte:

$$\begin{aligned} (\text{Resposta individual}) &= (\text{Média geral}) + \\ &+ (\text{Efeito aditivo para o nível do fator A}) + \\ &+ (\text{Efeito aditivo para o nível do fator B}) + \\ &+ (\text{Efeito de interação para a combinação de níveis de A e B}) + \\ &+ (\text{erro aleatório}). \end{aligned}$$

Na **Tabela 5**, tem-se um exemplo de matriz com a distribuição dos fatores A e B em suas linhas e colunas, com suas respectivas médias. Ela é uma base para se levar a cabo os cálculos de ANOVA na ausência de um *software* estatístico.

**Tabela 5** - Distribuição dos dados para ANOVA dois fatores.

Fator A	Fator B				Média
	1	2	...	b	
1	$y_{111}, \dots, y_{11r}$	$y_{121}, \dots, y_{12r}$	...	$y_{1b1}, \dots, y_{1br}$	$\bar{y}_{1..}$
2	$y_{211}, \dots, y_{21r}$	$y_{221}, \dots, y_{22r}$	...	$y_{2b1}, \dots, y_{2br}$	$\bar{y}_{2..}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
a	$y_{a11}, \dots, y_{a1r}$	$y_{a21}, \dots, y_{a2r}$	...	$y_{ab1}, \dots, y_{abr}$	$\bar{y}_{a..}$
Média	$\bar{y}_{.1.}$	$\bar{y}_{.2.}$	...	$\bar{y}_{.b.}$	$\bar{y}_{...}$

Fonte: criado pelo autor

Na **Tabela 6**, apresenta-se as fórmulas de cálculo de uma ANOVA dois fatores, base para cálculos com planilhas eletrônicas.

**Tabela 6** - Fórmulas de cálculo para ANOVA dois fatores.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios (variâncias)	F
Fator A	SQA	r-1	$QMA = SQA/(r-1)$	$\frac{QMA}{QME}$
Fator B	SQB	c-1	$QMB = SQB/(c-1)$	$\frac{QMB}{QME}$
<sup>AB</sup> (interação)	SQAB	$(r-1).(c-1)$	$QMAB = SQAB/(r-1)(c-1)$	$\frac{QMAB}{QME}$
Erro	SQE	$rc(n'-1)$	$QME = SQE/rc(n'-1)$	
Total	SQT	n-1		

Fonte: criado pelo autor

Onde:

r = número de categorias do fator A

c = número de categorias do fator B

n' = número de repetições em cada célula

n = número total de observações ( $n = rkn'$ )

$X_{ijk}$  = valor da k-ésima observação na categoria i do fator A e na categoria j do fator B

Tal como acontece com a ANOVA de Um Fator, os desvios da média geral quando expandidos algebricamente, elevados ao quadrado e somados em níveis de ambos os fatores, produzem somas de quadrados associadas a efeitos principais para o fator A, efeitos principais para o fator B, efeitos de interação devido a combinações entre A e B, e erro aleatório.

### 3.8.3 Projeto do experimento, efeito do tamanho, tamanho da amostra e poder do teste estatístico

Os princípios que orientam o planejamento de ensaios randomizados e controlados incluem uma clara definição do objetivo do estudo, escolha do projeto experimental, seleção de tratamentos, aleatorização de indivíduos para os tratamentos e determinação *a priori* do tamanho da amostra para alcançar o poder de teste estatístico adequado (LARSON, 2008 apud STANLEY, 2007).

Os testes de hipóteses devem ser feitos para evitar concluir favoravelmente à hipótese alternativa quando, de fato, a hipótese nula não deveria ser rejeitada. Este erro é chamado de erro do tipo I, que também pode ser expressado pela letra grega alfa ( $\alpha$ ). Em termos técnicos, é probabilidade de rejeição da hipótese nula quando ela não deveria ser rejeitada.

Os parâmetros mais comumente utilizados são: nível de significância de  $\alpha = 0,05$  e, por convenção comum, define-se o tamanho do efeito como  $\gamma = (\text{média máxima da população} - \text{média mínima da população}) / \sigma$ , onde  $\sigma$  é o desvio-padrão da população.

Porém, poucos entendem a importância de reportar o tamanho do efeito, mesmo em situações em que a significância estatística não foi devidamente alcançada. De fato, o tamanho do efeito mede a magnitude da diferença entre dois grupos e um dos estimadores mais frequentes para isso é a média. O tamanho do efeito, na ausência de significância estatística, pode indicar que faltou poder. Em outras palavras, faltou quantidade de observações para que a significância estatística fosse alcançada (LARSON, 2008).

Outra consideração a ser levada em conta é de que o poder do teste é maior para projetos equilibrados do que para os desequilibrados e, com poucos grupos de tratamento em vez de muitos. As experiências devem ser projetadas para ter um poder de teste razoável (tipicamente definido em 0,80), para detectar diferenças de tratamento realistas.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta as principais características do compósito PA66 com 50% de fibra de vidro (EMS-Grivory GV-5H), escolhido para o estudo, a máquina injetora utilizada para a produção dos corpos de prova, as condições de processamento para a realização do projeto de experimentos Taguchi, os ensaios mecânicos realizados e os testes de DSC conduzidos nas amostras que apresentaram o pior e o melhor resultado de resistência máxima de tração (RT<sub>máx</sub>).

### 4.1 Material

O material estudado foi uma poliamida semi cristalina (parcialmente aromática) reforçada com 50% em peso de fibras de vidro (Grevory GV-5H). Grivory® GV é o nome da marca de um grupo de plásticos de engenharia fabricados e comercializados pela EMS-GRIVORY.

Grivory GV-5H está disponível em forma granular, com razão de aspecto abaixo de 20, para processamento por moldagem por injeção em máquinas e moldes convencionais, não requerendo projetos diferenciados para a aplicação do mesmo.

As propriedades mecânicas e térmicas do compósito polimérico a ser estudado, podem ser vistos nas **Tabelas 7 e Tabela 8**, respectivamente.

**Tabela 7** - Propriedades mecânicas do compósito Grivory GV-5H

Módulo de elasticidade E	1 mm/min	ISO 527	Mpa	Seco	15500
				Condicionado	14500
Tensão de ruptura	5 mm/min	ISO 527	MPa	Seco	230
				Condicionado	190
Deformação até ruptura	5 mm/min	ISO 527	%	Seco	3,0
				Condicionado	4,0
Tensão de impacto	Charpy, 23°C	SO 179/2-1eI	Kj/m <sup>2</sup>	Seco	95
				Condicionado	95
Tensão de impacto	Charpy, 30°C	SO 179/2-1eI	Kj/m <sup>2</sup>	Seco	85
				Condicionado	85
Dureza (penetração de esfera)		ISO 2039-1	MPa	Seco	265
				Condicionado	235

Fonte: Brochura Grivory GV – Fabricante EMS.

**Tabela 8** - Propriedades térmicas do compósito Grivory GV-5H

Ponto de fusão	DSC	ISO 11357	°C	Seco	260
Temperatura de deflexão térmica HDT/A	1,80 Mpa	ISO 75	°C	Seco	240
Temperatura de deflexão térmica HDT/A	8,00 Mpa	ISO 75	°C	Seco	165
Coefficiente de expansão térmica Longitudinal	23-55°C	ISO 11359	10 <sup>4</sup> /k	Seco	0,15
Coefficiente de expansão térmica Transversal	23-55°C	ISO 11359	10 <sup>4</sup> /k	Seco	0,9
Temperatura máxima de trabalho	Longa duração	ISO 2578	°C	Seco	100-120
Temperatura máxima de trabalho	Curta duração	ISO 2578	°C	Seco	220

Fonte: Brochura Grivory GV – Fabricante EMS.

#### 4.2 Máquina e Molde

O compósito Grivory GV-5H pode ser processado em máquinas e condições convencionais, adequados para injeção de poliamidas, não se exigindo nenhuma condição mais específica.

Para esse estudo, as amostras foram produzidas no SENAI Mario Amato através de uma injetora ROMI, modelo EN100, com força de fechamento de 100 Ton.

#### 4.3 Condições de Processamento

Utilizou-se um projeto de experimentos Taguchi (Arranjo Ortogonal) para identificar os principais parâmetros de injeção com foco à otimização do processo de moldagem por injeção, sem perda das propriedades mecânicas e com o intuito de se obter o maior valor de resistência a tração nos corpos de prova ASTM 638.

Na moldagem por injeção, há uma série de fatores que juntos, produzem efeitos significativos na resistência a tração, que são: temperatura do molde, tempo de enchimento, dimensões do *gate*, pressão de injeção, temperatura de processamento e tempo de resfriamento, dentre outros mais.

Neste trabalho, as condições de processamento (fatores e seus respectivos níveis) do arranjo ortogonal estudados se encontram na **Tabela 9**.

**Tabela 9** – Fatores e respectivos níveis de *set up* de máquina para produção dos corpos de prova

Fatores (Parâmetros do processo)		Abreviatura e unidade	Nível 1	Nível 2
Temperatura de processamento	[A]	MeT (°C)	270	300
Fluxo volumétrico	[B]	VF (cm <sup>3</sup> /s)	83	142
Pressão de recalque	[C]	PR (bar)	300	800
Contrapressão	[D]	CP (bar)	5	10
Velocidade da rosca	[E]	VR (min <sup>-1</sup> )	50	100
Tempo de recalque	[F]	TR (s)	1	5

Fonte: elaborado pelo autor

A **Tabela 10** mostra o arranjo ortogonal Taguchi escolhido, o L16, o que implica em 16 diferentes condições de parametrização de processo para a produção dos corpos de prova.

**Tabela 10** - Arranjo Ortogonal Taguchi L16

Condição	MeT (°C) [A]	VF (cm <sup>3</sup> /s) [B]	PR (bar) [C]	CP (bar) [D]	VR (Min <sup>-1</sup> ) [E]	TR (s) [F]
1	270	83	300	5	50	1
2	270	83	300	10	50	5
3	270	83	800	5	100	1
4	270	83	800	10	100	5
5	270	142	300	5	100	5
6	270	142	300	10	100	1
7	270	142	800	5	50	5
8	270	142	800	10	50	1
9	300	83	300	5	100	5
10	300	83	300	10	100	1
11	300	83	800	5	50	5
12	300	83	800	10	50	1
13	300	142	300	5	50	1
14	300	142	300	10	50	5
15	300	142	800	5	100	1
16	300	142	800	10	100	5

Fonte: elaborado pelo autor

Foram utilizadas as colunas: 1,2,4,7,8,11 da matriz de 15 colunas, considerando na análise, a independência de cada fator. As demais colunas, não utilizadas, seriam úteis caso se quisesse estudar a interação entre fatores, o que não foi previsto neste trabalho.

Foram produzidos um total de 96 corpos de prova com um molde de duas cavidades, que pode ser visto nas **Figuras 5 e 6**, cavidades do molde e par de corpo de prova respectivamente. Para cada uma das 16 condições, foram executados 3 ciclos de injeção consecutivas (3 repetições).

**Figura 5** – Corpo de prova na cavidade do molde de injeção.



Fonte: SENAI Mario Amato – Molde para injeção de corpo de provas ASTM638

**Figura 6** – Configuração do corpo de prova (posição do canal de injeção, canal de alimentação e a entrada de injeção).



Fonte: SENAI Mario Amato – Corpo de provas ASTM638

#### 4.3.1 Preparação do compósito e *set up* da máquina injetora

A preparação da matéria prima e os parâmetros de *set up* da máquina injetora foram executados em acordo com o *technical datasheet* do fabricante (EMS-Grivory 5V-6H)

##### 4.3.1.1 Secagem

Para a produção dos corpos de prova, não se fez necessário passar o compósito por um processo de secagem, pois o mesmo foi processado logo após a abertura da embalagem original (indicação do *datasheet* do fabricante).

Após a produção dos corpos de prova, os mesmos foram embalados de forma a assegurar o nível de teor de umidade definida pelo fabricante, conforme a **Figura 7**. Essa condição foi mantida até a realização dos testes em condições de temperatura e umidade relativa controlada do laboratório.

**Figura 7** - Corpos de prova embalados com silica para envio ao laboratório de ensaios



Fonte: SENAI Mario Amato – padrão de acondicionamento para poliamidas

#### 4.3.1.2 Rosca

Utilizado rosca universal protegida com bicos de fechamento, com relação diâmetro versus comprimento (L/D) igual a 16.

#### 4.3.1.3 Aquecimento

Foi utilizado cinco zonas de aquecimento, controladas separadamente, em duas condições distintas, conforme detalhado na tabela 11

Tabela 11 – Temperaturas no bico de injeção e nas zonas de aquecimento

Zonas de aquecimento	Condição 1: 270°C	Condição 2: 300°C
Bico 1	270°C	300°C
Zona 2	265°C	295°C
Zona 3	260°C	290°C
Zona 4	255°C	285°C
Zona 5	250°C	280°C

Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.4 Ensaio de tração

A resistência máxima de tração ( $RT_{m\acute{a}x}$ ) foi a resposta definida para ser estudada no arranjo ortogonal. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D638.

O ensaio foi realizado nas dependências da Escola SENAI Mario Amato, em máquina universal de ensaios EMIC DL3000, equipada com *software* MTest, versão 2.02, com velocidade de ensaio de 5mm/min, à temperatura ambiente.

#### 4.5 Temperaturas de fusão e de cristalização através do DSC

Com o objetivo de se analisar se entre o ponto de injeção e o extremo oposto do corpo de prova se evidenciaria diferença significativa no grau de cristalinidade, uma vez que a mesma tem influência na propriedade mecânica de resistência à tração, foram conduzidos ensaios empregando a técnica de calorimetria exploratória diferencial (DSC) a uma taxa de aquecimento de 20°C/min. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D 3418, no laboratório de polímeros da Escola SENAI Mario Amato, em equipamento DSC Q20 V24.11, *software* V4.5<sup>a</sup> da TA Instruments, através do método *heat/cool/heat*, com cadinho de alumínio (Al) sob atmosfera inerte de nitrogênio.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados de resistência máxima de tração (RT<sub>máx</sub>) e a relação sinal/ruído (S/R) da metodologia Taguchi obtidos dos 96 corpos de prova produzidos mais os ensaios de calorimetria exploratória diferencial (DSC) nos corpos de prova de menor e maior resistência máxima de tração serão apresentados e discutidos neste capítulo.

### 5.1 Resultados das resistências máxima de tração

As forças máxima de tração (RT<sub>máx</sub>) obtidas foram tabeladas e usadas para calcular a relação sinal/ruído (S/R) com o intuito de se obter a melhor configuração para a otimização do processo de injeção em estudo. A relação sinal/ruído (S/R) foi calculada com o *software* Minitab17.

Na **Tabela 12** são apresentados os resultados das resistências máximas de tração das diferentes configurações de processo para a produção dos 96 corpos de prova.

**Tabela 12** - Resultado da resistência máxima de tração obtida (RT<sub>máx</sub>.)

Condição	MeT (°C) [A]	VF (cm <sup>3</sup> /s) [B]	PR (bar) [C]	CP (bar) [D]	VR (Min <sup>-1</sup> ) [E]	TR (s) [F]	RT <sub>máx</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) ± desvio padrão
1	270	83	300	5	50	1	237,9 ± 1,347
2	270	83	300	10	50	5	242,6 ± 2,566
3	270	83	800	5	100	1	233,2 ± 1,740
4	270	83	800	10	100	5	232,7 ± 1,116
5	270	142	300	5	100	5	237,29 ± 1,473
6	270	142	300	10	100	1	236,0 ± 2,677
7	270	142	800	5	50	5	230,5 ± 3,440
8	270	142	800	10	50	1	229,0 ± 2,704
9	300	83	300	5	100	5	238,5 ± 1,646
10	300	83	300	10	100	1	236,3 ± 1,350
11	300	83	800	5	50	5	233,7 ± 1,387
12	300	83	800	10	50	1	221,5 ± 11,74
13	300	142	300	5	50	1	235,4 ± 3,545
14	300	142	300	10	50	5	232,5 ± 3,456
15	300	142	800	5	100	1	217,6 ± 7,189
16	300	142	800	10	100	5	225,4 ± 1,865

Fonte: elaborado pelo autor

São valores médios calculados de 5 amostras produzidas em três injeções para cada condição, uma vez que o molde é constituído de 2 cavidades.

Verificou-se que a melhor resistência à tração se conseguiu com a condição 2, onde a temperatura de processamento, o fluxo volumétrico e pressão de recalque foram parametrizados no nível 1 e o tempo de recalque, no nível 2. O pior resultado, o da condição 15, tiveram os mesmos fatores parametrizados em nível oposto ao do melhor resultado, sem exceção.

Também pode-se observar que na condição 12 e condição 15, as duas menores resistências de tração observadas, a faixa de variação das médias se mostraram muito acima das demais, com valores de desvio padrão de  $\pm 7,189$  e  $\pm 11,74$ , respectivamente. Esta grande variação pode ser interpretada como, nestas duas condições, o processo se apresentou mais instável em relação às demais, devendo portanto ser uma condição que deve ser evitada.

## 5.2 Relação sinal / ruído do arranjo ortogonal Taguchi

A relação sinal/ruído (razão S/R) foi utilizada para medir a sensibilidade da característica de qualidade investigada de forma controlada. No método de Taguchi, o termo "sinal" representa o efeito desejável (média) para a característica de saída e o termo "ruído" representa o efeito indesejável (perturbação do sinal ou variância) para a característica de saída que influenciam no resultado devido a fatores externos.

A relação S/R pode ser definida como:

$$S/R = -10 \cdot \log_{10} (\text{MSD})^2 \quad (3)$$

Onde:

MSD= Desvio quadrático médio (*Mean Quadratic Deviation*)

O objetivo deste experimento foi determinar a relação S/R mais alta possível para o resultado, maior-melhor. Um alto valor de S/R implica que o sinal é muito maior do que os efeitos aleatórios dos fatores de ruído ou variância mínima. Para se obter o melhor desempenho no processo de injeção em estudo, tomou-se como característica de qualidade superior, a obtenção da resistência máxima de tração (RTMáx).

O desvio quadrático médio (MSD) para a característica de qualidade maior-melhor pode ser expresso como:

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{1}{(Y_i)^2} \quad (4)$$

Onde:

MSD: desvio quadrático médio

y: observações

n: quantidade de testes por corrida

Na **Tabela 13**, tem se o resultado das respostas da relação sinal/ruído, melhor é melhor e, as respostas das médias na **Tabela 14**, calculado com o Minitab V17. Também está indexado os resultados das maiores diferenças (delta) dos fatores dentro de seus respectivos níveis. O fator C, pressão de recalque (PR), foi o que apresentou a maior diferença entre os níveis, seguido do fator A, temperatura de processamento (MeT), pelo fator B, fluxo volumétrico (VF) e, assim, sucessivamente, até o de menor diferença, o fator E, velocidades da rosca (VR).

**Tabela 13 - Respostas da taxa S/R (sinal/ruído): maior-é-melhor**

Nível	MeT (°C) [A]	VF (cm <sup>3</sup> /s) [B]	PR (bar) [C]	CP (bar) [D]	VR (Min <sup>-1</sup> ) [E]	TR (s) [F]
1	47,42	47,40	47,50	47,34	47,34	47,26
2	47,23	47,25	47,15	47,31	47,31	47,39
Delta	0,19	0,15	0,35	0,03	0,03	0,13
Classificação	2	3	1	5	6	4

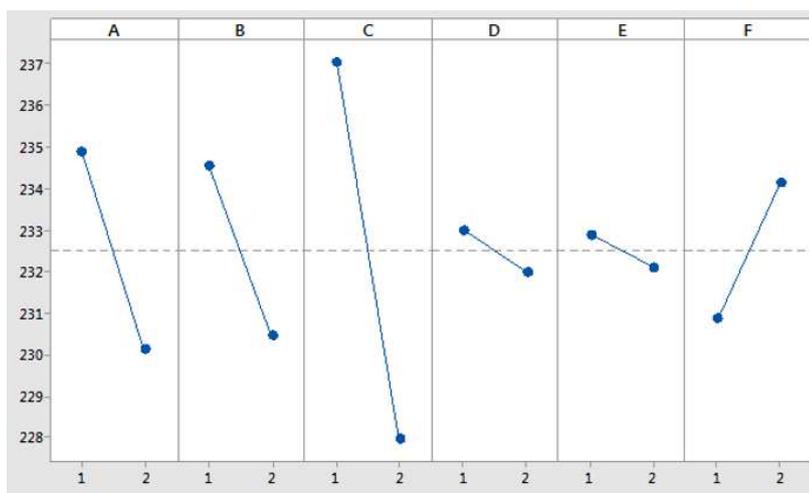
Fonte: elaborado pelo autor

**Tabela 14 - Resposta das médias**

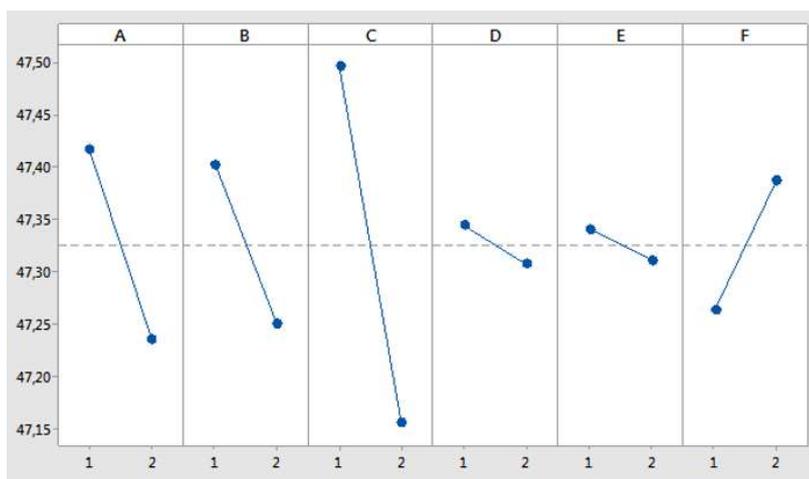
Nível	MeT (°C) [A]	VF (cm <sup>3</sup> /s) [B]	PR (bar) [C]	CP (bar) [D]	VR (Min <sup>-1</sup> ) [E]	TR (s) [F]
1	234,9	234,6	237,1	233,0	232,9	230,9
2	230,1	230,5	227,9	232,0	232,1	234,1
Delta	4,8	4,1	9,2	1,0	0,8	3,2
Classificação	2	3	1	5	6	4

Fonte: elaborado pelo autor

Nas **Figuras 8 e 9**, podem ser vistas o resultado gráfico dos principais efeitos das médias e da relação S/R, respectivamente.

**Figura 8** – Gráfico do efeito principal das médias

Fonte: elaborado pelo autor

**Figura 9** - Efeito principal da taxa sinal-ruído (S/R) – maior-é-melhor

Fonte: elaborado pelo autor

Assim, com base na relação S/R, concluiu-se que, a combinação ótima de parâmetros e os seus níveis para conseguir uma resistência máxima de tração foram A1B1C1D1E1F2, isto é, temperatura de processamento, nível 1, com a temperatura de 270°C; o fluxo volumétrico do material fundido, nível 1, com valor 83 cm<sup>3</sup>/s; a pressão de recalque, nível 1, com a pressão de 300 bar; a contrapressão, nível 2, valor de 10 bar; a velocidade da rosca, nível 1, velocidade de 50 min<sup>-1</sup> e o tempo de recalque no nível 2, com valor de 5 s, resumidos na **Tabela 15**.

**Tabela 15** – Resultado de parametrização otimizada do processo

Temperatura de processamento (°C) [A]	Fluxo volumétrico (cm <sup>3</sup> /s) [B]	Pressão de recalque (bar) [C]	Contra-pressão (bar) [D]	Velocidade da rosca (min <sup>-1</sup> ) [E]	Tempo de retenção (s) [F]
Nível 1: 270	Nível 1: 83	Nível 1: 300	Nível 2: 10	Nível 1: 50	Nível 2: 5

Fonte: elaborado pelo autor

### 5.3 Análise de variância (ANOVA)

Para se conhecer a importância relativa entre os parâmetros do processo que levou ao melhor resultado da resistência máxima de tração (RT<sub>máx</sub>), fez-se uso da metodologia análise de variância (ANOVA).

A porcentagem de contribuição P, para cada parâmetro do processo (grupos), é a razão do desvio quadrático dos erros de cada parâmetro, SQ<sub>e</sub>, pela soma dos mesmos,  $\sum SQ_e$ . Da estatística, pode-se calcular também o teste da relação F (razão de variância), outra opção para se medir quais parâmetros têm efeitos significativos sobre a característica de qualidade de resistência máxima de tração estudada.

Na **Tabela 16**, estão disponíveis as médias dos níveis 1 e 2 de cada fator respectivamente, dos 96 corpos de prova produzidos. Com essas médias foram calculados a ANOVA para indexar os parâmetros de processo (fatores) de maiores significância no estudo, os quais devem ter um controle mais rígido durante o evento de preparação de máquina para injeção.

**Tabela 16** - Fatores e média das resistências máxima de tração para cada nível

Fatores (Parâmetros do processo)	Abreviatura e unidade	Média RT <sub>máx</sub> Nível 1	Média RT <sub>máx</sub> Nível 2
Temperatura de processamento	[A] MeT (°C)	234,9	230,1
Fluxo volumétrico	[B] VF (cm <sup>3</sup> /s)	234,6	230,5
Pressão de recalque	[C] PR (bar)	237,1	228,0
Contrapressão	[D] CP (bar)	233,0	232,0
Velocidade da rosca	[E] VR (min <sup>-1</sup> )	232,9	232,1
Tempo de recalque	[F] TR (s)	230,9	234,1

Fonte: elaborado pelo autor

Os cálculos de percentagem de contribuição da significância de cada fator que afetaram a resistência máxima de tração neste trabalho, pode ser visto na **Tabela 17**.

**Tabela 17** - Análise da variância das médias e suas respectivas percentagem de contribuição

Fonte	gl	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	<i>p-value</i>	% Contribuição
MeT (°C)	1	0,131466	0,131466	0,131466	8,16	0,019	17%
VF (cm <sup>3</sup> /s)	1	0,094309	0,094309	0,094309	5,85	0,039	12%
PR (bar)	1	0,467971	0,467971	0,467971	29,03	0	61%
CP (bar)	1	0,005529	0,005529	0,005529	0,34	0,572	1%
VR (Min-1)	1	0,003562	0,003562	0,003562	0,22	0,649	0%
TR (s)	1	0,062059	0,062059	0,062059	3,85	0,081	8%
Erro residual	9	0,14506	0,14506	0,016118			
Total	15	0,909957					

Fonte: elaborado pelo autor

Pode se observar na **Tabela 17** (cálculo ANOVA), as percentagens de contribuição calculados a partir dos valores *p-value*, para um nível de confiança de 95%. O fator [C], pressão de recalque, com percentagem de contribuição de 61%, para um *p-value* de zero, foi o fator de maior significância encontrado, seguido do fator [A], temperatura de processamento, com percentagem de contribuição de 17% , com *p-value* de 0,019, seguido, em terceiro lugar, pelo fator [B], fluxo volumétrico com *p-value* de 0,039, com porcentagem de contribuição de 12%.

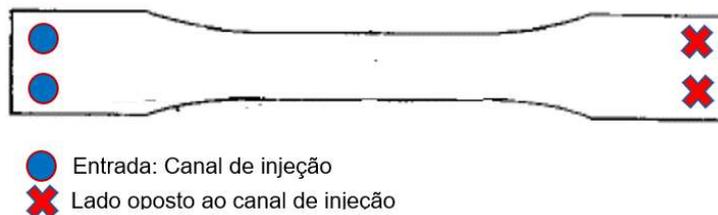
Para os demais fatores, tais como, contra-pressão [D], Velocidade da rosca [E] e tempo de retenção [F] a percentagem de contribuição ficou igual ou abaixo de 8%, portanto, sem muita significância estatística, se comparados aos três primeiros.

#### 5.4 Análises de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Conduziu-se ensaios de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) nos corpos de prova de maior e de menor resistência máxima de tração, corpos de prova 2 e 15 respectivamente, com vistas a identificar diferenças significativas na temperatura de fusão e na temperatura de cristalização.

Os materiais para os testes DSC foram retirados de duas posições distintas de cada corpo de prova, a saber: próximo ao canal de injeção e no lado oposto do canal, conforme mostrado na **Figura 10**.

**Figura 10** – Posições de coleta de material para as análises de DSC

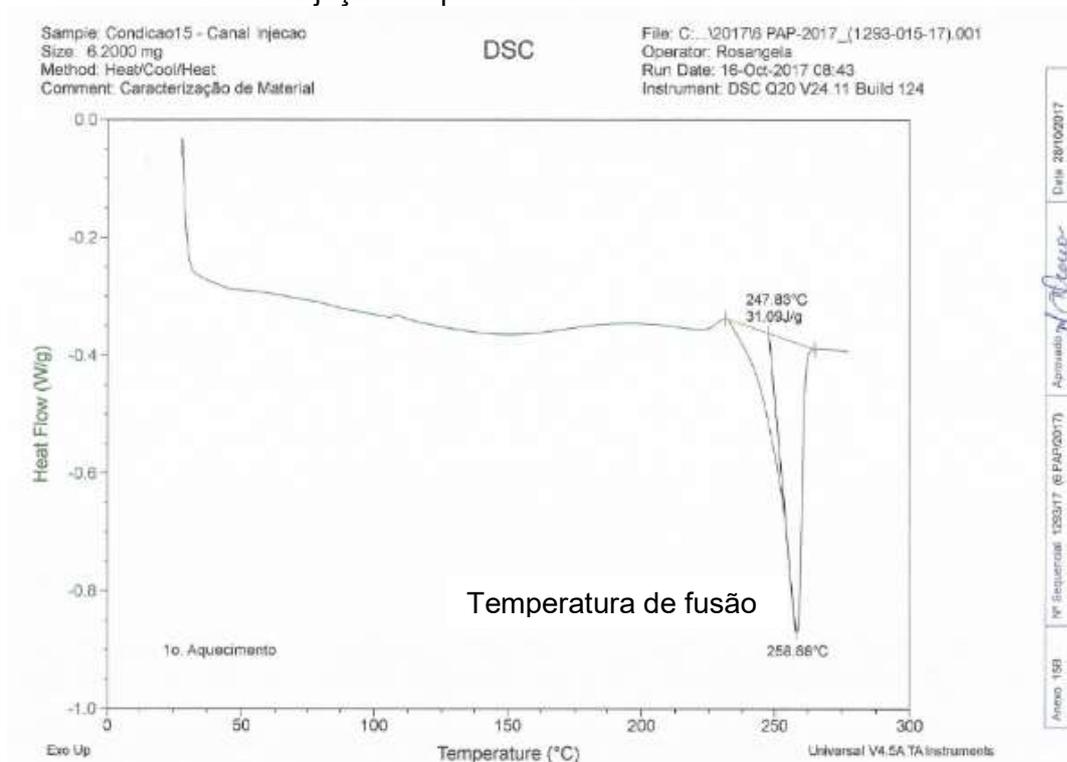


Fonte: elaborado pelo autor

As **Figuras 11 e 12**, mostram respectivamente, os resultados para as condições de teste DSC no corpo de prova 15 – Menor resistência à tração encontrada: lado do canal de injeção - aquecimento e lado oposto ao canal de injeção – resfriamento.

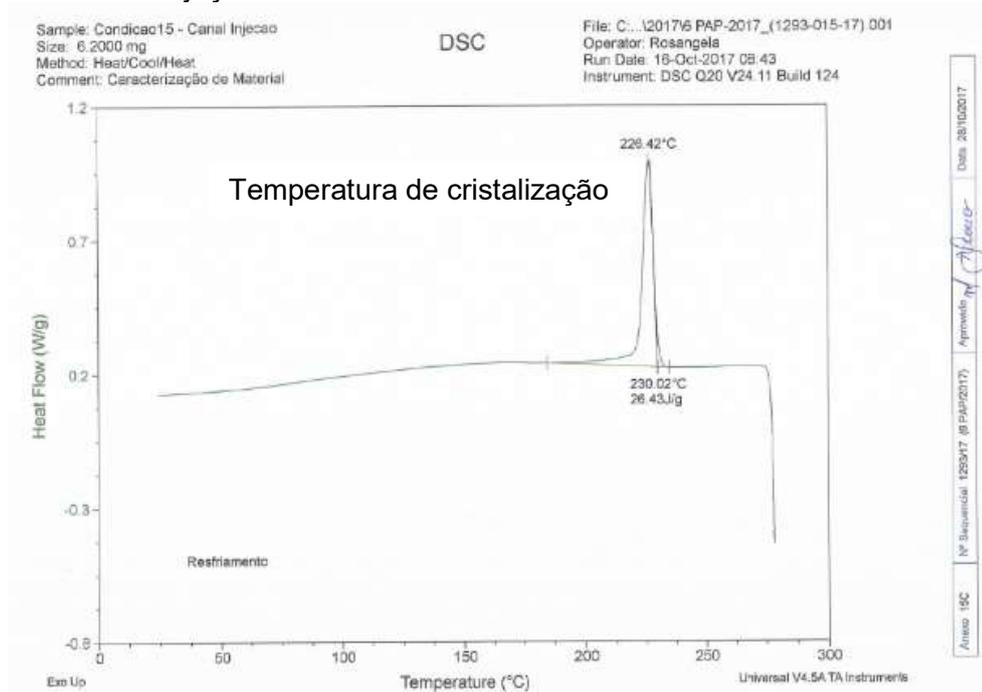
As **Figuras 13 e 14**, mostram respectivamente, os resultados para as condições de teste DSC no corpo de prova 2 – Maior resistência à tração encontrada: lado do canal de injeção - aquecimento e lado oposto ao canal de injeção – resfriamento.

**Figura 11** – DSC no corpo de prova 15 – Menor resistência à tração encontrada – lado do canal de injeção - Aquecimento



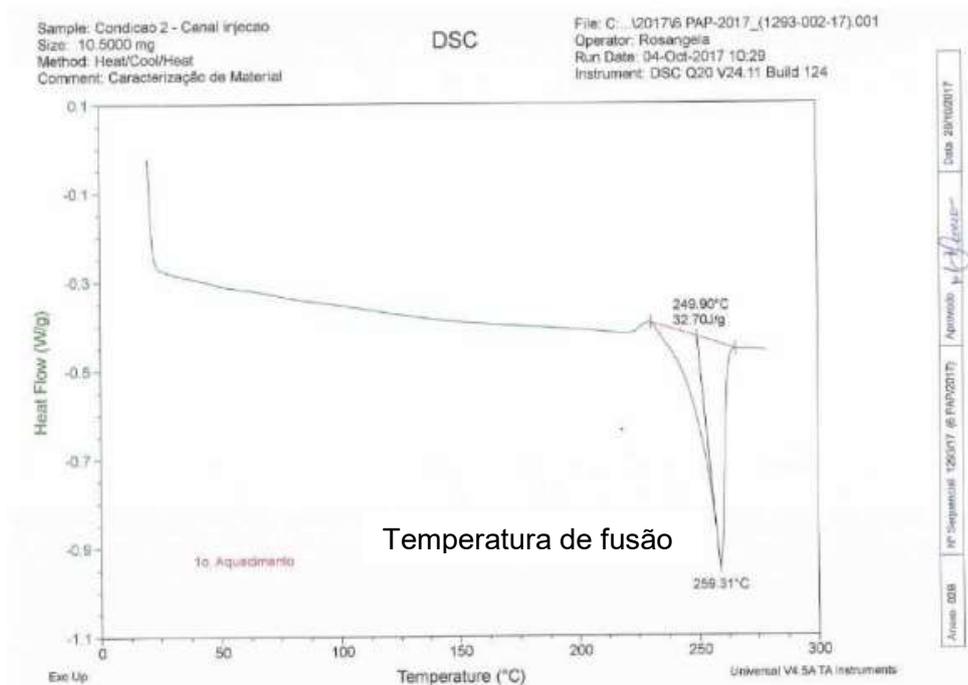
Fonte: Relatório do Laboratório de Ensaios Físicos e Químicos em Polímeros (PLA), da escola SENAI-Maria Amato.

**Figura 12** – DSC no corpo de prova 15 – Menor resistência à tração encontrada – lado do canal de injeção - Resfriamento



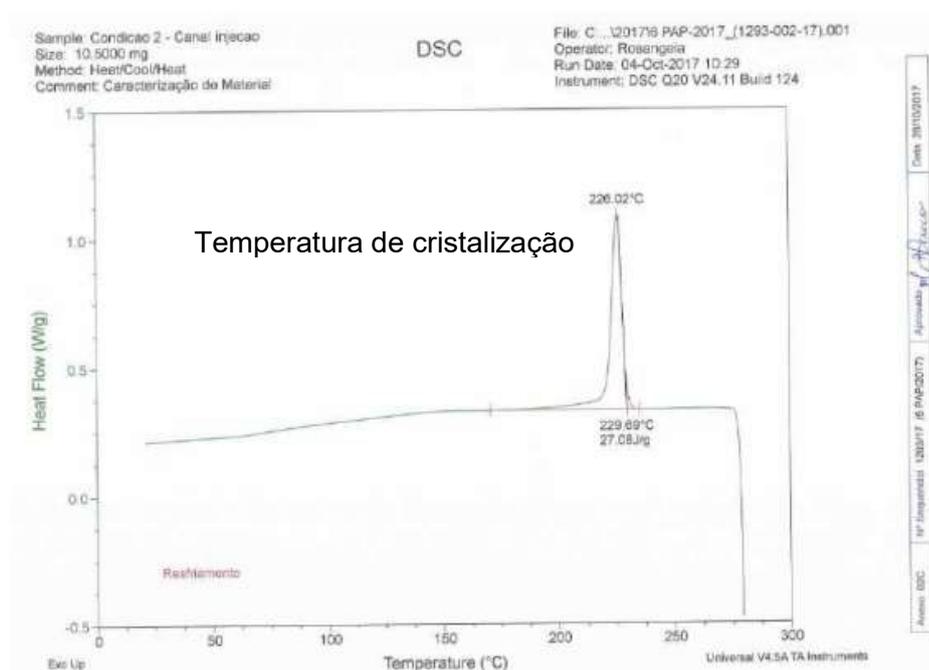
Fonte: Relatório do Laboratório de Ensaio Físicos e Químicos em Polímeros (PLA), da escola SENAI-Maria Amato.

**Figura 13** – DSC no corpo de prova 2 – Maior resistência à tração encontrada – lado do canal de injeção - Aquecimento



Fonte: Relatório do Laboratório de Ensaio Físicos e Químicos em Polímeros (PLA), da escola SENAI-Maria Amato.

**Figura 14** – DSC no corpo de prova 2 – Maior resistência à tração encontrada – lado do canal de injeção - Resfriamento



Fonte: Relatório do Laboratório de Ensaios Físicos e Químicos em Polímeros (PLA), da escola SENAI-Maria Amato.

Um resumo dos resultados obtidos pode ser visto na **Tabela 18**.

**Tabela 18** – Temperaturas de fusão e de cristalização dos corpos das condições 2 e 15 – lado da injeção versus lado oposto à esta.

DSC			
		Fusão (°C)	Cristalização (°C)
Condição 2	Lado canal de injeção	259,31	226,02
RT máx: 242,6 (N/mm <sup>2</sup> )	Oposto canal de injeção	259,03	226,29
		Fusão (°C)	Cristalização (°C)
Condição 15	Lado canal de injeção	258,68	226,42
RT máx: 217,6 (N/mm <sup>2</sup> )	Oposto canal de injeção	258,98	225,00

Fonte: elaborado pelo autor – Relatório de testes DSC realizado pela escola SENAI Mario Amato.

Dos resultados dos ensaios DSC, os quais não apresentaram diferença significativa entre os lados do canal de injeção e o oposto à ele, em seus respectivos pontos de fusão e de cristalização, pode-se inferir que os graus de cristalinidade nessas áreas distintas se apresentaram homogêneas (**Tabela 17**).

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram analisados e interpretados os resultados do experimento Taguchi em relação à resistência máxima de tração em cada uma das dezesseis condições de testes produzidas de acordo com ensaios da matriz ortogonal L16, composta de seis fatores e dois níveis para cada um deles. Os cálculos e gráficos foram produzidos com o uso do *software* estatístico Minitab V17.

Também foi aplicado a análise de variância (ANOVA) com as médias de cada nível, de cada fator, com o objetivo de se encontrar os parâmetros que afetaram significativamente a característica de qualidade procurada, também com o pacote estatístico Minitab V17.

A resistência máxima de tração obtida, foi comparada com a proposta do fabricante da matéria-prima Grivory GV-6H, de alternativa para substituição de componentes fabricados a partir de ligas fundidas de alumínio ou de zinco, pelo compósito em estudo.

A relação sinal/ruído (razão S/R) foi utilizada para medir a sensibilidade da característica de qualidade investigada de forma controlada.

Para se obter o melhor desempenho no processo de injeção em estudo, tomou-se como característica de qualidade superior, aquela que levasse à obtenção da resistência máxima de tração (RTMáx) dos corpos de prova, ou seja, S/R maior-é-melhor.

Os resultados obtidos das resistência máxima de tração nas 16 condições de fabricação (96 corpos de prova produzidos), variaram de um mínimo de 217,6N/m<sup>2</sup> e um máximo de 242,6N/m<sup>2</sup>, valor este como resultado esperado do experimento.

Com base na relação S/R calculada, concluiu-se que, a melhor combinação de parâmetros e os seus níveis para conseguir uma resistência máxima de tração foi a A1B1C1D1E1F2, isto é, temperatura de processamento, nível 1, valor de 270°C; o fluxo volumétrico do material fundido, nível 1, valor de 83 cm<sup>3</sup>/s; a pressão de recalque, nível 1, valor de 300 bar; a contrapressão, nível 2, valor de 10 bar; a velocidade da rosca, nível 1, valor de 50 min<sup>-1</sup> e o tempo de recalque no nível 2, com valor igual a 5 s.

Com essa combinação, atingiu-se o valor de 242,6 N/m<sup>2</sup> de resistência máxima a tração, valor este, também sugerido pelo fabricante da matéria-prima estudada e que se mostrou compatível na substituição de ligas metálicas de alumínio e ou zinco fundido para uma faixa de trabalho em torno de 20°C a 23°C.

No entanto, a importância relativa entre os parâmetros para a resistência máxima de tração, não se conseguiu somente com a aplicação da matriz ortogonal de Taguchi. Para se obter a percentagem de contribuição, ou significância estatística de cada fator no total das variações, foi necessário fazer uso do método de análise de variância (ANOVA).

Os índices F foram calculados com um nível de confiança de 95%. O fator [C], pressão de recalque com percentagem de contribuição de 61%, com uma valor *p-value* zero, seguido do fator [A], temperatura de processamento, com percentagem de contribuição de 17% , com valor *p-value* de 0,017, seguido, em terceiro lugar, pelo fator [B], fluxo volumétrico com valor *p-value* de 0,034, com percentagem de contribuição de 12%.

Para os demais fatores, tais como, contra-pressão [D], Velocidade da rôsca [E] e tempo de retenção [F] a percentagem de contribuição abaixo de 10%, *p-values* acima de 0,05, não apresentaram um fator *p-value* com significância estatística, o que significou que esses três parâmetros não exigirão uma atenção e um controle mais apurado, podendo ser aplicados de acordo com os valores nominais indicados pelo *datasheet* do fabricante da matéria-prima.

Os ensaios de calorimetria diferencial exploratória não apresentaram diferenças significativas nas temperaturas de fusão e nas temperaturas de cristalização entre a condição de melhor resistência a tração e a de menor resistência, corpos de prova 2 e 15 respectivamente.

Também não se evidenciou diferenças significativas nas temperaturas de fusão e cristalização entre o ponto de injeção e o lado oposto a ele, em nenhuma das duas condições ensaiadas.

Portanto, do exposto acima, pode se inferir que não se evidenciou degradação e nem alteração na condição de cristalinidade nas parametrizações que se produziram a melhor e a menor resistências de tração relatadas neste trabalho. O motivo de não se ter evidenciado degradação nos corpos de prova analisados, deve se ao fato de que as 16 condições ensaiadas se encontravam dentro das janelas de parametrização

de processo indicadas pelo fabricante da matéria-prima. Em condições mais severas, extrapolando-se os limites de especificados do fabricante, poder-se-á chegar-se a conclusão diferente do obtido aqui.

O tempo necessário para se realizar experimentos ortogonais é pequeno e os custos experimentais são baixos, se comparados aos desperdícios gerados na definição de parâmetros de processo conseguidos por tentativa e erro, considerando-se somente a experiência dos operadores envolvidos no processo. Esse fato, justifica portanto, a aplicação da metodologia Taguchi (Arranjos Ortogonais) de forma sistêmica durante o desenvolvimento e otimização nos processos produtivo das empresas.

## 7 RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Realizar pesquisa com a metodologia de Superfície de Respostas, usando-se os parâmetros estudados neste trabalho. Esta metodologia é uma outra forma de análise para otimização de processo, usando-se a metodologia de Taguchi como base (MONTORO, 2014). Incluir na análise, a produção da equação de regressão que é uma representação algébrica da superfície de resposta, cálculo este disponível no pacote estatístico Minitab e que não foi aplicado neste trabalho

Vale considerar outras oportunidades de aplicação da metodologia de arranjo ortogonal Taguchi com foco à otimização de processo e também como oportunidade de se conseguir outras alternativas na substituição de componentes metálicos por compósitos injetados de plástico.

Selecionar outros compósitos poliméricos, recém desenvolvidos, ofertados pelo mercado, com o objetivo de aumentar as alternativas para aplicação de plásticos de engenharia em substituição à ligas metálicas.

Aplicar a metodologia em processos de fabricação de novos componentes já nos primeiros lotes a serem fabricados com o objetivo de se obter uma condição otimizada na produção do mesmo, melhorando tempos de ciclo, defeitos de qualidade (e.g. rechupes ou empenamentos) e consequente redução de custos com refugos

Ao longo da pesquisa experimental, também se verificou algumas dificuldades.

Uma delas está relacionada à escolha dos fatores de controle a serem investigados. Essa dificuldade se acentuou na ausência de especialistas de injeção de plásticos durante a fase do planejamento dos ensaios. Portanto, deixa-se a recomendação de se prever tempo para leitura de trabalhos publicados na fase de planejamento do experimento com o intuito de fazer escolhas apropriadas dos fatores e seus respectivos níveis para estudo, na ausência de especialistas.

Também há de se considerar que, a faixa de operação dos parâmetros foi estabelecida, usando como referência, o *datasheet* do fabricante da matéria-prima. Caso se optasse por considerar valores de operação baseados na experiência de outros profissionais, com larga experiência em processos de injeção de plásticos, poderia ter-se escolhidos outros fatores e/ou outras faixas de operação para realizar o projeto de experimentos.

Esse trabalho se desenvolveu através da produção de corpos de provas injetados, o que em alguns momentos foi um fator de restrição em relação ao tempo de desenvolvimento do mesmo, por questões de recursos disponíveis para os ensaios. Isso pode ser parcialmente contornado com simulações a serem realizadas com suporte de análise de elementos finitos, através de *softwares*, e.g. *Moldflow*®, *ABAQUS*®, parametrizando o mesmo com os fatores e níveis tirados de matrizes ortogonais de Taguchi, à exemplo do estudo realizado por Kingsun Lee e Jui-Chang Lin (2012).

Como trabalho futuro, sugere-se a aplicação da metodologia *Grey Relational Analysis*, juntamente com a metodologia Taguchi, uma vez que esse método propicia a análise de resultados de diversos sinais de saída. Em outras palavras, através do *Grey Relational Analysis*, diferentes parâmetros do processo do sistema de injeção de plástico sob pressão podem ser otimizados para se obter resultados otimizados em múltiplas características de qualidade, por exemplo, estudando concomitantemente, respostas, tais como: resistência máxima a tração, resistência à carga de impacto, capacidade do peso de peças injetadas e outros.

Outro trabalho futuro a ser considerado é estudar a aplicação de rede neural para modelagem do processo de injeção de plásticos, a exemplo do trabalho de Altan (2010). O objetivo da metodologia é a de se desenvolver uma forma alternativa de obtenção de otimização de parâmetros de processo, sem a necessidade de uso de custosos pacotes computacionais. Esta abordagem proporciona uma morfologia de inferência que possibilita inserir o conhecimento humano em processamento de polímeros numa base de conhecimento. Altan (2010) utilizou-se desta metodologia para a geração de um modelo (*Neural Net*) que se mostrou ser uma eficiente ferramenta preditiva na redução da contração de Polipropileno e Poliestireno, após a determinação dos parâmetros mais significantes do processo de injeção, determinados pela metodologia Taguchi.

E, por fim, sugere-se um estudo comparativo entre resistência máxima de tração conseguida com a produção de corpo de prova versus a resistência obtida com simulações com *software* de elementos finitos para compósito de poliamida com carga. Trabalho similar de comparação de resistência à tração produzida em corpos de prova versus calculada por *software* foi apresentado por Santos *et al* (2016) no XXXVII Congresso Latino-Americano Ibérico de Métodos Computacionais em

Engenharia, para aço TRIP MC 700. A conclusão a que se chegou foi de que a simulação numérica por elementos finitos utilizando o *software* Abaqus©,09 mostrou-se eficiente e confiável quando comparado com o ensaio físico, a curva seguiu de forma paralela no regime elástico, tendo valores um pouco menores favorecendo o limite de segurança. Vale pesquisar se resultado similar pode ser conseguido com outros tantos plásticos de engenharia hoje disponíveis no mercado. Estudos preliminares de otimização de processos através da aplicação de *softwares* podem reduzir as quantidades de ensaios com produção de corpos de prova, o que significa redução de custos com experimentos e redução do tempo de uso da máquina injetora com produção de corpos de prova, deixando-as disponíveis para a produção.

## REFERÊNCIAS

ALTAN M., **Reducing shrinkage in injection moldings via the Taguchi, ANOVA and neural network methods**; Materials and Design 31, 599–60; Elsevier, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D3418**: Standard Test Method for Transition Temperatures of Polymers By Differential Scanning Calorimetry. United States of America, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D638**: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. United States of America, 2014.

ARIF M. F., MERAGHNI F., CHEMISKY Y., DESPRINGRE N., ROBERT G., **In situ mechanisms investigation of PA66/GF30 composite: Effect of relative humidity**, Composites part B 58 – Engineering, 487-495, 2014.

CARRASCAL I., CASADO J., POLANCO J. e GUTIÉRREZ-SOLANA F., **Absorption and diffusion of humidity in fiberglass-reinforced polyamide**, Polym Compos, 2005.

CHEN, G., **Product and Process Design Optimization by Quality Engineering (Tolerance Design)**. Ph.D. dissertation, Wayne State University, 1990.

CRUM N. M., READ B., WILLIAMS G., **Anelastic and dielectric effects in polymeric solids**, New York: Wiley, 1967.

CUNHA, A. M., **Manual do Projetista para Moldes de Injeção de Plásticos**, Marinha Grande: Centimfe, 2004.

DOBYNS L., CRAWFORD-MASON C., **Quality or Else**. Boston, Massachusetts: Houghton Mifflin Company, 1991.

DUPONT, **Innovative Ideas for Metal Replacement**. Disponível em: <<http://www.dupont.com/products-and-services/plastics-polymers->

resins/articles/innovative-ideas-for-metal-replacement.html>. Acesso em: 7 de mar. 2018.

ENGINEERING PLASTICS, **The Manual**, Ensinger GmbH, E9911075A011, 2012.

EMS-GRIVORY, **Grivory GV - The proven material for metal replacement**,

Disponível em:

<<https://www.emsgrivory.com/en/products-markets/products/grivory/grivory-gv/>>.

Acesso em: 10 mar. 2018.

FISHER, R. A. **Design of Experiments**. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1951.

FISHER, R.A. **Statistical Methods for Research Workers**. Edinburgh, United Kingdom: Oliver & Boyd; 1925.

FAUSTINO, D.F.T., **Caracterização Mecânica de Poliamidas utilizadas em Intercoolers**, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre, Técnico Lisboa, 2014.

GOODSHIP V. **Practical Guide to injection Molding**, Rapra Technology, Shawbury, United Kingdom, 1994.

KINGSUN L.; JUI-CHANG L. **Optimization of injection molding parameters for led lampshade**, Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol. 37, No. 3, 2013.

HILMI M.O., YULIS S.M.A **Optimizing injection molding parameters that satisfies part qualities by using Taguchi method**, IEEE Business, Engineering & Industrial Applications Colloquium (BEIAC), 2012.

KAVADE M.V., KADAM S.D., **Parameter Optimization of Injection Molding of Polypropylene by using Taguchi Methodology**, Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2012, p. 49-58

KIATCHAROENPOL T., T VICHIRAPRASERT T., **Optimizing and Modeling for Plastic Injection Molding Process using Taguchi Method**, Journal of Physics: Conf. Series 1026, 2018, 6p.

LEVENE H. **Robust tests for the equality of variance**; ed. Contributions to Probability and Statistics. Palo Alto, California: Stanford University Press; 1990; 278 – 292.

LARSON M.G., Analysis of Variance - Statistical Primer for Cardiovascular Research, AHA Journals, 2008, 8p.

LOCHNER, R. H., MATAR, J. E. **Designing for Quality**. White Plains, New York; Quality Resources (A Division of the Kraus Organization Limited), 1990. McGraw-Hill Book Company, 1991.

Material Data Center, Folha Informativa da Stanyl® TW241F10 - PA46-GF50 - DSM Engineering Plastics, disponível em:  
<http://www.materialdatacenter.com/ms/pt/tradenames/Stanyl/DSM+Engineering+Plastics/Stanyl%C2%AE+TW241F10/3af921e7/765>, Acessado em Junho 2018.

MAOSHENG T. et al, **Multi-objective optimization of injection molding process parameters in two stages for multiple quality characteristics and energy efficiency using Taguchi method and NSGA-II**, Int J Adv Manuf Technol, Springer-Verlag London, 2016, 14p.

MONSON L., BRAUNWARTH M., EXTRAND C., **Moisture absorption by various polyamides and their associated dimensional changes**, Journal of Applied Polymers Science, 2008.

MONTORO, S.R., Influência dos parâmetros de processamento por RTM no volume de vazios em compósitos carbono/epóxi Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.,

NAMINI, H. **Robustness Property of Factorial Designs and Characterizations of Influential Observations under Robust Designs**. Ph.D. thesis, University of California, Riverside, Junho, 1989.

PORTAL PLASTIX WORLD, <<http://www.plastix-world.com/polyamides-not-just-metal-replacement/>>, postado por Redazione em 18 de outubro de 2016. Acesso em 8 de maio de 2018.

PHADKE M.S. **Quality Engineering Using Robust Design**, Published by PTR Prentice-Hall, Inc. A Simon & Schuster Company, 1989.

RADHWAN H. et al. **An Optimization of Shrinkage in Injection Molding Parts by Using Taguchi Method**, Journal of Advanced Research, Vol. 10, No. 1. Pages 1-8, 2015.

RAHMAN A., HASSAN A. E ROSIYAH Y., **Plasticization Effect on Thermal, Dynamic Mechanical and Tensile Properties of Injection-Molded Glass-Fiber/Polyamide 6.6**, Journal of Science and Technology, 47-66, 2010.

ROY, R.K. **Design of Experiment Using Taguchi Approach**. Wiley-Interscience Publication, 2001.

SANDGREN, E. **The Taguchi Approach to Robust Quality**, The Mechanical Advantage, Vol. 1, No.1, Winter, 1991, pp. 1-3.

SANTOS C.E. et al. **Simulação por elementos finitos das propriedades mecânicas a tração do aço TRIP MC 700**, Revista Interdisciplinar de pesquisa em engenharia, 2016, 10p.

SHAPIRO S.S. Wilk M.B.; **An analysis of variance test for normality (complete samples)**. Biometrika, 1995, 52, 591– 611.

SASTRI V.R **Plastics in Medical Devices - Properties, Requirements, and Applications**, Elsevier, 2013, cap. 7.

STANLEY K. **Design of randomized controlled trials.** *Circulation.* 2007;115; 1164–169.

STATISTICS, **The World Book Encyclopedia**, S-Sn, Vol. 17. Chicago, Illinois: Field Enterprises Educational Corporation, 1984.

SUH, N. **The Principles of Design**, New York, New York: Oxford University Press, 1990.

TAGUCHI, G.; CLAUSING, D. **Robust Quality**, Harvard Business Review, January-February, 1990, pp. 65-75.

WESTERN ELECTRIC; **Statistical Quality Control Handbook**, 11th printing; Charlotte, North Carolina: Delmar Printing Company, 1985.

YIZONG T.et al, **Influence of Processing Parameters on Injection Molded Polystyrene using Taguchi Method as Design of Experiment**, Procedia Engineering, 2007, 10p.

ZAMBANINI R.A. **The application of Taguchi's method of parameter design to the design of mechanical systems**, 1992, Theses and Dissertations, Paper 131.