

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -  
PPGE3M

Controle Dimensional de Peças Produzidas pelo Processo de Metalurgia do Pó

Ana Paula Santos de Matos Dias

Dissertação para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre  
2016

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –  
PPGE3M

Controle Dimensional de Peças Produzidas pelo Processo de Metalurgia do Pó

Ana Paula Santos de Matos Dias  
Administradora de Empresas

Dissertação submetida ao Programa Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPPE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre  
2016

Este trabalho foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de Mestre em Engenharia em Processos de Fabricação e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela banca Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Eng. José Lesina Cezar – ULBRA

---

Prof. Dr. Eng. Jorge Braz – FURG

---

Prof. Dr. Eng. José Carlos Krause de Verney - ULBRA

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGE3M

Porto Alegre  
2016

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser minha força em todos os momentos.

À minha família, pelo apoio, ajuda e incentivo.

Ao Prof. Dr. Lírio Schaeffer pela oportunidade, paciência e orientação durante todos esses anos.

Aos Engenheiros André Tavares e Wilson C. Rodrigues pelo apoio, dedicação e auxílio.

À Empresa Aron Metal Ltda por possibilitar a realização deste trabalho nas dependências da fábrica.

A todos que, de alguma maneira, colaboraram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Neste trabalho, foram analisados quatro tipos peças fabricadas pelo processo de Metalurgia do Pó. Três das quatro peças apresentavam variações dimensionais após a compactação, o que levou a uma análise da variação dimensional das peças compactadas. Na quarta peça, uma engrenagem de dente inclinado, foram analisadas as variações de densidade nos dentes, tendo em vista a importância de se manter estas variações dentro de um padrão para assegurar que a peça não entre em colapso durante sua utilização. Dos resultados obtidos após a compactação, utilizando-se a ferramenta de Controle Estatístico de Processo (CEP), pode-se ter uma visão mais clara sobre as variações dimensionais apresentadas pelos gráficos de controle. Duas das peças medidas depois de compactadas ficaram dentro de uma faixa dimensional aceitável. A terceira peça medida após compactação não ficou dentro da especificação do desenho. Foram levantados gráficos de controle onde as medições mais importantes foram consideradas. Também foram analisadas variações de densidades após a compactação em peças onde a relação resistência mecânica/densificação é considerada muito importante. As peças “chapa” e “braço da ponteira” apresentaram  $C_p$  menor que 1, sendo o processo considerado incapaz. A peça “gatilho Baldan” também apresentou  $C_p$  menor que 1. A peça “engrenagem” apresentou  $C_p$  maior que 1 (1,347). O processo é considerado capaz quando  $C_p$  é maior que 1,33. Em relação ao  $C_{pk}$  (mínimo igual a 1,1744), o processo é considerado aceitável.

Palavras-chave: Metalurgia do Pó. Controle Estatístico de Processo. Variação Dimensional de Compactados.

## ABSTRACT

In this study, it was analyzed four parts manufactured by powder metallurgy process. Three of the four parts had dimensional variations after compression, leading to a dimensional variation analysis of the compacted parts. In the fourth piece, an inclined tooth gear, the density variations in the teeth were analyzed in view of the importance of maintaining these variations within a standard to ensure that the part does not collapse during use. Starting from results obtained after pressing, using the Statistical Process Control (SPC) it can have a clearer view of the dimensional variations presented by the control charts.

Two of the parts measured after pressing were within an acceptable dimensional range. The third part measured after pressing was not within the design specification. Control charts were made where the most important measurements were considered. Density variations were also analyzed after pressing of the parts where the ratio strength / densification is considered very important. The pieces "plate" and "tip arm" presented  $C_p$  less than 1, the process being considered incapable. The "Baldan trigger" also showed  $C_p$  less than 1. The "cog" piece had  $C_p$  greater than 1 (1,347). The process is considered capable when  $C_p$  is greater than 1.33. In relation to  $C_{pk}$  (minimum 1,174), the process is considered acceptable.

**Keywords:** Powder Metallurgy. Statistical Process Control. Variation Dimensional Compressed.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de bloco referente às etapas do controle de qualidade de peças compactadas.....	14
Figura 2 – Compactação Uniaxial.....	15
Figura 3 – Tipos de misturadores.....	18
Figura 4 – Três estágios no ciclo de compactação: 1) enchimento da matriz, 2) densificação do pó, 3) ejeção do compactado verde.....	20
Figura 5 – Curvas de densidade-pressão para dois pós de ferro comerciais compactados em uma matriz de carboneto com diâmetro interior de 25 mm. Adições de lubrificante: 0,75% de estearato de zinco.....	21
Figura 6 – Distribuição da densidade em um compactado de dois níveis.....	22
Figura 7 – Buchas para máquina agrícola.....	22
Figura 8 – Capa rolamento bicicleta.....	22
Figura 9 – Peças bomba d’água.....	23
Figura 10 – Peças freio moto-serra.....	23
Figura 11 – Efeito da temperatura de sinterização e tempo na densidade dos compactados de pó de cobre.....	24
Figura 12 – Efeito da temperatura de sinterização nas propriedades físicas do bronze 90Cu-10Sn-2C 26.....	25
Figura 13 – Variações dimensionais lineares que ocorrem na liga Fe-Ni-Mo-P em função da temperatura de aquecimento.....	27
Figura 14 – Simbologia para parâmetros e estatísticas.....	33
Figura 15 – Distribuição Normal.....	36
Figura 16 – Exemplos de gráficos de controle.....	38
Figura 17 – Fluxograma do processo.....	42
Figura 18 – Peça “chapa” compactada.....	43
Figura 19 – Peça “chapa” apresentando suas dimensões.....	44
Figura 20 – Peça “braço da ponteira” compactada.....	44
Figura 21 – Peça “braço da ponteira”, apresentando suas dimensões.....	45
Figura 22 – Peça “gatilho Baldan” em 3D.....	45
Figura 23 – Peça “gatilho Baldan” e suas dimensões.....	46

Figura 24 – Dispositivo dosador da semente no plantio.....	46
Figura 25 – Peça “Engrenagem de dente inclinado”.....	47
Figura 26 – Peça “Engrenagem de dente inclinado”.....	48
Figura 27 – Desenho técnico do punção superior da matriz da engrenagem de dente inclinado.....	48
Figura 28 – Imagem do punção que compõe a ferramenta de compactação da engrenagem de dente inclinado.....	48
Figura 29 – Representação da distribuição das espessuras em função do número de corpos de prova da peça “chapa”.....	50
Figura 30 – Representação da distribuição das espessuras em função do número de corpos de prova da peça “braço da ponteira”.....	52
Figura 31 – Representação da distribuição das espessuras em função do número de corpos de prova da peça “gatilho baldan”.....	53
Figura 32 – Representação da distribuição da densidade em função do número de corpos de prova da peça “engrenagem de dente inclinado”.....	55
Figura 33 – Gráfico de controle – Distribuição normal. Grupo de 30 amostras – peça “chapa”.....	57
Figura 34 – Gráfico de controle – Distribuição normal. Grupo de 30 amostras – peça “braço da ponteira”.....	60
Figura 35 – Gráfico de controle – Distribuição normal. Grupo de 20 amostras – peça “gatilho baldan”.....	63
Figura 36 – Gráfico de controle – Distribuição normal. Grupo de 20 amostras – peça “engrenagem de dente inclinado”.....	66
Figura 37 – Engrenagem em corte radial.....	67



**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Medição das espessuras, $e$ , de um lote de peças compactadas.....	49
Tabela 2 – Distribuição das espessuras de acordo com as faixas dimensionais, isto é, considerando cada intervalo de 0,05mm.....	50
Tabela 3 – Medição das espessuras, $e$ , de um lote de peças compactadas.....	51
Tabela 4 – Distribuição das espessuras de acordo com as faixas dimensionais.....	51
Tabela 5 – Medição das espessuras, $e$ , de um lote de peças compactadas.....	52
Tabela 6 – Distribuição das espessuras de acordo com as faixas dimensionais.....	53
Tabela 7 – Valores de densidade em cada pedaço de engrenagem.....	54
Tabela 8 – Distribuição das densidades de cada amostra.....	54
Tabela 9 – Medidas de parâmetro de CEP das amostras.....	55

**LISTA DE ABREVIATURAS**

CEP	Controle Estatístico de Processo
CEQ	Controle Estatístico da Qualidade
C <sub>p</sub>	Índice de Capacidade Potencial do Processo
C <sub>pk</sub>	Índice de Desempenho do Processo
LC	Linha Central
LIC	Limite Inferior de Controle
LIE	Limite Inferior de Especificação
LSC	Limite Superior de Controle
LSE	Limite Superior de Especificação
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
MP	Metalurgia do Pó

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>e</b>	Espessura	[mm]
<b>F</b>	Força	[ - ]
<b>l</b>	Variação dimensional linear	[%]
<b>m</b>	Massa	[g]
<b>N</b>	Número de elementos da população	[ - ]
<b>n</b>	Número de elementos da amostra	[ - ]
<b>n<sub>p</sub></b>	Porosidade	[%]
<b>p</b>	Pressão de Compactação	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>R</b>	Amplitude total	[ - ]
<b>S</b>	Desvio padrão amostral	[ - ]
<b>S<sup>2</sup></b>	Variância amostral	[ - ]
<b>T</b>	Temperatura	[°C]
<b>T<sub>a</sub></b>	Temperatura de aquecimento	[°C]
<b>T<sub>s</sub></b>	Temperatura de sinterização	[°C]
<b>t</b>	Tempo	[s]
<b>V</b>	Volume	[cm <sup>3</sup> ]
$\bar{X}$	Média amostral	[ - ]
$\bar{\bar{X}}$	Média do processo	[ - ]
<b>X<sub>n</sub></b>	Medida da amostra	[ - ]
<b>y</b>	Altura	[ - ]

## SÍMBOLOS GREGOS

<b>μ</b>	Média populacional	[ - ]
<b>ρ</b>	Densidade	[g/cm <sup>3</sup> ]
<b>ρ<sub>r</sub></b>	Densidade relativa	[%]
<b>ρ̂</b>	Proporção amostral	[ - ]
<b>σ</b>	Desvio padrão populacional	[ - ]
<b>σ<sup>2</sup></b>	Variância populacional	[ - ]
<b>σ̂</b>	Desvio padrão estimado	[ - ]
<b>π</b>	Proporção populacional	[ - ]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
2.1	ASPECTOS GERAIS DA METALURGIA DO PÓ.....	16
2.1.1	<b>Caracterização dos pós-metálicos</b> .....	17
2.1.2	<b>Mistura dos pós</b> .....	18
2.1.3	<b>Compactação</b> .....	19
2.1.3.1	<i>Ciclo de compactação</i> .....	19
2.1.3.2	<i>Curvas de densidade x pressão de compactação</i> .....	20
2.1.3.3	<i>Distribuição de densidade em um compactado</i> .....	21
2.1.3.4	<i>Cortesia Aron Metal</i> .....	22
2.1.4	<b>Sinterização</b> .....	23
2.1.4.1	<i>Temperatura e tempo de sinterização</i> .....	24
2.1.4.2	<i>Estrutura geométrica das partículas de pó</i> .....	25
2.1.4.3	<i>Compactação de mistura de pó</i> .....	26
2.1.4.4	<i>Densidade do pó compactado</i> .....	26
2.1.4.5	<i>Composição da atmosfera protetora no forno de sinterização</i> .....	26
2.1.4.6	<i>Variações dimensionais na sinterização</i> .....	27
2.2	CONTROLE DE QUALIDADE E TOLERÂNCIA DIMENSIONAL.....	28
2.2.1	<b>Controle Estatístico de Processo (CEP)</b> .....	28
2.2.2	<b>O Controle Estatístico de Processo e sua aplicação</b> .....	30
2.2.3	<b>Fases do Método estatístico</b> .....	31
2.2.4	<b>Conceitos Estatísticos</b> .....	31
2.2.4.1	<i>População e amostra</i> .....	32
2.2.4.2	<i>Parâmetros e estatísticas</i> .....	32
2.2.4.3	<i>Medidas de posição</i> .....	33
2.2.4.3.1	<i>Medida aritmética</i> .....	33
2.2.4.4	<i>Medidas de dispersão</i> .....	34
2.2.4.4.1	<i>Variância</i> .....	34
2.2.4.4.2	<i>Desvio padrão</i> .....	35
2.2.4.4.3	<i>Amplitude total</i> .....	35
2.2.4.5	<i>Distribuição normal</i> .....	35
2.2.5	<b>Gráficos de controle</b> .....	36
2.2.6	<b>Capabilidade do processo</b> .....	39
2.2.6.1	<i>Índice de capacidade potencial do processo (Cp)</i> .....	39

2.2.6.2	<i>Índice de desempenho do processo (Cpk)</i> .....	41
3	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	42
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	42
3.1.1	<b>Equipamentos Utilizados</b> .....	43
3.2	DADOS DO PRODUTO E PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	43
3.2.1	<b>Peça "chapa"</b> .....	43
3.2.2	<b>Peça "braço da ponteira"</b> .....	44
3.2.3	<b>Peça "gatilho Baldan"</b> .....	45
3.2.4	<b>Peça "engrenagem de dente inclinado"</b> .....	47
4	<b>ANÁLISE EXPERIMENTAL</b> .....	49
4.1	ANÁLISE DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL APÓS A COMPACTAÇÃO.....	49
4.1.1	<b>Peça "chapa"</b> .....	49
4.1.2	<b>Peça "braço da ponteira"</b> .....	51
4.1.3	<b>Peça "gatilho Baldan"</b> .....	52
4.1.4	<b>Peça "engrenagem de dente inclinado"</b> .....	53
4.2	GRÁFICOS DE CONTROLE DAS PEÇAS.....	56
4.2.1	<b>Gráfico de Controle da Peça "chapa"</b> .....	56
4.2.2	<b>Gráfico de Controle da Peça "braço da ponteira"</b> .....	59
4.2.3	<b>Gráfico de Controle da Peça "gatilho baldan"</b> .....	62
4.2.4	<b>Gráfico de Controle da Peça "engrenagem de dente inclinado"</b> .....	65
5	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	69
5.1	PEÇA "CHAPA".....	69
5.2	PEÇA "BRAÇO DA PONTEIRA".....	70
5.3	PEÇA "GATILHO BALDAN".....	71
5.4	PEÇA "ENGRENAGEM DE DENTE INCLINADO".....	71
6	<b>CONCLUSÕES</b> .....	72
7	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	74
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	75
	<b>ANEXO A – Certificado de análise de pó de ferro AHC 100.29</b> .....	81
	<b>ANEXO B – Certificado de análise grafite UF4</b> .....	82
	<b>ANEXO C – Ficha de Controle de Qualidade de peça sinterizada</b> .....	83
	<b>ANEXO D – Certificado Pó de Cobre</b> .....	84

## 1 INTRODUÇÃO

O controle de qualidade de peças fabricadas pelo processo de Metalurgia do Pó tem causado grandes preocupações na indústria de uma maneira geral. Sabe-se que peças sinterizadas, considerando-se o processo de fabricação convencional, isto é, compactação dos pós em matrizes rígidas, utilizando-se prensas mecânicas ou hidráulicas e sinterização em fornos convencionais contínuos, possuem muitas variáveis que precisam ser controladas em todas as etapas.

Este trabalho pretende dar uma contribuição ao processo de fabricação de peças sinterizadas, focando principalmente o aspecto das variações dimensionais e do controle de qualidade relacionado à precisão dimensional, utilizando principalmente uma ferramenta conhecida: O Controle Estatístico de Processo (CEP) que consiste em uma ferramenta desenvolvida com o objetivo de controlar a fabricação de peças em série.

A Figura 1 mostra o diagrama de bloco referente ao trabalho experimental realizado.

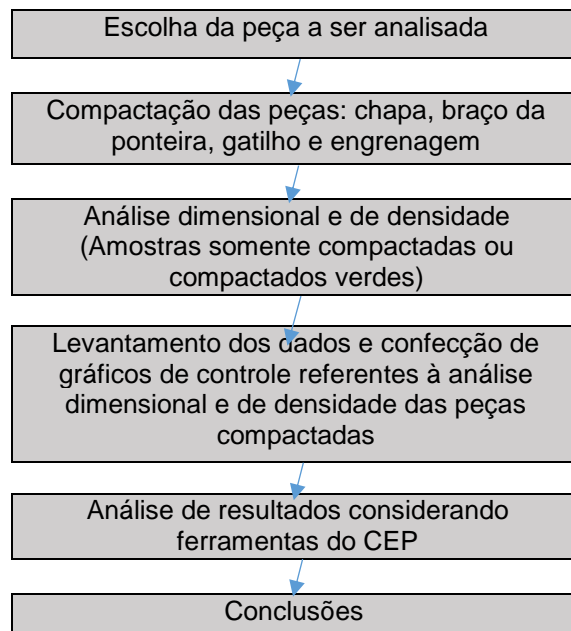


Figura 1 – Diagrama de bloco referente às etapas do controle de qualidade de peças compactadas.

Neste trabalho, é feita uma análise de peças produzidas pelo processo de Metalurgia do Pó. O método de controle de qualidade através de um levantamento estatístico, isto é, aferição das medidas dimensionais das peças num primeiro momento, é o caminho indicado para se ter uma visão precisa das variações que estão ocorrendo na compactação das peças. Através deste controle, são tomadas decisões com o objetivo de corrigir as distorções que, em geral, são determinadas pelo processo de fabricação. Entre as medidas tomadas para correção no processo produtivo estão a análise e correção das variações que ocorrem no enchimento da cavidade da matriz e como isso afeta a altura e a densidade das peças.

Durante a fabricação das peças por Metalurgia do Pó, ocorreram muitas perdas de correntes do processo. Na Metalurgia do Pó convencional, as variações durante a compactação, ocorreram na direção da aplicação da força,  $F$ , conforme mostra a Figura 2:

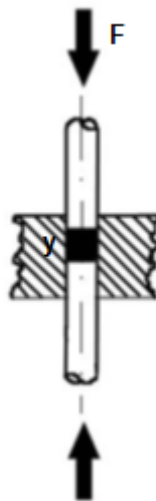


Figura 2 – Compactação Uniaxial.

Fonte: Hogan

A altura,  $y$ , tem sido um problema em prensas mecânicas ou hidráulicas, quando se requer muita precisão. Devido a isso, algumas peças possuem um alto índice de rejeito.

Com o objetivo de resolver este problema, isto é, reduzir as perdas por variação do processo, um controle deve ser feito justamente na etapa de compactação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aspectos Gerais da Metalurgia do Pó

A Metalurgia do Pó é um dos processos mais importantes para a fabricação de peças para uma infinidade de aplicações. O processo mais conhecido envolve basicamente as seguintes etapas: obtenção dos pós, preparação dos pós (ou mistura), compactação e sinterização. Na compactação, as peças adquirem a sua forma, que seguem o desenho da ferramenta. A sinterização ocorre em fornos, onde as peças adquirem as propriedades físicas e mecânicas pretendidas. As peças sinterizadas se caracterizam por possuírem boa precisão dimensional, as quais são determinadas nas etapas de compactação e sinterização. A porosidade é uma das características dos materiais obtidos por esta técnica. Muitos componentes, tais como buchas auto lubrificantes e filtros, requerem um controle do volume de poros, o que é facilmente obtido pelo controle da pressão de compactação. Em relação a outros processos de fabricação tais como fundição, micro fusão e usinagem, a metalurgia do pó leva uma vantagem econômica, principalmente em razão de sua alta produtividade e da não necessidade, na grande maioria dos casos, de operações posteriores (BARBOZA, 2009; CRISTOFOLINI, MENAPACEB, MOLINARIB, 2010; FERREIRA, 2011; JABUR, 2013).

A porosidade não só afeta a propriedades mecânicas de peças sinterizadas, como também as propriedades elétricas. A resistividade aumenta com o aumento do volume de poros ou diminui com o aumento da densidade. Em relação às propriedades magnéticas, observa-se uma diminuição da permeabilidade e um aumento da coercitividade, quando o volume de poros aumenta (BARBOZA, 2009).

Algumas vantagens do processo de metalurgia do pó são (BARBOZA, 2009; CHIAVERINI, 1992; EPMA, 2013; FERREIRA, 2011; WESCHENFELDER, 2014):

- Baixo impacto ambiental;
- Baixo consumo de energia (temperatura de sinterização mais baixa em relação a outros processos, por exemplo, fundição e micro fusão);
- Permite grande variedade de materiais e ligas, com controle total sobre o percentual de todos os elementos químicos, e com alta pureza;
- Alta produtividade;



- A grande maioria das peças não requerem operações secundárias, como por exemplo usinagem ou retífica;
- O processo permite uma elevada isotropia nas propriedades;
- Permite a fabricação de peças complexas já no formato final, com alta produtividade;
- As peças sinterizadas possuem boa tolerância dimensional, grande precisão e bom acabamento superficial;
- Muitos materiais com propriedades físicas e químicas específicas somente são possíveis de serem fabricados por metalurgia do pó. Por exemplo, materiais refratários, buchas porosas auto lubrificantes, metal duro;
- O processo de metalurgia do pó é de automação relativamente fácil, permitindo alta produtividade com baixo custo de mão-de-obra.

As desvantagens do processo são as seguintes (BARBOZA, 2009; CHIAVERINI, 1992):

- Em processos convencionais, a geometria das peças sinterizadas são limitadas, principalmente por causa da extração;
- O tamanho das peças está diretamente relacionado à força da prensa, já que a pressão de compactação necessária é proporcional a área transversal da peça, isto é, a área perpendicular à direção da força;
- A porosidade resultante do processo de compactação pode ser indesejável em muitos casos, devendo ser eliminada por processos posteriores de recompactação, forjamento, infiltração com cobre, sinterização com fase líquida, ou sinterização em temperatura mais elevadas.

### 2.1.1 Caracterização dos pós-metálicos

O comportamento dos pós metálicos depende do tamanho, distribuição do tamanho, forma, microestrutura e da porosidade da partícula, da superfície específica, da densidade aparente, da compressibilidade e da resistência à verde (DOMINGOS, SALGADO; LENEL, 1980).

O tamanho de partícula é definido pela abertura da peneira. Com a utilização de várias peneiras diferentes determina-se a distribuição granulométrica do pó, por meio de percentuais retidos em cada malha (DOMINGOS; LENEL, 1980).

A forma das partículas varia de acordo com o processo de fabricação. A maioria dos pós apresentam forma irregular. A forma irregular tende a produzir compactados com melhores características para sinterização (DOMINGOS).

Basicamente existem dois tipos de estruturas cristalinas nas partículas: mono cristalina, onde o tamanho de partícula e o tamanho de grão coincidem, e a poli cristalina, onde uma partícula contém muitos grãos. O mais comum são as partículas com muitos grãos (DOMINGOS).

A densidade aparente de um pó é o peso dividido pelo volume deste pó escoado livremente, e determina a profundidade da cavidade da matriz de compactação (DOMINGOS).

A compressibilidade é a capacidade de uma quantidade de pó sofrer densificação sob determinada pressão (DOMINGOS). A Figura 5 mostra uma curva de compressibilidade.

O termo resistência à verde é a resistência do compactado do pó antes do processo de sinterização. A resistência à verde depende do pó utilizado e da pressão aplicados na compactação (DOMINGOS; LENEL, 1980).

### 2.1.2 Mistura dos pós

Os principais misturadores de pó são os representados na Figura 3

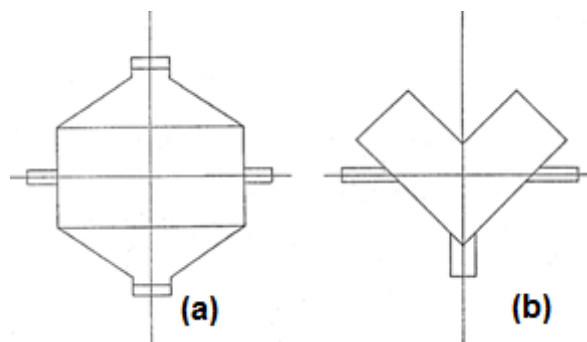


Figura 3 – Tipos de misturadores.

Fonte: DOMINGOS

- a) Tipo duplo cone
- b) Tipo V (DOMINGOS; LENEL, 1980).

O tipo de misturador a ser empregado deve evitar problemas na mistura, tais como segregação dos pós com diferentes densidades, por exemplo, ferro e grafite, e deformação plástica das partículas (DOMINGOS).

Na mistura, lubrificantes devem ser adicionados, tais como estearatos ou ceras. A função do lubrificante é reduzir o atrito entre as partículas e entre o pó e a ferramenta de compactação, proporcionando uma melhor compressibilidade (DOMINGOS; LENEL, 1980).

### 2.1.3 Compactação

A compactação consiste na aplicação de pressão sobre pós previamente misturados, promovendo-se a densificação do material até densidades que podem variar na maioria dos casos de 75 a 90% da densidade teórica para os aços estruturais. A compactação é feita em prensas mecânicas ou hidráulicas, onde, normalmente, são aplicadas pressões na faixa de 400Mpa a 600Mpa. O objetivo da compactação é conformar o pó na matriz, proporcionando o contato necessário entre as partículas (BARBOZA, 2009; BITTENCOURT, 2012; TECSINTER, 2015).

#### 2.1.3.1 Ciclo de compactação

O ciclo de compactação pode ser dividido em três estágios (HOGANAS):

1. Enchimento da cavidade,
2. Densificação ou compressão do pó, e
3. Ejeção do compactado da cavidade da ferramenta.

Cada um desses estágios é caracterizado por posições específicas ou movimentos dos componentes individuais da ferramenta. A Figura 4 mostra os três estágios de compactação.

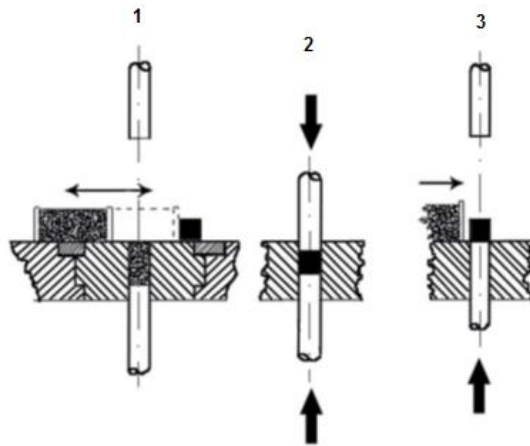


Figura 4 – Três estágios no ciclo de compactação: 1) enchimento da matriz, 2) densificação do pó, 3) ejeção do compactado verde

Fonte: (HOGANAS).

### 2.1.3.2 Curvas de densidade x pressão de compactação

As propriedades mecânicas das peças sinterizadas aumentam com o aumento da densidade, porém ocorre um aumento do consumo de energia com o aumento da carga de compactação. Assim, é mais desejável, por razões económicas e técnicas, alcançar a maior densidade compactada possível com a menor pressão possível (HOGANAS).

Curvas de densidade-pressão fornecem informações adequadas estabelecidas para cada material. Estas curvas são geralmente obtidas a partir de testes de laboratório padrão, onde uma série de compactados é feita com diferentes pressões em uma matriz de carboneto, tendo um furo cilíndrico de 25 mm de diâmetro. As densidades dos compactados são representadas graficamente como uma função das pressões de compactação. O gráfico da Figura 5 mostra as curvas de densidade-pressão para dois pós de ferro comerciais. (NC100.24 e ASC100.29) (HOGANAS).

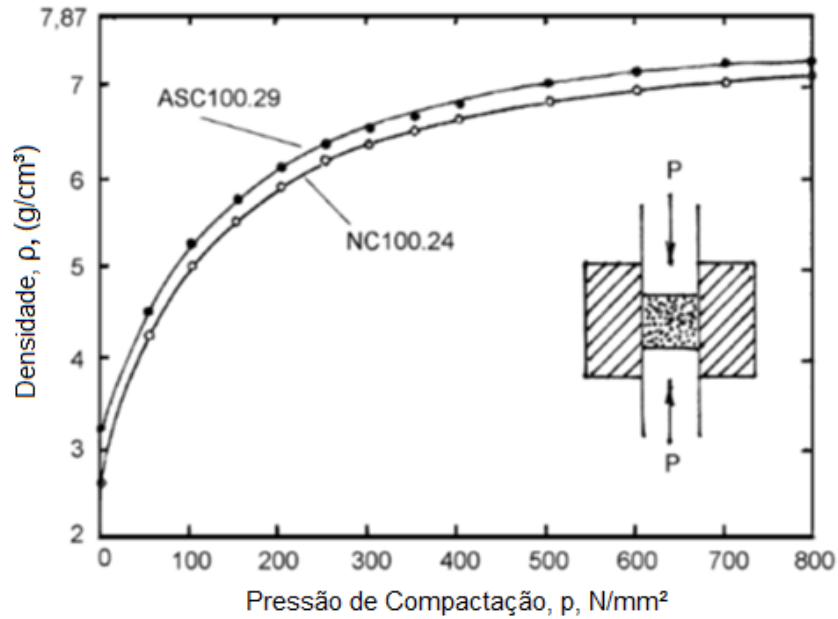


Figura 5 – Curvas de densidade-pressão para dois pós de ferro comerciais compactados em uma matriz de carboneto com diâmetro interior de 25 mm. Adições de lubrificante: 0,75% de estearato de zinco

Fonte: (HOGANAS).

### 2.1.3.3 Distribuição de densidade em um compactado

Quando o fluxo de pó ocorre apenas da direção da pressão aplicada durante a compactação, e quando peças com níveis de espessura diferentes na direção da aplicação de pressão são compactadas com um único punção inferior, isto resulta em diferentes densidades verdes nos diferentes níveis de espessura. Para se obter maior uniformidade da densidade nos diferentes níveis, utiliza-se punções independentes para cada nível de espessura. Estes punções devem se deslocar e tal forma, que a razão entre a altura do pó solto para a altura do compactado verde seja a mesma para ambos os níveis. Isto é ilustrado na Figura 6 (LENEL, F.V. ASM Handbook Powder Metallurgy).

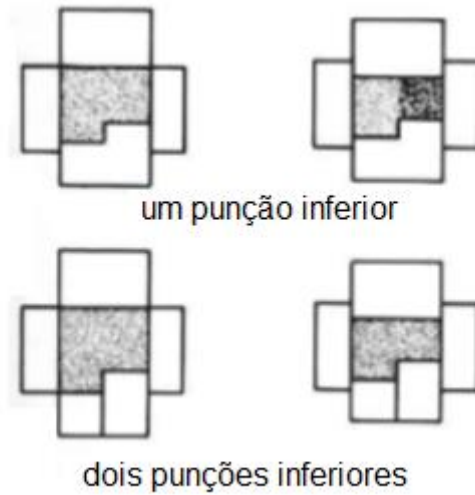


Figura 6 – Distribuição da densidade em um compactado de dois níveis.

Fonte: (LENEL, 1980, ASM Handbook Powder Metallurgy, 1990)

#### 2.1.3.4 Cortesia Aron Metal

Alguns exemplos de peças sinterizadas são apresentadas a seguir:



Figura 7 – Buchas para máquina agrícola. Liga Fe-Cu-C. Tratamento térmico de cementação. Dureza 48 - 52 RC. Camada cementada: 0,3 - 0,5 mm.



Figura 8 – Capa rolamento bicicleta. Liga Fe-Ni-Cu-C. Tratamento térmico de cementação. Dureza 60 RC. Camada cementada: 0,8 - 1,0 mm.



Figura 9 – Peças bomba d'água. Liga: aço inoxidável 316L.

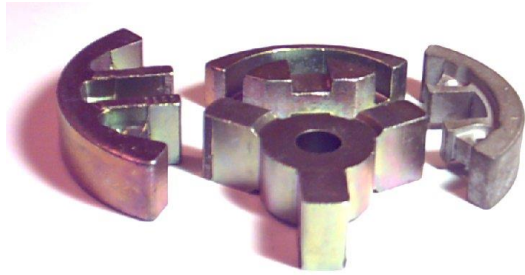


Figura 10 – Peças freio moto-serra. Liga Fe-Cu-C.

#### 2.1.4 Sinterização

A sinterização é um processo complexo e fundamental na Metalurgia do Pó, consistindo no aquecimento de compactados verdes em altas temperaturas, porém abaixo do ponto de fusão do metal ou do principal constituinte da liga metálica, sob condições pré-determinadas de tempo, temperatura e atmosfera. Ao final da sinterização, as partículas do compactado ligam-se e o material adquire resistência mecânica e dureza. Em alguns casos os poros contraem e o material densifica (ASM METALS HANDBOOK – POWDER METAL TECHNOLOGIES; BARBOZA, 2009; TECSINTER, 2015; CHIAVERINI, 1992).

O processo de sinterização é fundamentado de acordo com os seguintes parâmetros (HOGANAS HANDBOOK):

- temperatura e tempo,
- estrutura geométrica das partículas de pó,
- composição da mistura do pó,
- densidade do pó compactado,
- composição da atmosfera protetora no forno de sinterização.

### 2.1.4.1 Temperatura e tempo de sinterização

Quanto mais elevada for a temperatura de sinterização, mais curto será o tempo de sinterização necessário para atingir um grau desejado de ligação entre as partículas de pó do compactado. Isto terá uma influência direta sobre a resistência mecânica do produto sinterizado (HOGANAS).

Considerando o aspecto econômico, temperaturas de sinterização muito altas e tempos de sinterização muito longos não são aconselháveis na metalurgia do pó de ferro, condições de sinterização comuns são: 15 - 60 min a 1120 – 1150°C (HOGANAS).

A relação entre a densidade,  $\rho$ , e o tempo de sinterização de compactados de cobre pode ser visto na Figura 11. As amostras foram sinterizadas em cinco temperaturas diferentes, onde se observa que, quanto maior a temperatura de sinterização, maior a densidade relativa da amostra (SILVEIRA, 2009).

A densidade relativa,  $\rho_r$  é dada pela equação 1:

$$\rho_r = \frac{\text{densidade da amostra}}{\text{densidade teórica}} \times 100 \text{Eq (1)}$$

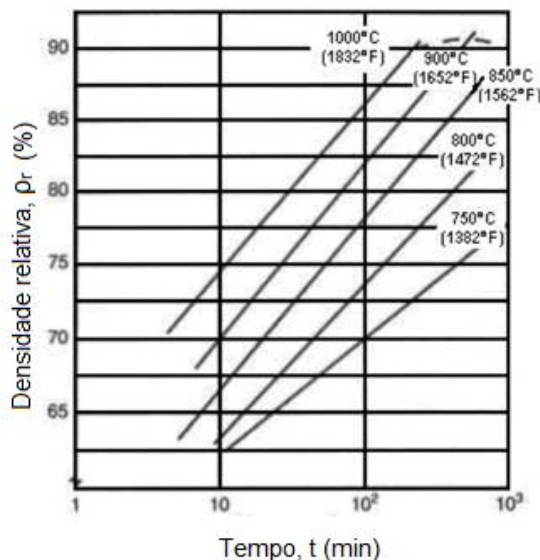


Figura 11 – Efeito da temperatura de sinterização e tempo na densidade dos compactados de pó de cobre.

Fonte: (SILVEIRA, 2009).



A Figura 12 mostra a variação da porosidade na sinterização de uma amostra de bronze. Observa-se no gráfico que a porosidade diminui quando a temperatura de sinterização aumenta até 790°C. Acima de 790°C, a porosidade aumenta. Observa-se também a variação das medidas axial e radial, em função da temperatura. A densidade das amostras varia de forma oposta à da porosidade, conforme o gráfico.

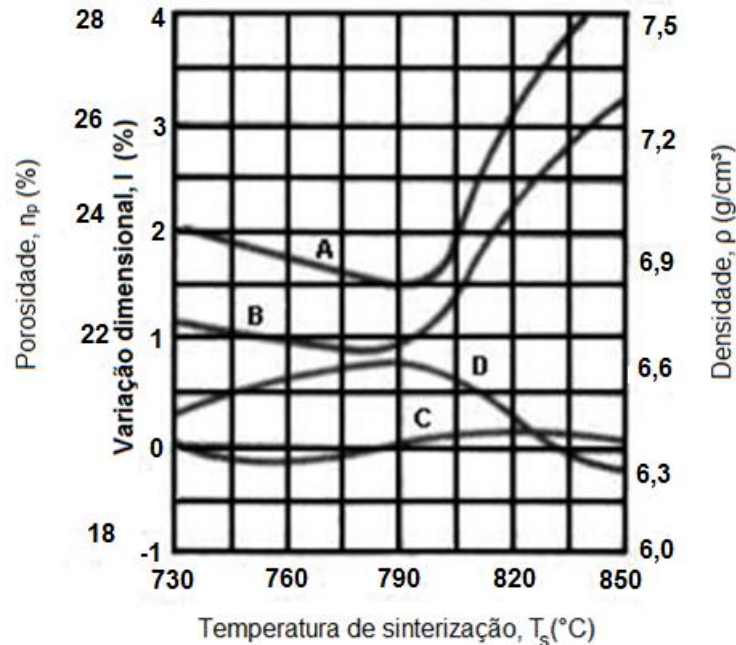


Figura 12 – Efeito da temperatura de sinterização nas propriedades físicas do bronze 90Cu-10Sn-2C. (A) Porosidade, %; (B) Variação dimensional axial; (C) Variação dimensional radial; (D) Densidade. Fonte: (SILVEIRA, 2009).

#### 2.1.4.2 Estrutura geométrica das partículas de pó

Em determinadas condições de sinterização, pós consistindo em partículas finas ou partículas de elevada porosidade interna (grande superfície específica), sinterizam mais rápido do que pós que consistem de partículas grosseiras. Entretanto, pós finos são geralmente mais difíceis de compactar do que pós grossos, e compactados feitos de pó fino encolhem mais durante a sinterização do que compactados feitos de pó grosso. Partículas de pó de ferro comerciais (esponjosos ou compactos) para peças estruturais são geralmente  $\leq 150\mu\text{m}$  (HOGANAS).

#### 2.1.4.3 Composição da mistura de pó

Os componentes da mistura em pó são selecionados visando alcançar as propriedades físicas desejadas e controlar as variações dimensionais durante a sinterização. Quando misturas de dois ou mais pós de metais diferentes (por exemplo, ferro, níquel e molibdênio) são sinterizadas, ocorrem simultaneamente a formação de liga entre os elementos e a soldagem entre as partículas (HOGANAS).

Em temperaturas comuns de sinterização (1120 – 1150 °C), processos de ligação são lentos (exceto entre o ferro e o carbono), e uma completa homogeneização dos elementos de liga metálica não é alcançada. Se a mistura em pó contém um componente que forma uma fase líquida na temperatura de sinterização (por exemplo, cobre em misturas de pó de ferro), a soldagem entre as partículas, bem como processos de formação de liga, é acelerada (HOGANAS).

#### 2.1.4.4 Densidade do pó compactado

Quanto maior for a densidade de um pó compactado, maior é a área total de contato entre as partículas do pó. Desta forma, a soldagem entre partículas e a formação de liga durante a sinterização são mais eficientes (HOGANAS).

#### 2.1.4.5 Composição da atmosfera protetora no forno de sinterização

A atmosfera protetora tem de cumprir várias funções durante a sinterização: a) proteger da oxidação; b) reduzir óxidos residuais; c) prevenir descarbonetação do material contendo carbono; d) evitar carbonetação de material livre de carbono (HOGANAS; CHIAVERINI, 1992).

Na metalurgia do pó de ferro, as seguintes atmosferas de sinterização são comuns:

- Tipo redutora-descarbonetante: hidrogênio (H<sub>2</sub>), amônia craqueada (75% H<sub>2</sub>, 25% N<sub>2</sub>),
- Tipo redutora-carbonetante: endogás (32% H<sub>2</sub>, 23% CO, 0-0,2% CO<sub>2</sub>, 0-0,5% CH<sub>4</sub>, bal N<sub>2</sub>),

• Tipo neutro: nitrogênio criogênico ( $N_2$ ). Neste caso, pequenas adições de  $H_2$  ajudam a eliminar óxidos residuais, e adições de metano ou propano restauram perdas de carbono.

A atmosfera mais utilizada na indústria na sinterização de aços baixa liga é a mistura 90/95  $N_2$  – 10/5  $H_2$ .

#### 2.1.4.6 Variações dimensionais na sinterização

As variações dimensionais lineares, de uma liga Fe-P-Ni-Mo e de uma liga Fe-C-Ni-Mo, podem ser vistas nas Figura 13 e são chamadas de curvas de dilatométria. Observa-se que as amostras sofreram uma expansão térmica até 700°C. Após 700°C a amostra contendo carbono teve uma tendência de dilatação, enquanto a amostra contendo fósforo teve uma tendência de contração. (ESPER, 1976).

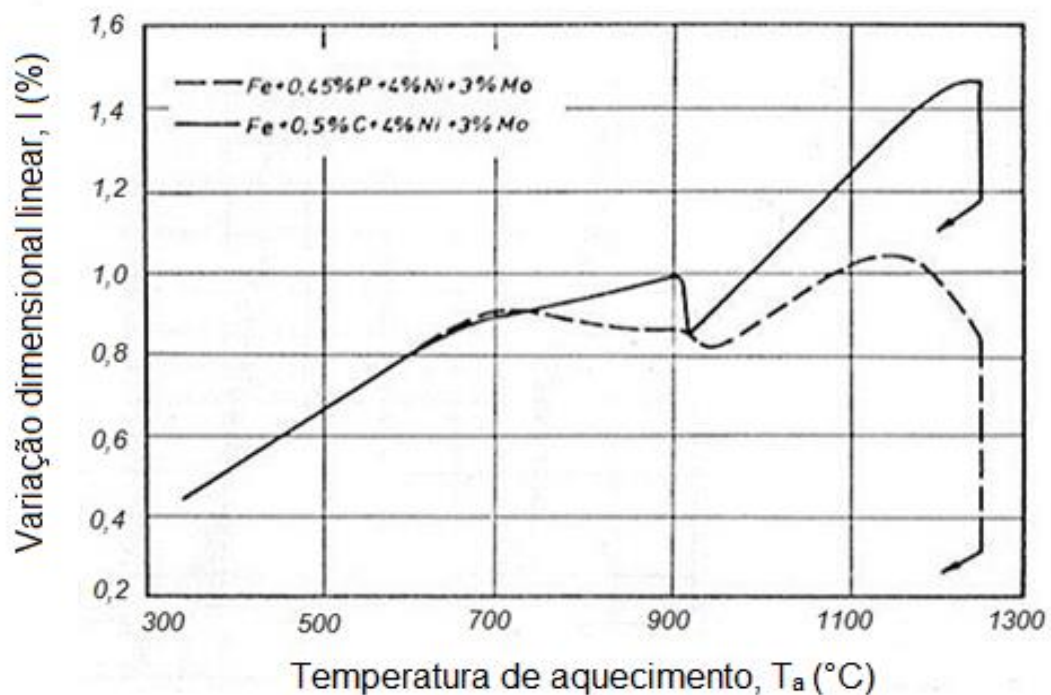


Figura 13 – Variações dimensionais lineares que ocorrem na liga Fe-Ni-Mo-P em função da temperatura de aquecimento.  
Fonte: (ESPER, 1976).

## 2.2 Controle de qualidade e tolerância dimensional

As tolerâncias dimensionais de peças fabricadas pelo processo de MP levam alguma vantagem em relação a outros processos de conformação. Os limites das tolerâncias dependem da orientação da dimensão em relação à direção de compactação, da complexidade do componente, do tipo de material, das variações do processo e das operações secundárias (DESIGN NEWS).

As dimensões radiais são determinadas pela dimensão da ferramenta, enquanto que as dimensões axiais são controladas pelos movimentos da prensa e da precisão do enchimento de pó (DESIGN NEWS)

Em geral, a precisão dimensional de peças sinterizadas é determinada utilizando-se as mesmas técnicas de medição dos materiais convencionais (ASM HANDBOOK POWDER METALLURGY, 1990).

Variações dimensionais ocorrem durante o processo de metalurgia do pó, tais como (ASM HANDBOOK POWDER METALLURGY, 1990):

- Recuperação elástica durante a ejeção da matriz
- Dilatação ou contração durante a queima do lubrificante e sinterização
- Recuperação elástica da ferramenta durante a re-compressão ou calibração
- Desgaste da ferramenta
- Variações dimensionais durante tratamentos térmicos de recozimento ou endurecimento.

Para qualquer produto existem parâmetros estabelecidos e definidos, e, para alcançar esses padrões, é necessário o controle de qualidade. Essa ferramenta possibilita um monitoramento dos resultados do processo, identificando onde estão os erros e falhas, para que se possa tomar alguma medida preventiva para corrigir o problema (SINGH, GILBREATH, 2002).

### 2.2.1 Controle Estatístico do Processo (CEP)

O Controle Estatístico do Processo (CEP) é um conjunto importante de ferramentas que auxiliam na gerência de processos, determinando e monitorando a qualidade dos seus resultados. Com o Controle Estatístico do Processo (CEP) é

possível compreendermos e identificarmos as variações normais e anormais de um processo (VIJAYA, ARUMUGAM, 2010; ABLE, HAMPTON, BAYDUSH, MUNLEY, 2011).

O Controle Estatístico do Processo (CEP) foi uma técnica originada por Walter Shewhart durante 1920 e utilizado em muitos contextos. Posteriormente, o método de controle foi desenvolvido por Shewhart e Deming (BEHBAHANI, SAGHAEE, NOOROSSANA, 2012; BRAMWELL, 2013; MAICZUK, ANDRADE 2013; MOHANARAO, VENKATASUBBAIAH, NARAYANARAO, SRINIVASARAO, 2013; POOTS, WOODCOCK, 2012; BALDASSARRE, BOFFOLI, CAIVANO, 2010).

O CEP é uma das principais ferramentas utilizadas no Controle Estatístico da Qualidade (CEQ), sendo muito respeitado por inúmeras indústrias. Essa importante ferramenta, otimiza a quantidade de informações necessárias para a tomada de decisões em uma organização (RAVI, SUPRIYA, MOHAN, 2011). Diversas empresas têm utilizado o CEP para garantir a qualidade e confiabilidade dos produtos, o que gera satisfação do cliente. (BEHBAHANI, SAGHAEE, NOOROSSANA, 2012; BRAMWELL, 2013; MAICZUK, ANDRADE, 2013; RAHMAN, ZAIN, ALIAS NOPIAH, 2015; LAOSIRITAWORN, BUNJONGJIT, 2010). Os métodos desta ferramenta são eficazes para monitorar os processos de produção, detectando mudanças ao longo do tempo, sendo possível utilizá-los em todas as fases de um processo (SRINIVASU, REDDY, RIKKULA, 2011; MOHANARAO, VENKATASUBBAIAH, NARAYANARAO, SRINIVASARAO, 2013).

O CEP auxilia na diminuição da variação dos processos, melhorando a qualidade do produto, o que gera uma maior rentabilidade para a organização. Por meio dos Gráficos de Controle, é possível detectar as variações que ocorrem em uma produção, permitindo a melhora e controle do processo produtivo (SRINIVASU, REDDY, RIKKULA, 2011; POOTS, WOODCOCK, 2012; BALDASSARRE, BOFFOLI, CAIVANO, 2010; BEHBAHANI, SAGHAEE, NOOROSSANA, 2012; BRAMWELL, 2013; MAICZUK, ANDRADE 2013; PARKASH, KUMAR, RAJORIA, 2013).

O CEP tem muitas vantagens em relação a outros métodos de controle. Entre elas, podemos citar redução de desperdício, menor tempo de produção e maior confiabilidade do produto final, além de uma maior compreensão dos processos (BERLEMANN, FREESE, KNOTH, 2012).

O objetivo de um processo é transformar insumos em produtos (MORAES, FERREIRA, BALESTRASSI, 2006):

O objetivo do CEP é indicar se um processo está funcionando da maneira correta ou se está variando, é mostrar quando o processo muda, ou seja, quando sua variabilidade aumenta. Assim, é possível corrigir o erro durante o processo por um operador de máquina, tornando o processo estável e satisfazendo o cliente (MORAES, FERREIRA, BALESTRASSI, 2006; SKULJ, VRABIC, BUTALA, SLUGA, 2013; NOSKIEVICOVÁ, 2010).

No CEP, algumas peças são retiradas aleatoriamente do processo de fabricação, logo após suas características são medidas, analisadas e apresentadas em um gráfico, o que possibilita a avaliação do estado do processo. Se o processo não estiver sob controle, ele é interrompido e correções são feitas (PARKASH, KUMAR, RAJORIA, 2013; DINIZ, 2006).

O CEP é uma ferramenta estatística aplicada na linha de produção, que garante a qualidade do produto final, reduzindo os custos com inspeções e análises de produto. (SOUZA, CAMPOS, 2012).

### 2.2.2 O Controle Estatístico do Processo e sua aplicação

A qualidade tem uma grande importância nas organizações, por isso a implementação do Controle Estatístico do Processo é necessária, pois ela garante um produto de qualidade (DAL'CORTIVO, 2005; SKULJ, VRABIC, BUTALA, SLUGA, 2013) Nos processos de fabricação, a implementação do Controle Estatístico do Processo é um fenômeno que tem se destacado globalmente e pode ser aplicado pelo operador do processo, desde que ele tenha sido treinado por engenheiros da qualidade (PARKASH, KUMAR, RAJORIA, 2013; DINIZ, 2006).

A implementação do CEP é integrada, normalmente, com os softwares SCADA, MES E ERP. Maiores companhias utilizam essas soluções integradas, porém as menores utilizam métodos manuais (SKULJ, VRABIC, BUTALA, SLUGA, 2013).

Implementações bem-sucedidas do CEP geram efeitos positivos nas organizações, como maior comunicação entre os departamentos, maior satisfação

dos clientes, diminuição de custos e da variabilidade dos processos, além de melhoria da qualidade do produto final (ROHANI, YUSOF, MOHAMAD, 2010)

### 2.2.3 Fases do Método Estatístico

Em um estudo estatístico existem algumas fases que precisam ser desenvolvidas para a obtenção de resultados finais: definição do problema, planejamento, coleta de dados, apuração dos dados, apresentação dos dados, análise e interpretação dos dados (CORREA, 2003; LOPES, 2009).

### 2.2.4 Conceitos Estatísticos

A palavra estatística tem origem latina: status. Ela é imprescindível na análise de dados de processos onde exista variabilidade. A estatística estuda e analisa os dados observados. Podemos dizer que ela é a ciência que estuda os dados. Ela envolve coleta, classificação, organização, análise, interpretação e apresentação de dados. O objetivo das técnicas estatísticas nas organizações é reduzir custos e aumentar a qualidade. Com essas técnicas, é possível analisar os lotes de produção, através de amostras, evitando problemas no produto final (CORREA, 2003; DINIZ, 2006; FARIA, ANDRADE, SILVA, 2014; MARTINS, 2005; SAMOBYL, 2009).

A estatística é um método muito eficiente na tomada de decisões, pois com ela podemos analisar e interpretar dados de forma eficiente (ULBRA, 2010). A estatística se divide em (KMETEUK, 2005):

- Descritiva: coleta, descrição e apresentação dos dados.
- Indutiva: análise e interpretação dos dados.

As variáveis são características de qualquer indivíduo, podendo ser pessoas, animais ou objetos. Elas podem ser classificadas em (MOORE, 2005; ULBRA, 2010):

- Qualitativas ou categóricas: são definidas por dois tipos de categorias:
  - Nominais: não possuem ordenação dentre as categorias, como exemplo, raça, sexo, cor dos olhos, doente/sadio

- Ordinais: possuem ordenação de categorias, como exemplo, mês de observação (janeiro, fevereiro, março...), escolaridade, turno de trabalho.
- Quantitativas: são definidas por dois tipos de categorias:
- Discretas: são características mensuráveis, números inteiros, como exemplo, número de filhos, número cigarros fumados por dia.
  - Contínuas: são características mensuráveis que podem ser medidas com um instrumento específico. Nesta categoria, números fracionais são utilizados. Como exemplo, idade, peso (balança), altura (régua).

As variáveis também podem ser classificadas em independentes (causa de um acontecimento), dependentes (resulta da variável independente), e intervenientes (modifica a variável dependente sem alterar a independente) (KMETEUK, 2005).

Os dados coletados devem ser transformados em informações úteis que auxiliem na tomada de decisões. Esses dados devem ser apresentados através de tabelas ou de gráficos, pois essas duas ferramentas nos permitem ter uma visualização mais clara das informações (ULBRA, 2010).

#### 2.2.4.1 População e amostra

Primeiramente, é necessário entender a diferença entre amostra e população (AVALE, 2015; LOPES, 2009):

- População (N): é um conjunto de pessoas, objetos ou informações que apresentam características em comum. Ela pode ser finita (as amostras podem ser contadas) ou infinita (impossível de contar as amostras).
- Amostra (n): é um conjunto de observações tomadas a partir da população, por exemplo, em alguns casos, seria impossível analisar todos os elementos de uma população, então, são analisados somente parte destes elementos, a amostra.

#### 2.2.4.2 Parâmetros e estatísticas

- Parâmetros: são valores reais quando toda a população é medida. São usados para descrever uma variável da população. São utilizadas letras gregas para representar esses parâmetros (AVALE, 2015; LOPES, 2009).



- Estatísticas ou estimadores: são valores estimados, medidas da amostra (AVALE, 2015; LOPES, 2009).

A Figura 14 mostra os símbolos usados para parâmetros e para estimadores.

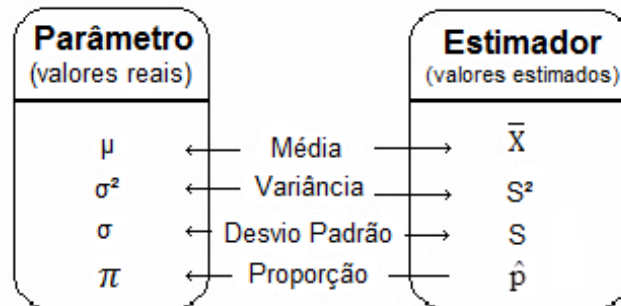


Figura 14 – simbologia para parâmetros e estatísticas  
Fonte: (LOPES, 2009).

#### 2.2.4.3 Medidas de posição

As medidas de posição são classificadas em (LOPES, 2009):

- Representativas: Média aritmética, média geométrica e média harmônica.
- Separatrizes: Mediana, quartis, decis, centis ou percentis
- Dominantes: Moda de Czuber, moda de King, moda de Pearson.

Neste trabalho, somente a Média aritmética será usada.

##### 2.2.4.3.1 Média aritmética

A média aritmética (populacional,  $\mu$  ou amostral,  $\bar{X}$ ) é a medida de posição mais utilizada, sendo dividida em (DINIZ, 2006; LOPES, 2009):

- Média populacional ( $\mu$ ): é a soma dos valores da população dividida pelo número dos seus elementos ( $N$ ), e é representada pela equação 2:

$$\mu = (\sum X)/N \quad \text{Eq(2)}$$

- Média amostral ( $\bar{X}$ ): é a soma dos valores da amostra dividida pelo número dos seus elementos ( $n$ ), sendo representada pela equação 3:

$$\bar{X} = (\sum X)/n \quad \text{Eq(3)}$$

#### 2.2.4.4 Medidas de dispersão

As medidas de dispersão são: variância, desvio-padrão, amplitude e amplitude inter-quartil. Neste trabalho não vamos utilizar a amplitude inter-quartil. Elas auxiliam nas medições da variabilidade de um conjunto de dados (CONTROLE ESTATÍSTICO DA QUALIDADE, 2015).

##### 2.2.4.4.1 Variância

A variância (populacional,  $\sigma^2$  ou amostral,  $S^2$ ) é a medida mais útil da estatística, e é dividida em (PORTAL ACTION, 2015):

- Variância populacional ( $\sigma^2$ ): calcula-se primeiramente a diferença entre o valor de cada amostra ( $X_i$ ) e sua média ( $\mu$ ) e eleva-se cada resultado ao quadrado. Logo após, somam-se todos os resultados, dividindo-os pelo número de elementos da população ( $N$ ). A variância populacional ( $\sigma^2$ ) pode ser definida pela equação 4:

$$\sigma^2 = \frac{\sum(X_i - \mu)^2}{N} \quad \text{Eq(4)}$$

- Variância amostral ( $S^2$ ): calcula-se primeiramente a diferença entre o valor de cada amostra ( $X_i$ ) e sua média ( $\bar{X}$ ), elevando cada resultado ao quadrado. Logo após, somam-se todos os resultados, dividindo-os pelo número de elementos da amostra menos um ( $n-1$ ). A variância amostral ( $S^2$ ) pode ser definida pela equação 5:

$$S^2 = \frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad \text{Eq(5)}$$

#### 2.2.4.4.2 Desvio padrão

O desvio padrão (populacional,  $\sigma$  ou amostral,  $S$ ) é a raiz quadrada da variância (DINIZ, 2006). É uma medida que sempre assume valores não negativos. Quanto maior a variabilidade dos elementos, maior o desvio padrão. Se este for igual a zero, não existe variabilidade, e os dados são iguais entre si. O desvio-padrão pode ser dividido em (PORTAL ACTION, 2015):

- Desvio padrão populacional ( $\sigma$ ): é a raiz quadrada da variância populacional, e é definido pela equação 6:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \mu)^2}{N}} \quad \text{Eq (6)}$$

- Desvio padrão amostral ( $S$ ): é a raiz quadrada da variância amostral, e é definido pela equação 7:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad \text{Eq (7)}$$

#### 2.2.4.4.3 Amplitude total

A amplitude total ( $R$ ) é a subtração do maior e do menor valor de um grupo de dados, e é representada pela equação 8 (DINIZ, 2006):

$$R = X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}} \quad \text{Eq (8)}$$

#### 2.2.4.5 Distribuição normal

É uma distribuição contínua de probabilidades e a mais importante da estatística. É também conhecida como Distribuição de Gauss ou Gaussiana, ou como “curva em forma de sino” (PORTAL ACTION, 2015). Foi desenvolvida pelo francês Abraham de Moivre (ESTATÍSTICA GERAL, 2009).

Os parâmetros da distribuição normal são (ESTATÍSTICA GERAL, 2009):

- Média populacional:  $\mu$
- Desvio padrão populacional:  $\sigma$

A Figura 15 mostra o gráfico da distribuição normal:

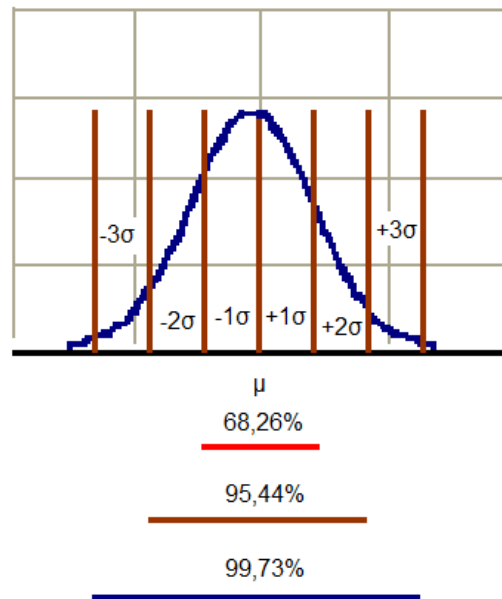


Figura 15 – Distribuição Normal  
Fonte: (SÓ MATEMÁTICA, 2015).

As barras verticais na cor marrom representam os desvios padrões populacionais ( $\sigma$ ); a barra na cor vermelha representa que 68,26% dos valores estão no intervalo  $\mu \pm \sigma$ ; a barra horizontal na cor marrom representa que 95,44% dos valores estão no intervalo  $\mu \pm 2\sigma$ ; e a barra na cor azul representa que 99,73% dos valores estão no intervalo  $\mu \pm 3\sigma$ . (DINIZ, 2006; SÓ MATEMÁTICA, 2015).

A faixa de variabilidade que é usada no CEP é  $\mu \pm 3\sigma$ . Ou seja, são esperadas diferenças entre um valor e média maiores que  $\pm 3\sigma$  somente três vezes a cada mil observações. (DINIZ, 2006; DISTRIBUIÇÃO NORMAL, 2011).

Algumas vezes não é possível saber qual a verdadeira média populacional ( $\mu$ ), então estima-se que ela seja a média amostral ( $\bar{X}$ ) (LUCHESSA, NETO, 2011).

### 2.2.5 Gráficos de controle

Os Gráficos de Controle são uma das técnicas mais conhecidas e um dos principais métodos de monitoramento do CEP, devido à sua simplicidade e eficiência operacional. São usados para monitorar o processo, descobrir causas de falhas e problemas, reduzir a variabilidade e melhorar a qualidade. A sua aplicação bem-sucedida tem atraído engenheiros da qualidade e peritos em estatística. Os gráficos de controle podem ser divididos em gráficos de controle por variáveis e gráficos de

controle por atributos (BEHBAHANI, SAGHAEI, NOOROSSANA, 2012; SKULJ, VRABIC, BUTALA, SLUGA, 2013; WANG, ZHANG, LI, CHEN, 2012; SRINIVASU, REDDY, RIKKULA, 2011; BERLEMANN, FREESE, KNOTH, 2012; TASDEMIR, KOWALCZUK, 2014; MAGALHÃES, NETO, 2011; PARKASH, KUMAR, RAJORIA, 2013).

Os Gráficos de Controle foram desenvolvidos primeiramente pelo Dr. Walter Shewhart na década de 1920, e posteriormente foram popularizados por Shewhart e Deming (SHABBAK, MIDI, HASSAN, 2011; POOTS, WOODCOCK, 2012). Os Gráficos de Controle são normalmente chamados de “ShewhartControlCharts”. Esses gráficos podem ser usados no CEP e no Controle Estatístico da Qualidade (CEQ) (MAGALHÃES, NETO, 2011; RAHMAN, ZAIN, ALIAS NOPIAH, 2015; PARKASH, KUMAR, RAJORIA, 2013; LIMA, LIMA, SILVA, ALENCAR, SOARES-SOBRINHO, LIMA, ROLIM-NETO, 2006; MATARAGAS, DROSINOS, TSOLA, ZIOPOULOS, 2012; OLIVEIRA, GRANATO, CARUSO, SAKUMA, 2013; RAO, RATNAM, 2012).

Um dos objetivos de um gráfico de controle é estabelecer e manter a estabilidade de um processo (LUANGPAIBOON, 2011; MOHANARAO, VENKATASUBBIAH, NARAYANARAO, SRINIVASARAO, 2013). Estes gráficos servem para monitorar a qualidade dos processos, se ele está ou não sob controle, através da análise de dados de amostras coletados durante o processo de fabricação (JAUPI, DURAND, GHORBANZADEH, 2015; NUNES NETO, SOUZA, LIRA, SEVERO, DUTRA, 2010; LIMA, LIMA, SILVA, ALENCAR, SOARES-SOBRINHO, LIMA, ROLIM-NETO, 2006; MATARAGAS, DROSINOS, TSOLA, ZIOPOULOS, 2012; OLIVEIRA, GRANATO, CARUSO, SAKUMA, 2013; RAO, RATNAM, 2012).

Os Gráficos de Controle permitem que as variações do processo sejam detectadas através de uma faixa chamada “limites de controle”, composta pelo limite superior de controle – LSC (linha superior), limite inferior de controle – LIC (linha inferior) e linha central (LC) (HU, QU, 2014; OLIVEIRA, GRANATO, CARUSO, SAKUMA, 2013; DUDEK-BURLIKOWSKA, 2011; DUMIČIĆ, ŽMUK, 2015; PRASAD, RAO, KANTHAM, 2011).

Os Gráficos de Controle devem alertar quando ocorre uma variação no processo. Se os dados das amostras colhidas estiverem fora dos limites de controle,

o processo está fora de controle e deve ser interrompido. Após a interrupção, devem ser tomadas medidas para a resolução do problema (RAVI, SUPRIYA, MOHAN, 2011; TASDEMIR, KOWALCZUK, 2014; SRINIVASU, REDDY, RIKKULA, 2011; RAVI, SUPRIYA, MOHAN, 2011).

A Figura 16 mostra exemplos de gráficos de controle, onde os pontos representam medições de determinadas amostras (OLIVEIRA, GRANATO, CARUSO, SAKUMA, 2013).

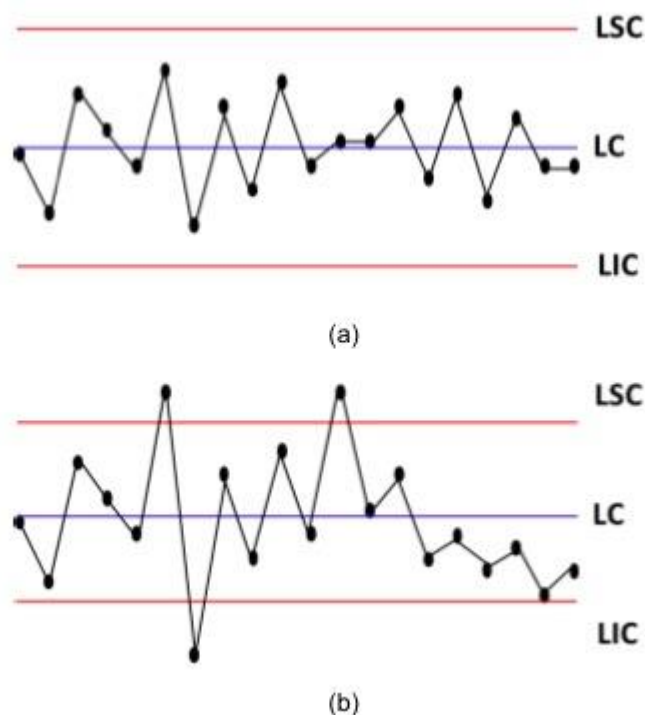


Figura 16 – Exemplo de gráficos de controle. (a) Sob-controle estatístico (b) Fora de controle estatístico.

Fonte: (OLIVEIRA, GRANATO, CARUSO, SAKUMA, 2013).

Quando as medições das amostras estiverem como no gráfico (a), o processo está sob controle, pois todos os pontos, que representam as medições, estão abaixo do LSC e acima do LIC. Já no gráfico (b), o processo está fora de controle, pois alguns pontos estão acima do LSC e abaixo do LIC. Nesse último caso, são necessárias ações corretivas para detectar e eliminar as causas do problema no processo (LIMA, LIMA, SILVA, ALENCAR, SOARES-SOBRINHO, LIMA, ROLIM-NETO, 2006; OLIVEIRA, GRANATO, CARUSO, SAKUMA, 2013).

Para a construção de um gráfico de controle são necessários alguns procedimentos (DINIZ, 2006):

- Amostras são coletadas durante o processo em intervalos regulares;
- Marcam-se os valores das medições das amostras, em abscissas, cronologicamente;
- Verticalmente, marcam-se três linhas horizontais importantes:
  - a) a média ( $\mu$ ) que define a linha central (LC);
  - b)  $LSC = \mu + 3\sigma$ ;
  - c)  $LIC = \mu - 3\sigma$ .

#### 2.2.6 Capabilidade do processo

O estudo da capabilidade do processo tem como objetivo atender às especificações do cliente, verificando se o processo está adequado, diferente do objetivo dos gráficos de controle, que é verificar a estabilidade do processo. Alguns processos são controláveis (estáveis), mas incapazes. Por isso, o estudo da capabilidade é importante, pois verifica se o processo é capaz, se está atendendo às especificações do cliente. (DATALYZER, 2016; OLIVEIRA, SOUTO, MAIA, MEIRA, LIMA, 2011).

O estudo da capabilidade só pode ser feito após a análise do processo através dos gráficos de controle. Se o processo não estiver sob controle estatístico, não é possível realizar o estudo da capabilidade. (DATALYZER, 2016; OLIVEIRA, SOUTO, MAIA, MEIRA, LIMA, 2011).

Dentre os métodos estatísticos usados para verificar a capabilidade do processo, destacam-se os índices de capacidade:  $C_p$  (índice de capacidade potencial do processo) e  $C_{pk}$  (índice de desempenho do processo). Esses dois índices são os mais usados na indústria. Sua função é auxiliar na estimação da proporção de produtos defeituosos produzidos. O cálculo desses índices utiliza o desvio-padrão ( $S$ ) (DATALYZER, 2016).

##### 2.2.6.1 Índice de capacidade potencial do processo ( $C_p$ )

Este índice desconsidera a centralização do processo, considerando que o processo está centralizado no valor nominal da especificação e relacionando a variabilidade permitida com a variabilidade natural. O  $C_p$  não é sensível às causas

especiais dos dados e desconsidera a média do processo, utilizando somente sua variação. Quanto maior o valor do Cp, maior a probabilidade do processo estar dentro das especificações. (BAYEUX, 2001; DATALYZER, 2016; GONÇALEZ, WERNER, 2009; OLIVEIRA, SOUTO, MAIA, MEIRA, LIMA, 2011).

O cálculo do Cp é representado pela equação 9 (DATALYZER, 2016):

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6 \hat{\sigma}} \quad \text{Eq (9)}$$

Onde LSE é o limite superior de especificação, LIE é o limite inferior de especificação e  $\hat{\sigma}$  é o desvio padrão estimado. (BAYEUX, 2001; DATALYZER, 2016; OLIVEIRA, SOUTO, MAIA, MEIRA, LIMA, 2011).

Para se encontrar o valor de  $\hat{\sigma}$ , calcula-se primeiramente a diferença entre o valor de cada amostra ( $X_i$ ) e sua média amostral ( $\bar{X}$ ), elevando cada resultado ao quadrado. Após isso, somam-se todos os resultados, dividindo-os pelo número de elementos da amostra menos um ( $n-1$ ). Por último, é feita a raiz quadrada do resultado da divisão. O cálculo do desvio padrão estimado é representado pela equação 10 (DATALYZER, 2016; PORTAL ACTION, 2015):

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad \text{Eq (10)}$$

Ou seja,  $\hat{\sigma}$  é igual ao desvio padrão amostral (S). (DATALYZER, 2016).

O processo é considerado (DATALYZER, 2016):

- Aceitável, se Cp for maior ou igual a 1 e menor ou igual a 1,33;
- Incapaz, se Cp for menor que 1;
- Capaz, se Cp for maior ou igual a 1,33.



### 2.2.6.2 Índice de desempenho do processo (Cpk)

O Cp pode ser falho, pois o processo nem sempre está centralizado no valor nominal da especificação, então, utiliza-se o Cpk (GONÇALEZ, WERNER, 2009).

O Cpk considera a centralização do processo, ajustando o Cp para uma distribuição não centralizada entre os limites de especificação. Este índice é sensível às causas especiais dos dados (DATALYZER, 2016).

Para calcular-se o Cpk, primeiramente divide-se o resultado da subtração do limite superior de especificação (LSE) e da média do processo ( $\bar{\bar{X}}$ ) por  $3\hat{\sigma}$ . Também se divide o resultado da subtração da média do processo ( $\bar{\bar{X}}$ ) e do limite inferior de especificação (LIE) por  $3\hat{\sigma}$ . O Cpk é o valor mínimo entre os dois resultados desses cálculos (DATALYZER, 2016).

O cálculo do Cpk é representado pela equação 11 (DATALYZER, 2016):

$$\text{MIN} \left( \frac{LSE - \bar{\bar{X}}}{3\hat{\sigma}}, \frac{\bar{\bar{X}} - LIE}{3\hat{\sigma}} \right) \quad \text{Eq (11)}$$

Onde LSE é o limite superior de especificação, LIE é o limite inferior de especificação,  $\hat{\sigma}$  é o desvio padrão estimado e ( $\bar{\bar{X}}$ ), que é a média do processo é igual a  $\bar{X}$  (média amostral) (DATALYZER, 2016; PORTAL ACTION, 2015).

O processo é considerado (DATALYZER, 2016):

- Aceitável, se Cpk for maior ou igual a 1 e menor ou igual a 1,33;
- Incapaz, se Cpk for menor que 1;
- Capaz, se Cpk for maior ou igual a 1,33.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Considerações gerais

Neste trabalho são analisadas peças produzidas pelo processo de Metalurgia do Pó. O objetivo é verificar se as peças estão sendo produzidas dentro das tolerâncias exigidas. Muitos são os parâmetros que podem influenciar sobre as características finais dos componentes sinterizados. Ao longo deste trabalho, serão analisadas as particularidades de algumas peças produzidas por Metalurgia do Pó que são importantes para o controle do produto final.

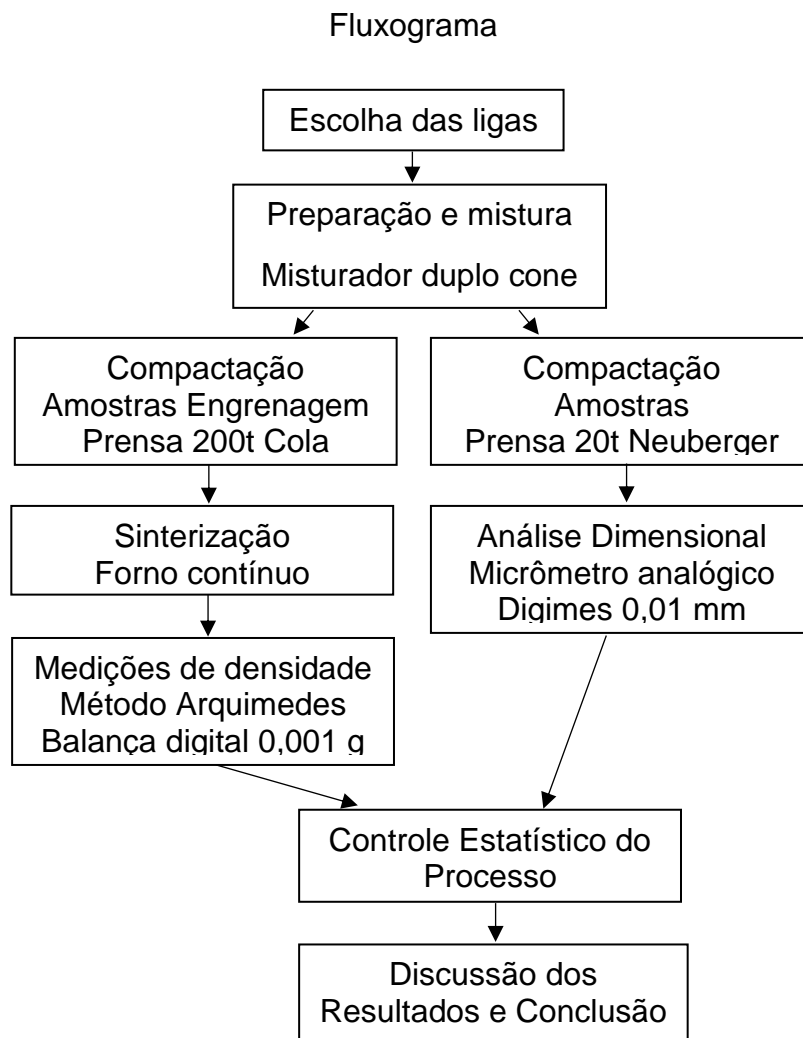


Figura 17 – Fluxograma do processo

### 3.1.1 Equipamentos Utilizados

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) Balança eletrônica Gehaka 0,001 g;
- b) Micrômetro analógico Digimes 0,01 mm;
- c) Misturador de pó duplo cone;
- d) Prensa excêntrica Neuberger 20t;
- e) Prensa hidráulica Ciola 200t;
- f) Forno elétrico contínuo – três zonas de aquecimento.

### 3.2 Dados do produto e processo de fabricação

#### 3.2.1 Peça “chapa”

A peça “chapa” foi produzida a partir do pó de ferro AHC 100.29 (ANEXO A), produzido pela Hogan do Brasil. Para a formação da liga Fe-3Cu-0,5 grafite utilizou-se cobre eletrolítico -200mesh, produzido pela Brasec, e grafite UF4 (ANEXO B). As medições de espessura foram realizadas utilizando-se um micrômetro analógico Digimes, precisão 0,01mm. A Figura 18 mostra a peça “chapa”



Figura 18 – Peça “chapa” compactada.

As peças foram compactadas em uma prensa mecânica automática marca Neuberger 200kN de força, em uma matriz de aço ferramenta, até densidades em torno de  $6,7 \text{ g/cm}^3$  (densidade verde). O objetivo deste trabalho, para esta peça, é o controle dimensional na compactação, onde ocorre o problema das variações das medidas de altura no sentido da aplicação da força. O estudo desta peça, após a sinterização, não foi levado em conta, já que esta etapa está sob controle. A Figura

19 mostra um desenho com as dimensões. A dimensão em estudo é a espessura da peça que indica 3,6mm com variação dimensional permitida de 0,1mm.

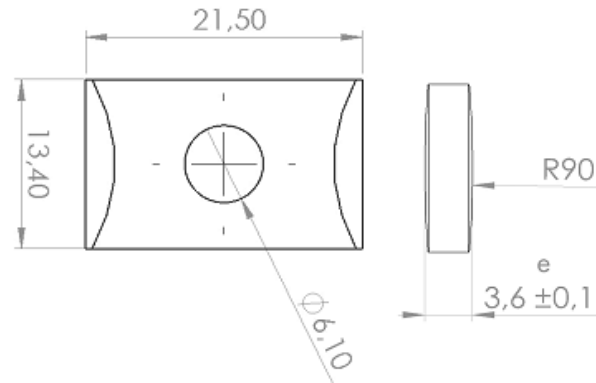


Figura 19 – Peça “chapa”, apresentando suas dimensões.

### 3.2.2 Peça “braço da ponteira”

A peça “braço da ponteira” foi produzida para a Werkschott (equipamentos pneumáticos). A Figura 20 mostra a imagem em 3D da peça.



Figura 20 – Peça “braço da ponteira” compactada.

A liga utilizada para a fabricação da peça “braço da ponteira” foi Fe-3Cu-0,5 grafite. A densidade compactada (densidade verde) ficou em torno de  $6,8 \text{ g/cm}^3$  e as peças foram compactadas em uma prensa Neuberger 200kN de força. A Figura 21 mostra um desenho da peça com suas dimensões.

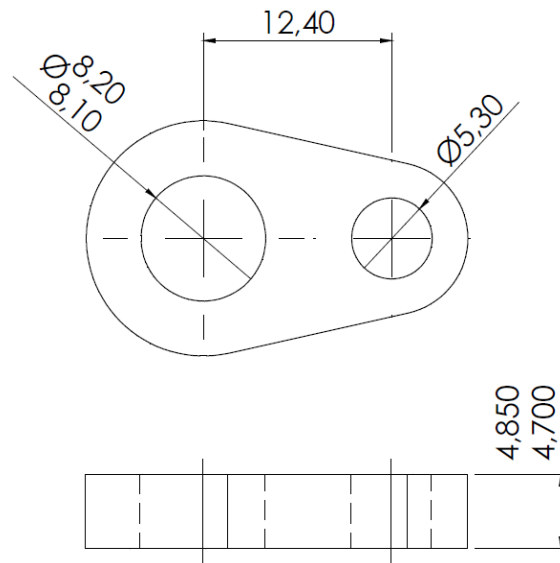


Figura 21 – Peça “braço da ponteira”, apresentando suas dimensões.

### 3.2.3 Peça “gatilho Baldan”

A peça “gatilho Baldan” foi produzida a partir do pó de ferro AHC 100.29 (ANEXO A) com adição de 0,5% de grafite, isto é, foi utilizada a liga Fe-0,5 grafite. A Figura 22, mostra desenho em 3D da peça.



Figura 22 –Peça “gatilho Baldan” em 3D.

As peças foram compactadas em uma prensa mecânica automática marca Neuberger 200kN de força, em uma matriz de aço ferramenta, com densidades entre  $6,4$  e  $6,5 \text{ g/cm}^3$ .

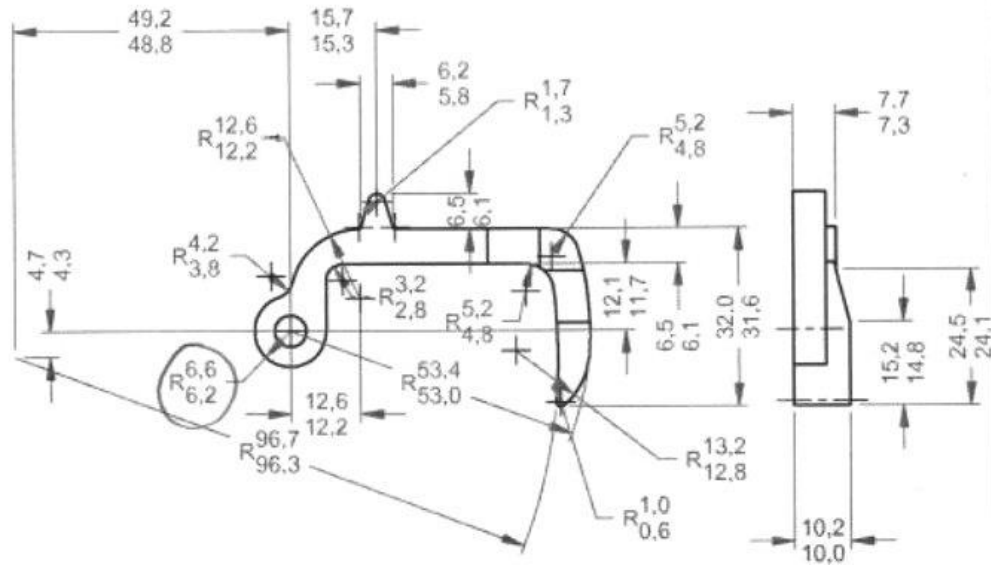


Figura 23 –Peça “gatilho Baldan” e suas dimensões.

A Figura 24 mostra o dispositivo que dosa a semente no plantio. Observam-se os dois gatilhos que são responsáveis pela liberação da semente.

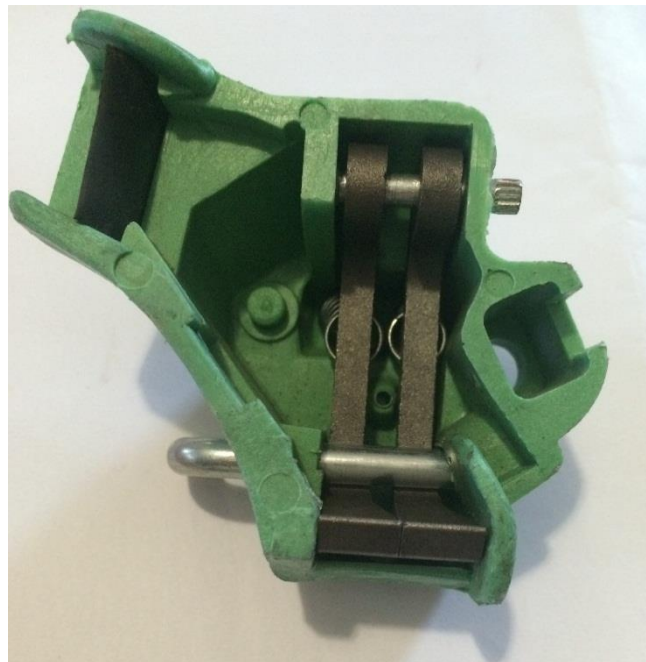


Figura 24 – Dispositivo dosador da semente no plantio.

### 3.2.4 Peça “engrenagem de dente inclinado”

A fabricação de engrenagens de dentes inclinados utilizando-se o processo de Metalurgia do Pó tem sido um desafio quando produzidas em prensas com apenas um movimento no punção superior e um movimento no punção inferior (ação simples). Foram feitas medições de densidades nos dentes separadamente para verificar a variação e se alcançaram a densidade pretendida ( $6,4$  a  $6,6\text{g/cm}^3$ ). A Figura 25 mostra a imagem em 3D da engrenagem.



Figura 25 – Peça “Engrenagem de dente inclinado”.

Este estudo refere-se ao desenvolvimento de uma engrenagem sinterizada de dentes inclinados utilizada em máquina agrícola de plantio. A liga utilizada foi Fe-2Cu-0,4 grafite. Foram utilizados os seguintes procedimentos:

As peças foram compactadas em matriz de aço ferramenta, até a densidade de aproximadamente de  $6,6\text{g/cm}^3$ , em uma prensa hidráulica de 200 kN, marca Ciola.

A sinterização foi feita em forno contínuo, com atmosfera  $80\text{N}_2-20\text{H}_2$ , nas seguintes condições de tempo e temperatura:

$500^\circ\text{C}$  – 30 minutos /  $900^\circ\text{C}$  – 30 minutos /  $1100^\circ\text{C}$  – 30 minutos

Esfriamento lento – 3h até a temperatura ambiente

A Figura 26 mostra o desenho esquemático da engrenagem.

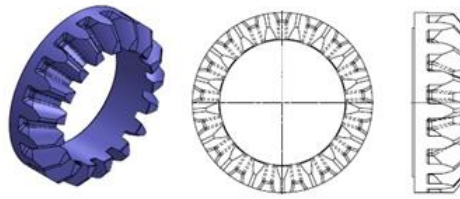


Figura 26 – Peça “Engrenagem de dente inclinado”.

A Figura 27 mostra o desenho do punção superior:

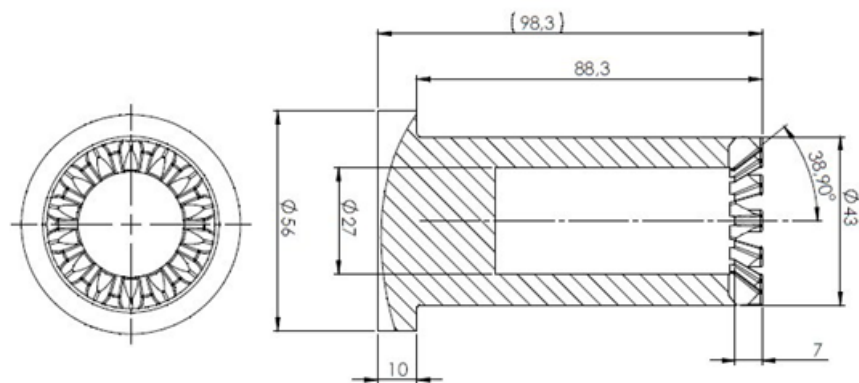


Figura 27 – Desenho técnico do punção superior da matriz da engrenagem de dente inclinado.

A Figura 28 mostra a imagem do punção superior:

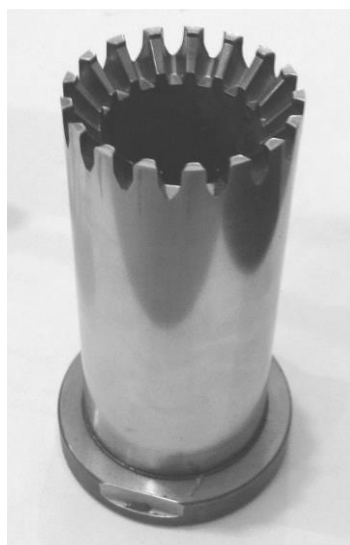


Figura 28 – Imagem do punção que compõe a ferramenta de compactação da engrenagem de dente inclinado.



## 4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

### 4.1 Análise da variação dimensional após compactação

#### 4.1.1 Peça “chapa”

Com o objetivo de melhorar o controle do processo produtivo de peças compactadas da Metalurgia do Pó, foram coletados os dados da peça “chapa” antes da sinterização (peças verdes). O que motivou esta análise foi a dificuldade de controle da espessura ( $e = 3,6\text{mm}$ ), dentro da tolerância especificada ( $\pm 0,1\text{mm}$ ) pelo cliente, durante a compactação, conforme mostra o desenho da Figura 19. A Tabela 1 mostra as espessuras ( $e$ ) medidas em uma amostragem de 30 peças. E a Tabela 2 mostra, para cada faixa de dimensão, a quantidade de amostras ou sua distribuição.

Tabela 1 – Medição das espessuras,  $e$ , de um lote de peças compactadas.

Amostra	Espessura, $e$ (mm)	Amostra	Espessura, $e$ (mm)	Amostra	Espessura, $e$ (mm)
1	3,68	11	3,7	21	3,72
2	3,7	12	3,83	22	3,59
3	3,74	13	3,65	23	3,64
4	3,56	14	3,47	24	3,61
5	3,67	15	3,46	25	3,57
6	3,6	16	3,56	26	3,62
7	3,92	17	3,61	27	3,75
8	3,73	18	3,76	28	3,74
9	3,66	19	3,69	29	3,59
10	3,57	20	3,77	30	3,75

Tabela 2 – Distribuição das espessuras de acordo com as faixas dimensionais, isto é, considerando cada intervalo de 0,05mm.

Espessura da peça, e (mm)	Número de amostras
3,40 a 3,45	0
3,45 a 3,50	2
3,50 a 3,55	0
3,55 a 3,60	7
3,60 a 3,65	5
3,65 a 3,70	6
3,70 a 3,75	6
3,75 a 3,80	2
3,80 a 3,85	1
3,85 a 3,90	0
3,90 a 3,95	1

O gráfico da Figura 29 mostra a variação da espessura, e, com o número de amostras referente à Tabela 2.

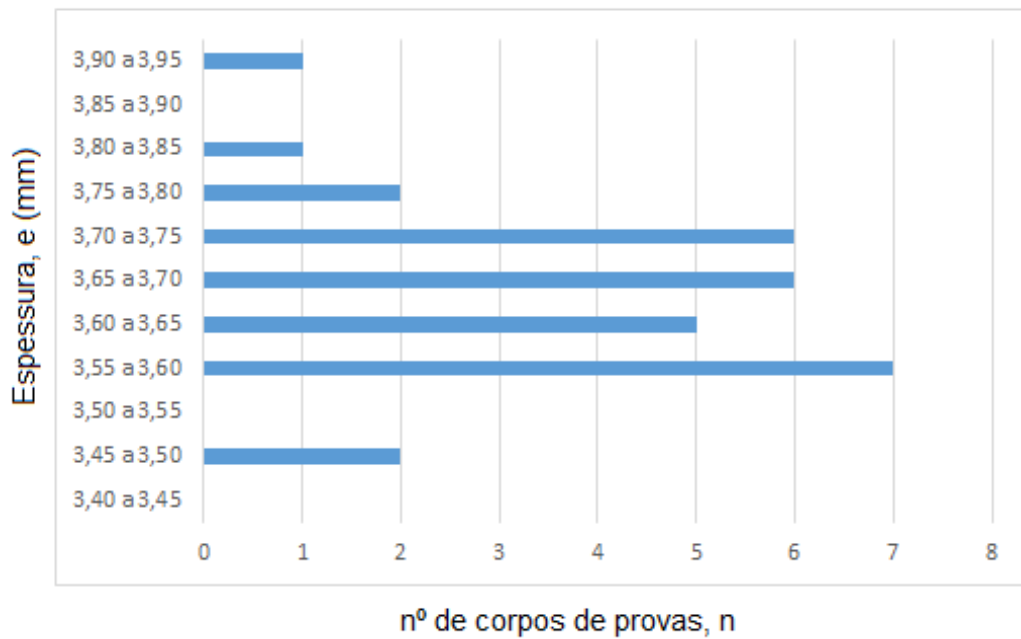


Figura 29 – Representação da distribuição das espessuras em função do número de corpos de prova da peça “chapa”.

#### 4.1.2 Peça “braço da ponteira”

A Tabela 3 mostra os dados coletados (medição da espessura) de uma amostragem de 30 peças. A Tabela 4 mostra para cada faixa de dimensão a quantidade de amostras encontradas. E a Figura 30 mostra o gráfico representativo da distribuição. As medições foram realizadas nas dependências da Aron Metal Ltda. Foi utilizado um micrômetro analógico Digimes, precisão +/- 0,01mm.

Tabela 3 – Medição das espessuras, e, de um lote de peças compactadas.

Amostra	Espessura, e (mm)	Amostra	Espessura, e (mm)	Amostra	Espessura, e (mm)
1	4,87	11	4,8	21	4,75
2	4,72	12	4,85	22	4,76
3	4,72	13	4,76	23	4,73
4	4,75	14	4,73	24	4,75
5	4,71	15	4,68	25	4,71
6	4,78	16	4,77	26	4,74
7	4,79	17	4,83	27	4,74
8	4,75	18	4,81	28	4,72
9	4,73	19	4,72	29	4,75
10	4,81	20	4,76	30	4,71

Tabela 4 – Distribuição das espessuras de acordo com as faixas dimensionais.

Espessura da peça, e (mm)	Número de amostras
4,65 a 4,70	1
4,70 a 4,75	17
4,75 a 4,80	7
4,80 a 4,85	4
4,85 a 4,90	1

O gráfico da Figura 30 mostra a variação da espessura com o número de amostras referente à Tabela 4.

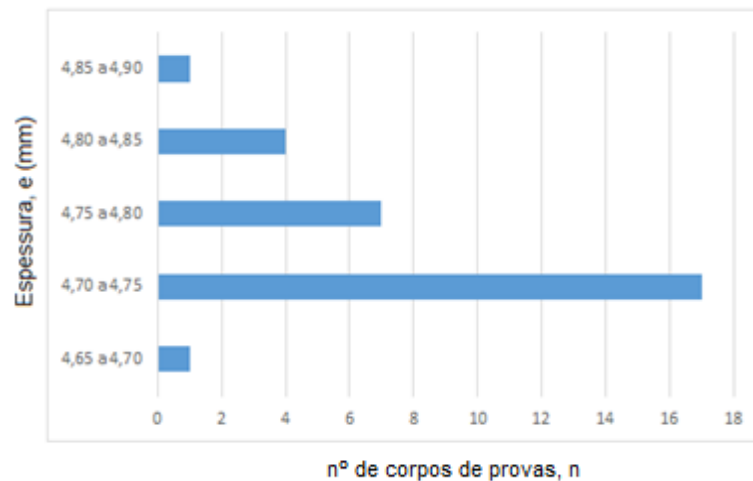


Figura 30 – Representação da distribuição das espessuras em função do número de corpos de prova da peça “braço da ponteira”.

#### 4.1.3 Peça “gatilho baldan”

Devido aos desvios que foram observados nesta peça, foram tomadas medidas das alturas da peça durante o processo de compactação. A Tabela 5 mostra as medições tomadas para 10 peças em sequência, e novamente 10 peças 30 minutos depois. Foi utilizado um micrômetro analógico Digimes, precisão  $\pm 0,01\text{mm}$ .

A Figura 31 mostra o gráfico representativo da distribuição.

Tabela 5 – Medição das espessuras, e, de um lote de peças compactadas.

Amostra	Espessura, e (mm)	Amostra	Espessura, e (mm)
1	10,2	11	10,04
2	10,15	12	10,03
3	10,05	13	10
4	10,1	14	9,99
5	10,1	15	10
6	10,1	16	10,02
7	10,1	17	10
8	10,12	18	10,04
9	10,09	19	10,02
10	10,1	20	10

Tabela 6 – Distribuição das espessuras de acordo com as faixas dimensionais.

Espessura da peça, e (mm)	Número de amostras
9,98 a 10	5
10 a 10,02	2
10,02 a 10,04	3
10,04 a 10,06	1
10,06 a 10,08	0
10,08 a 10,10	6
10,10 a 10,12	1
10,12 a 10,14	0
10,14 a 10,16	1
10,16 a 10,18	0
10,18 a 10,20	1

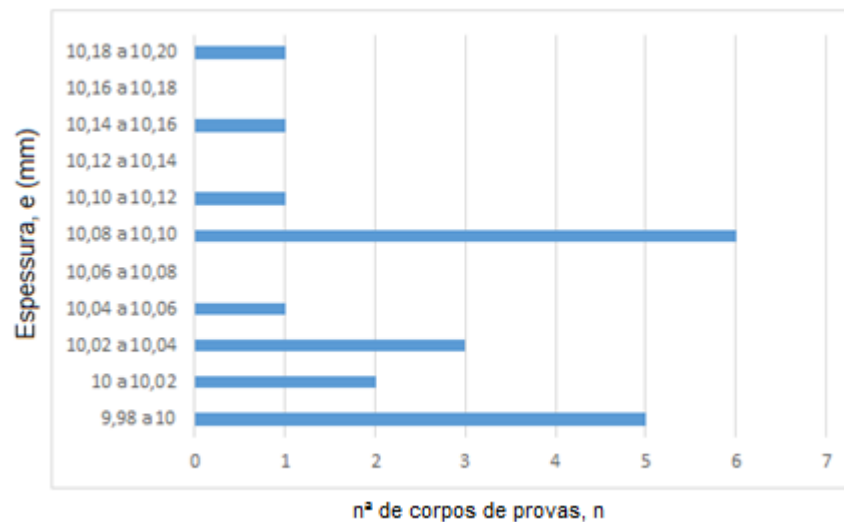


Figura 31– Representação da distribuição das espessuras em função do número de corpos de prova da peça “gatilho baldan”.

#### 4.1.4 Peça “engrenagem de dente inclinado”

Foram analisados 20 pedaços de 3 engrenagens para verificar a variação de densidade em cada dente da engrenagem. As medições foram realizadas utilizando-se o princípio de Arquimedes, e uma balança eletrônica analítica marca Gehaka de precisão de 0,001g.

Os resultados encontram-se na Tabela 7:

Tabela 7 – Valores de densidade em cada pedaço de engrenagem.

Nº de amostras	Massa (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	2,542	0,363	7,00
2	2,191	0,303	7,23
3	2,27	0,317	7,16
4	2,518	0,353	7,13
5	2,366	0,333	7,10
6	2,376	0,338	7,02
7	2,288	0,322	7,10
8	2,051	0,28	7,32
9	2,025	0,282	7,18
10	2,766	0,39	7,09
11	2,11	0,294	7,17
12	2,401	0,333	7,21
13	1,785	0,247	7,22
14	2,382	0,335	7,11
15	2,469	0,344	7,17
16	2,231	0,312	7,15
17	1,98	0,28	7,07
18	2,511	0,353	7,11
19	2,66	0,375	7,09
20	2,271	0,318	7,14

Tabela 8 – Distribuição das densidades de cada amostra.

Densidade da peça, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Número de amostras
6,95 a 7	1
7 a 7,05	1
7,05 a 7,10	5
7,10 a 7,15	5
7,15 a 7,20	4
7,20 a 7,25	3
7,25 a 7,30	0
7,30 a 7,35	1

O gráfico da Figura 32 mostra a variação da densidade com o número de amostras referente à Tabela 8:

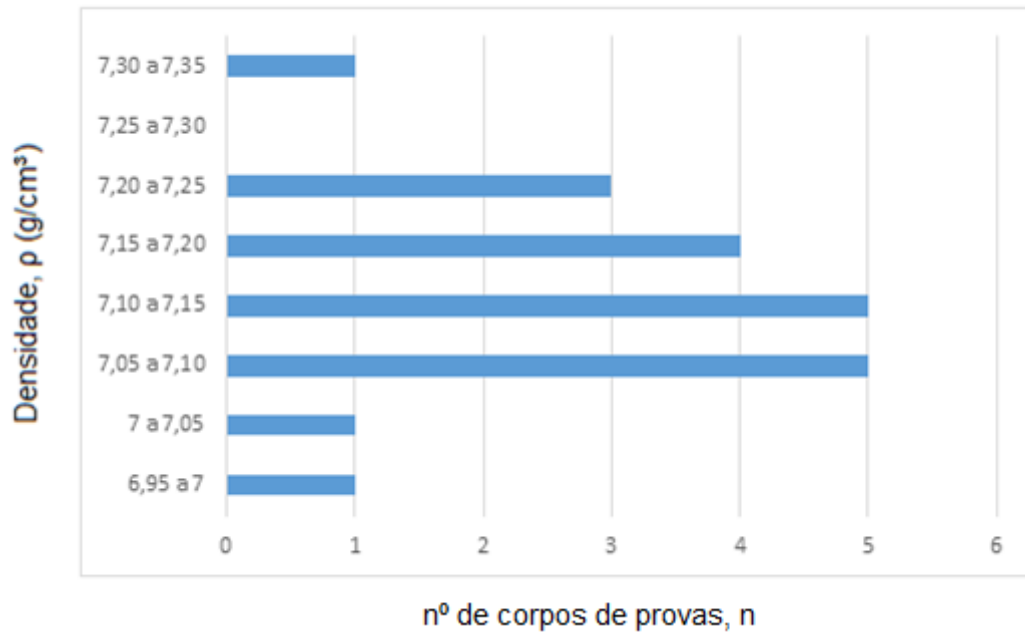


Figura 32 – Representação da distribuição da densidade em função do número de corpos de prova da peça “engrenagem de dente inclinado”.

A Tabela 9 mostra as medidas de posição e dispersão das peças:

Tabela 9 – Medidas de parâmetro de CEP das amostras.

peças medidas	Chapa	Braço da ponteira	Gatilho baldan	Engrenagem de dente inclinado
Média amostral ( $\bar{X}$ )	3,66366667	4,756666667	10,0625	7,1385
Variância ( $S^2$ )	0,010106782	0,001967816	0,003388158	0,005508158
Desvio padrão (S)	0,10053249	0,044360073	0,058207885	0,074216965
Amplitude total (R)	0,46	0,19	0,21	0,32

#### 4.2 Gráficos de controle das peças

Conforme visto anteriormente, para a construção da carta de controle segue-se o mesmo procedimento, determinando-se Limite Superior de Controle, Limite Inferior de Controle e Limite Central:

#### 4.2.1 Gráfico de Controle da Peça “chapa”

A seguir são apresentados os cálculos do Limite Superior de Controle (LSC), Limite Inferior de Controle (LIC) e valor do Limite Central (LC), conforme as equações apresentadas no final da seção 2.2.5:

$$\text{LSC} = \mu + 3\sigma$$

$$\text{LIC} = \mu - 3\sigma$$

$$\text{LC} = \mu$$

Para o cálculo do LSC e do LIC, primeiro calcula-se  $\mu$  (média populacional) e  $\sigma$  (desvio-padrão populacional). Tomando-se a equação 2

$$\mu = (\sum X)/N \quad (\text{eq. 2})$$

onde o  $\sum X$  é o somatório das medidas de todas as amostras e N é o número de amostras, conforme a tabela 1. Então,

$$\mu = 109,91/30 = 3,663$$

Tomando-se a equação 6

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \mu)^2}{N}} \quad (\text{eq. 6})$$

E considerando-se os dados da tabela 1, tem-se

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_1 - \mu)^2 + (X_2 - \mu)^2 + (X_3 - \mu)^2 + \dots + (X_{30} - \mu)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(3,68 - 3,663)^2 + (3,7 - 3,663)^2 + (3,74 - 3,663)^2 + \dots + (3,75 - 3,663)^2}{30}}$$

$$\sigma = 0,098$$



Assim, o cálculo de LSC, substituindo os valores de  $\mu$  e  $\sigma$ , fica como segue:

$$\text{LSC} = 3,663666667 + 3 \times 0,098842748 = 3,96$$

O cálculo de LIC:

$$\text{LIC} = 3,663666667 - 3 \times 0,098842748 = 3,36$$

E a Linha Central (LC):

$$\text{LC} = 3,663$$

O gráfico da Figura 33 traz as medições das 30 amostras da peça “chapa”, onde se tem Limite Superior de Controle (LSC) igual a 3,96 mm, Limite Inferior de Controle (LIC) igual a 3,36 mm e média (LC) igual a 3,663 mm.

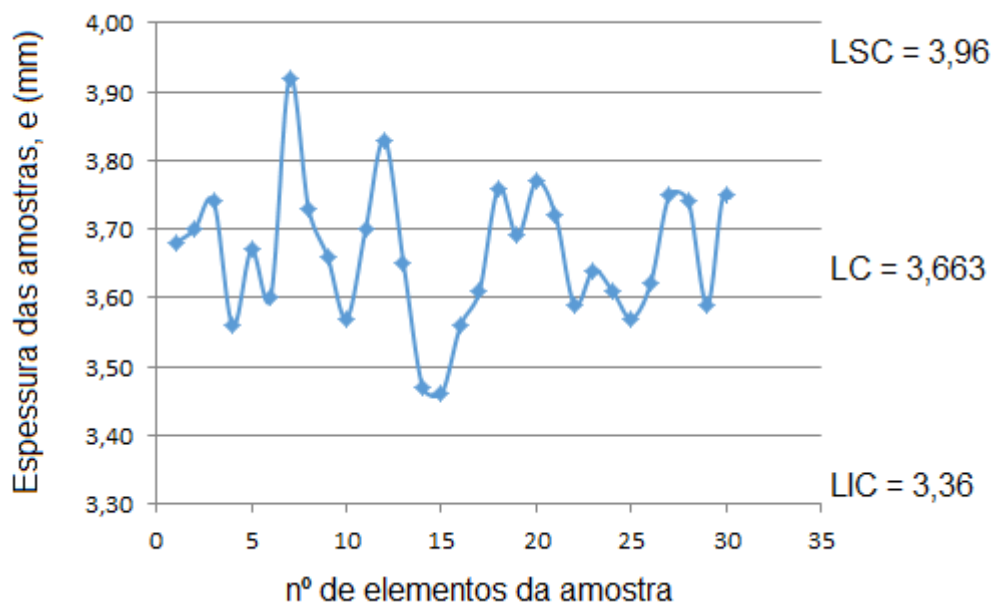


Figura 33 – Gráfico de controle – Distribuição normal.  
Grupo de 30 amostras – peça “chapa”

A seguir são apresentados os cálculos do índice de capacidade potencial do processo ( $C_p$ ) e do índice de desempenho do processo ( $C_{pk}$ ) conforme as equações apresentadas na seção 2.2.6:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6 \hat{\sigma}}$$

$$C_{pk} = \text{MIN} \left( \frac{LSE - \bar{X}}{3 \hat{\sigma}}, \frac{\bar{X} - LIE}{3 \hat{\sigma}} \right)$$

Sabendo-se que  $\hat{\sigma}$  (desvio padrão estimado) é igual a S (desvio padrão amostral),  $\bar{X}$  (média do processo) é igual a  $\bar{X}$  (média amostral), LSE (Limite superior de especificação) e LIE (limite inferior de especificação) são os limites especificados pelos clientes, o cálculo do  $C_p$  fica como segue:

$$C_p = \frac{3,7 - 3,5}{6 * 0,10053249}$$

$$C_p = \frac{0,2}{0,60319494}$$

$$C_p = 0,33156$$

E o cálculo do  $C_{pk}$ :

$\frac{3,7 - 3,66366667}{3 * 0,10053249}$ $\frac{0,03633333}{0,30159747}$ $= 0,120469$	$\frac{3,66366667 - 3,5}{3 * 0,10053249}$ $\frac{0,16366667}{0,30159747}$ $= 0,54266$
--	---

Valor mínimo = 0,120469

$$C_{pk} = 0,120469$$

#### 4.2.2 Gráfico de Controle da Peça “braço da ponteira”

A seguir são apresentados os cálculos do Limite Superior de Controle (LSC), Limite Inferior de Controle (LIC) e valor do Limite Central (LC), conforme as equações apresentadas no final da seção 2.2.5:

$$\text{LSC} = \mu + 3\sigma$$

$$\text{LIC} = \mu - 3\sigma$$

$$\text{LC} = \mu$$

Para o cálculo do LSC e do LIC, primeiro calcula-se  $\mu$  (média populacional) e  $\sigma$  (desvio-padrão populacional). Tomando-se a equação 2

$$\mu = (\sum X)/N$$

onde o  $\sum X$  é o somatório das medidas de todas as amostras e  $N$  é o número de amostras, conforme a tabela 3. Então,

$$\mu = 142,70/30 = 4,756$$

Tomando-se a equação 6

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \mu)^2}{N}}$$

e considerando-se os dados da tabela 3, tem-se

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_1 - \mu)^2 + (X_2 - \mu)^2 + (X_3 - \mu)^2 + \dots + (X_{30} - \mu)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(4,87 - 4,756)^2 + (4,72 - 4,756)^2 + (4,72 - 4,756)^2 + \dots + (4,71 - 4,756)^2}{30}}$$

$$\sigma = 0,043$$

Assim, o cálculo de LSC, substituindo os valores de  $\mu$  e  $\sigma$ , fica como segue:

$$\text{LSC} = 4,756666667 + 3 \times 0,043614473 = 4,88$$

O cálculo de LIC:

$$\text{LIC} = 4,756666667 - 3 \times 0,043614473 = 4,62$$

E a Linha Central (LC):

$$\text{LC} = 4,756$$

Na Figura 34 o gráfico traz as medições das 30 amostras da peça “braço da ponteira”, onde se tem Limite Superior de Controle (LSC) igual a 4,88 mm, Limite Inferior de Controle (LIC) igual a 4,62 mm e média (LC) igual a 4,756 mm.

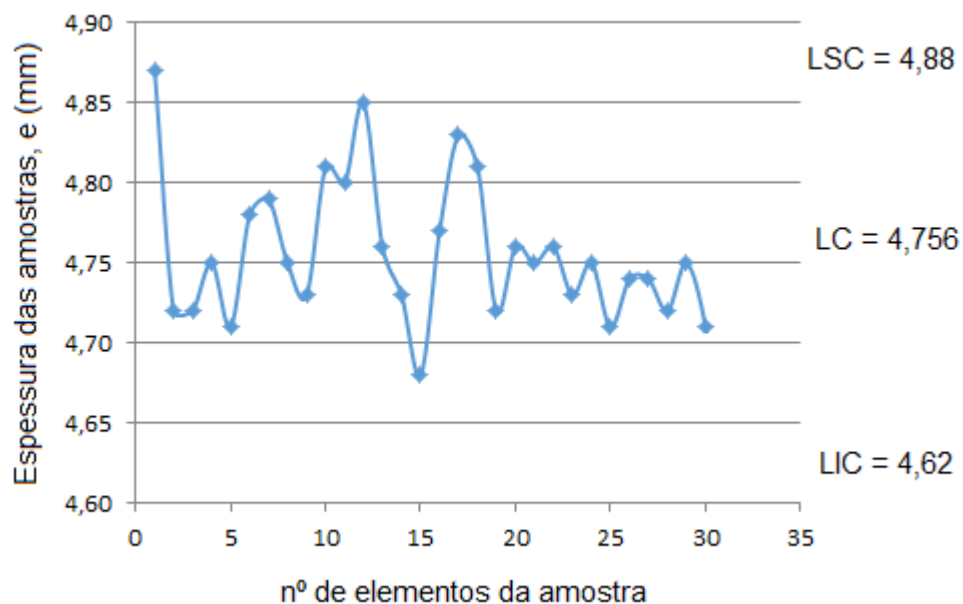


Figura 34 – Gráfico de controle – Distribuição normal.  
Grupo de 30 amostras – peça “braço da ponteira”.

A seguir são apresentados os cálculos do índice de capacidade potencial do processo (Cp) e do índice de desempenho do processo (Cpk) conforme as equações apresentadas na seção 2.2.6:

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6 \hat{\sigma}}$$

$$Cpk = \text{MIN} \left( \frac{LSE - \bar{X}}{3 \hat{\sigma}}, \frac{\bar{X} - LIE}{3 \hat{\sigma}} \right)$$

Sabendo-se que  $\hat{\sigma}$  (desvio padrão estimado) é igual a S (desvio padrão amostral),  $\bar{X}$  (média do processo) é igual a  $\bar{X}$  (média amostral), LSE (Limite superior de especificação) e LIE (limite inferior de especificação) são os limites especificados pelos clientes, o cálculo do Cp fica como segue:

$$Cp = \frac{4,85 - 4,70}{6 * 0,044360073}$$

$$Cp = \frac{0,15}{0,266160438}$$

$$Cp = 0,563569$$

E o cálculo do Cpk:

$\frac{4,85 - 4,756666667}{3 * 0,044360073}$ $= \frac{0,093333333}{0,133080219}$ $= 0,7013313$	$\frac{4,756666667 - 4,70}{3 * 0,044360073}$ $= \frac{0,056666667}{0,133080219}$ $= 0,4258$
--	---

Valor mínimo = 0,4258

Cpk = 0,4258

#### 4.2.3 Gráfico de Controle da Peça “gatilho baldan”

A seguir são apresentados os cálculos do Limite Superior de Controle (LSC), Limite Inferior de Controle (LIC) e valor do Limite Central (LC), conforme as equações apresentadas no final da seção 2.2.5:

$$\text{LSC} = \mu + 3\sigma$$

$$\text{LIC} = \mu - 3\sigma$$

$$\text{LC} = \mu$$

Para o cálculo do LSC e do LIC, primeiro calcula-se  $\mu$  (média populacional) e  $\sigma$  (desvio-padrão populacional). Tomando-se a equação 2

$$\mu = (\sum X)/N$$

onde o  $\sum X$  é o somatório das medidas de todas as amostras e  $N$  é o número de amostras, conforme a tabela 5. Então,

$$\mu = 201,25/20 = 10,0625$$

Tomando-se a equação 6

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \mu)^2}{N}}$$

e considerando-se os dados da tabela 5, tem-se

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_1 - \mu)^2 + (X_2 - \mu)^2 + (X_3 - \mu)^2 + \dots + (X_{20} - \mu)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(10,2 - 10,0625)^2 + (10,15 - 10,0625)^2 + (10,05 - 10,0625)^2 + \dots + (10 - 10,0625)^2}{20}}$$

$$\sigma = 0,567$$

Assim, o cálculo de LSC, substituindo os valores de  $\mu$  e  $\sigma$ , fica como segue:

$$\text{LSC} = 10,0625 + 3 \times 0,056734029 = 10,23$$

O cálculo de LIC:

$$\text{LIC} = 10,0625 - 3 \times 0,056734029 = 9,89$$

E a Linha Central (LC)

$$\text{LC} = 10,0625$$

Na Figura 35 o gráfico traz as medições das 20 amostras da peça "gatilho baldan", onde se tem Limite Superior de Controle (LSC) igual a 10,23 mm, Limite Inferior de Controle (LIC) igual a 9,89 mm e média (LC) igual a 10,0625 mm.

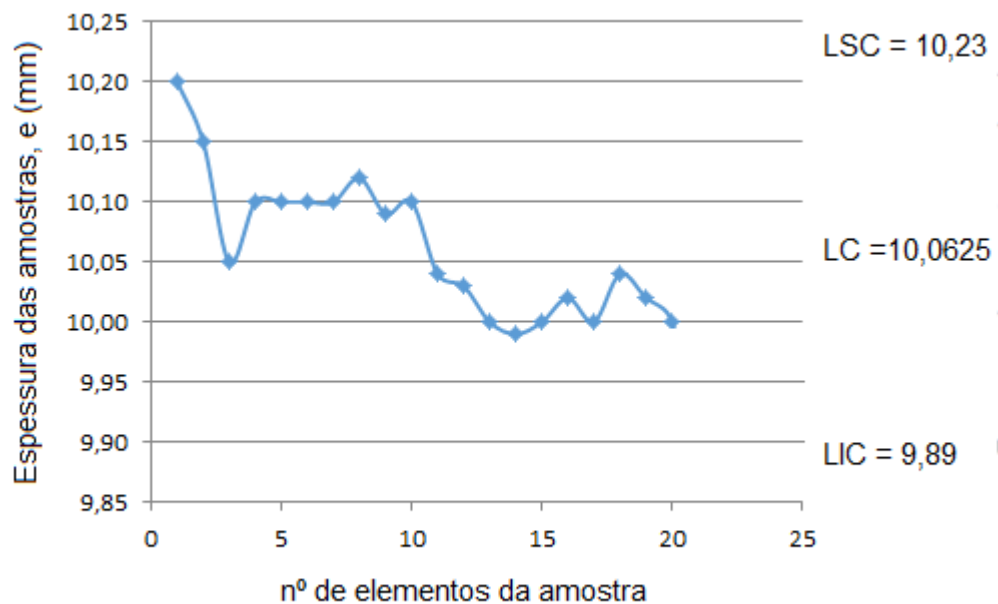


Figura 35 – Gráfico de controle – Distribuição normal.  
Grupo de 20 amostras – peça "gatilho baldan"

A seguir são apresentados os cálculos do índice de capacidade potencial do processo (Cp) e do índice de desempenho do processo (Cpk) conforme as equações apresentadas na seção 2.2.6:

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6 \hat{\sigma}}$$

$$Cpk = \text{MIN} \left( \frac{LSE - \bar{X}}{3 \hat{\sigma}}, \frac{\bar{X} - LIE}{3 \hat{\sigma}} \right)$$

Sabendo-se que  $\hat{\sigma}$  (desvio padrão estimado) é igual a S (desvio padrão amostral),  $\bar{X}$  (média do processo) é igual a  $\bar{X}$  (média amostral), LSE (Limite superior de especificação) e LIE (limite inferior de especificação) são os limites especificados pelos clientes, o cálculo do Cp fica como segue:

$$Cp = \frac{10,20 - 10}{6 * 0,058207885}$$

$$Cp = \frac{0,2}{0,34924731}$$

$$Cp = 0,5724961$$

E o cálculo do Cpk:

$\frac{10,20 - 10,0625}{3 * 0,058207885}$ $= \frac{0,1375}{0,174623655}$ $= 0,7874076$	$\frac{10,0625 - 10}{3 * 0,058207885}$ $= \frac{0,0625}{0,174623655}$ $= 0,35791$
--	---

Valor mínimo = 0,35791

Cpk = 0,35791



#### 4.2.4 Gráfico de Controle da Peça “engrenagem de dente inclinado”

A seguir são apresentados os cálculos do Limite Superior de Controle (LSC), Limite Inferior de Controle (LIC) e valor do Limite Central (LC), conforme as equações apresentadas no final da seção 2.2.5:

$$\text{LSC} = \mu + 3\sigma$$

$$\text{LIC} = \mu - 3\sigma$$

$$\text{LC} = \mu$$

Para o cálculo do LSC e do LIC, primeiro calcula-se  $\mu$  (média populacional) e  $\sigma$  (desvio-padrão populacional). Tomando-se a equação 2

$$\mu = (\sum X)/N$$

onde o  $\sum X$  é o somatório das medidas de todas as amostras e  $N$  é o número de amostras, conforme a tabela 7. Então,

$$\mu = 142,77/20 = 7,138$$

Tomando-se a equação 6

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \mu)^2}{N}}$$

e considerando-se os dados da tabela 7, tem-se

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_1 - \mu)^2 + (X_2 - \mu)^2 + (X_3 - \mu)^2 + \dots + (X_{20} - \mu)^2}{N}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(7-7,138)^2 + (7,23-7,138)^2 + (7,16-7,138)^2 + \dots + (7,14-7,138)^2}{20}}$$

$$\sigma = 0,072$$

Assim, o cálculo de LSC, substituindo os valores de  $\mu$  e  $\sigma$ , fica como segue:

$$LSC = 7,138 + 3 \times 0,072337749 = 7,35$$

O cálculo de LIC:

$$LIC = 7,138 - 3 \times 0,072337749 = 6,92$$

E a Linha Central (LC):

$$LC = 7,138$$

Na Figura 36 o gráfico traz as medições das 20 amostras da peça "engrenagem de dente inclinado", onde se tem Limite Superior de Controle (LSC) igual a 7,35 mm, Limite Inferior de Controle (LIC) igual a 6,92 mm e média (LC) igual a 7,138mm.

Na Figura 32 pode-se observar a variação de densidade em cada dente. As variações foram de 7,00 a 7,32 g/cm<sup>3</sup>. O objetivo é garantir que no decorrer do processo de compactação não ocorram variações de densidade abaixo de 6,6 g/cm<sup>3</sup> para não comprometer a resistência do dente.

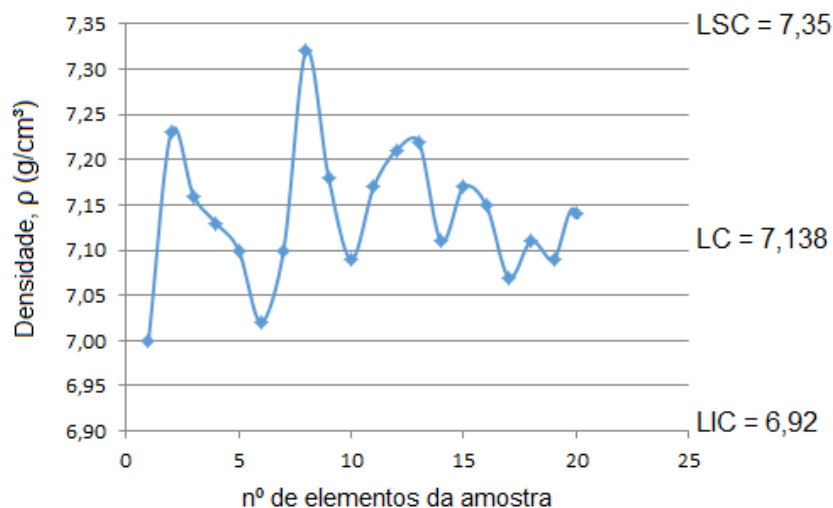


Figura 36 – Gráfico de controle – Distribuição normal.  
Grupo de 20 amostras – peça "engrenagem de dente inclinado"

A Figura 37 mostra a peça cortada em eletro erosão a fio em duas partes: a) parte inferior; b) parte superior referente aos dentes. Verificou-se na parte inferior a densidade de 7,03 e na parte superior dos dentes 6,81g/cm<sup>3</sup>.



Figura 37 – Engrenagem em corte radial.

A seguir são apresentados os cálculos do índice de capacidade potencial do processo ( $C_p$ ) e do índice de desempenho do processo ( $C_{pk}$ ) conforme as equações apresentadas na seção 2.2.6:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6 \hat{\sigma}}$$

$$C_{pk} = \text{MIN} \left( \frac{LSE - \bar{\bar{X}}}{3 \hat{\sigma}}, \frac{\bar{\bar{X}} - LIE}{3 \hat{\sigma}} \right)$$

Sabendo-se que  $\hat{\sigma}$  (desvio padrão estimado) é igual a  $S$ ,  $\bar{\bar{X}}$  (média do processo) é igual a  $\bar{\bar{X}}$  (média amostral), LSE e LIE são os limites especificados pelos clientes. Em virtude de as peças estarem sendo compactadas com valores de densidade muito acima do mínimo exigido no uso da peça, colocou-se um coeficiente de segurança em torno de 6%, ficando a variação de densidade no processo de produção estabelecida para 6,8 a 7,4g/cm<sup>3</sup> de densidade. O cálculo do  $C_p$  fica como segue:

$$C_p = \frac{7,4 - 6,8}{6 * 0,074216965}$$

$$C_p = \frac{0,6}{0,44530179}$$

$$C_p = 1,3474008$$

E o cálculo do Cpk:

$\frac{7,4-7,1385}{3*0,074216965}$ $\frac{0,2615}{0,222650895}$ $=1,1744$	$\frac{7,1385-6,8}{3*0,074216965}$ $\frac{0,3385}{0,222650895}$ $= 1,5203$
---	--

Valor mínimo = 1,1744

Cpk = 1,1744

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 Peça “chapa”

Conforme a Figura 19, as dimensões da peça chapa (espessura, conforme indicado na figura) devem ficar entre 3,5 e 3,7 mm. Isto é, medidas abaixo de 3,5 mm e acima de 3,7 mm são inadequadas para a utilização das peças (espessura = 3,6 +/- 0,1mm). Considerando o intervalo 3,45 a 3,50 mm como adequado, e 3,70 a 3,75 mm também adequado para o produto, de acordo com a Figura 29, observa-se que das 30 peças analisadas nenhuma está abaixo de 3,45 mm, e 4 estão acima de 3,75 mm. Assim, estas peças são consideradas inadequadas para o uso, pois ocorreu uma rejeição de mais de 10% do lote inspecionado. Esta peça não apresentou problemas em relação às outras medidas, pois as mesmas são fixas e estão amarradas às dimensões da cavidade da ferramenta. A necessidade de controle da medida 3,6 mm se deu em virtude da difícil regulagem da altura de enchimento na compactação, e por problemas de precisão na altura de compactação da prensa utilizada.

Mesmo o processo não estando sob controle estatístico, foi feito o estudo de capacidade da peça “chapa”. Primeiramente, foi calculado o Índice de Capacidade Potencial do Processo (Cp). Neste cálculo, foi considerado o desvio padrão estimado ( $\hat{\sigma}$ ) à partir das amostras coletadas no processo produtivo. Feito este controle estatístico, o próximo passo é considerar as tolerâncias exigidas para a funcionalidade da peça.

Assim, tomando-se os dados obtidos do desvio padrão estimado ( $\hat{\sigma}$ ) e das tolerâncias, chegou-se ao Cp. O resultado encontrado foi de 0,33156. Conforme a definição estabelecida no capítulo 2 para o Cp, o processo é considerado:

- aceitável, se estiver entre os valores de 1 e 1,33;
- incapaz, se for menor que 1;
- capaz, se for maior ou igual a 1,33.

Assim, Cp é igual a 0,33156 (menor que 1), portanto, o processo pode ser considerado incapaz.

Como o  $C_p$  não leva em consideração a média amostral ( $\bar{X}$ ), não basta o processo estar dentro da margem de controle, então, calcula-se o Índice de Desempenho do Processo ( $C_{pk}$ ), que leva em consideração a média amostral ( $\bar{X}$ ). Os resultados encontrados para o  $C_{pk}$  foram 0,120469 e 0,354266. Neste caso, se considera para análise de capacidade o valor mínimo, que é igual a 0,120469. Isso significa que, quando os valores da média amostral ( $\bar{X}$ ) se situam exatamente no meio da tolerância, o  $C_{pk}$  tende ao valor do  $C_p$ , isto é,  $C_{pk}=C_p$ .

Conforme a definição estabelecida no capítulo 2 para o  $C_{pk}$ , no caso da peça “chapa”, o processo é considerado incapaz, pois o resultado ( $C_{pk} = 0,120469$ ) é menor do que 1.

## 5.2 Peça “braço da ponteira”

A exemplo da peça “chapa”, a peça “braço da ponteira” não tem problemas em relação as outras dimensões por serem fixas. Somente a espessura pode ser regulada na prensa. Considerando-se a Figura 21, observa-se que o dimensional da espessura pode variar de 4,70 mm a 4,85 mm. Do lote de 30 peças analisadas, duas peças foram encontradas com espessura menor que 4,70 mm (isto é, 4,68 mm – ver tabela 4), e uma peça com espessura maior que 4,85 mm (isto é, 4,87 mm). Isto significa um percentual de 6,6%. Considerando que 0,02 mm abaixo da medida não influencia na montagem da peça na máquina onde é utilizada, tem-se somente 3,3% de peças rejeitadas.

Considerando-se o processo sob controle estatístico, calculou-se a capacidade da peça “braço da ponteira”. Em primeiro lugar, foi calculado o Índice de Capacidade Potencial do Processo ( $C_p$ ).

Dessa forma, através dos dados obtidos do desvio padrão estimado ( $\hat{\sigma}$ ) e das tolerâncias, chegou-se ao  $C_p$ . O resultado encontrado foi de 0,563569 (menor do que 1), ou seja, o processo pode ser considerado incapaz.

Em segundo lugar, considerando-se a média amostral ( $\bar{X}$ ), calculou-se o Índice de Desempenho do Processo ( $C_{pk}$ ). Os resultados encontrados para o  $C_{pk}$  foram

0,7013313 e 0,4258, onde somente o valor mínimo é considerado para a análise de capacidade, no caso, 0,4258.

O processo da peça “braço da ponteira”, é considerado incapaz, pois Cpk é menor do que 1.

### 5.3 Peça “gatilho baldan”

Calculou-se a capacidade da peça “gatilho baldan”, considerando que o processo está sob controle estatístico. Tomando-se os dados obtidos do desvio padrão estimado ( $\hat{\sigma}$ ) e das tolerâncias, encontrou-se  $C_p = 0,5724961$  (menor do que 1). Portanto, de acordo com o  $C_p$ , o processo é considerado incapaz.

Também foi calculado o Cpk da peça “gatilho baldan”, considerando-se a média amostral ( $\bar{X}$ ). Os resultados encontrados para Cpk foram de 0,7874076 e 0,35791. Levado em conta somente o resultado mínimo, Cpk é igual a 0,35791. Isso significa que o processo é incapaz, pois Cpk é menor do que 1.

### 5.4 Peça “engrenagem de dente inclinado”

Como o processo da peça “engrenagem de dente inclinado” está sob controle estatístico, foi feito o estudo de capacidade. Primeiramente, foi calculado o Índice de Capacidade Potencial do Processo ( $C_p$ ), que considera o desvio padrão estimado ( $\hat{\sigma}$ ) e as tolerâncias. O resultado encontrado para  $C_p$  foi de 1,3474008.

No caso da peça “engrenagem de dente inclinado”, de acordo com o  $C_p$ , o processo pode ser considerado capaz, pois  $C_p$  é maior que 1,33.

Após isso, foi feito o cálculo do Cpk, levando em consideração a média amostral ( $\bar{X}$ ). Os resultados obtidos foram de 1,1744 e 1,5203. Considerando-se somente o valor mínimo, que é igual a 1,1744, o processo é considerado aceitável, pois o resultado do Cpk está entre 1 e 1,33.

## 6 CONCLUSÕES

Com base em todos os testes e medições de amostras de quatro peças analisadas neste trabalho, chegam-se as seguintes conclusões:

1. A “peça chapa” não atendeu as especificações do desenho com relação a sua espessura. A prensa utilizada não atende os requisitos de precisão requeridos, pois não se conseguiu uma homogeneidade no enchimento da cavidade da matriz. A montagem da peça chapa no dispositivo, também não atendeu as exigências de controle dimensional do cliente. A rejeição ficou acima de 10%, isto é, medidas abaixo de 3,5mm e acima de 3,7mm, conforme desenho da peça. Em relação aos índices de Cp e Cpk, também ficou caracterizada a incapacidade do processo.
2. A produção da peça “braço da ponteira” mostrou ser viável do ponto de vista do percentual de peças rejeitadas, considerando-se um lote de 30 peças. 3,3% das peças ficaram fora das especificações onde a montagem poderá correr riscos. Neste trabalho não foram analisadas as contra peças, mas sabe-se que existem variações no contra peça, e este percentual de peças com medidas maiores poderão não provocar interferência na montagem. Apesar de as peças não atenderem às exigências segundo os índices Cp e Cpk, as peças não tiveram problemas quanto à utilização na montagem do equipamento no cliente.
3. A peça “gatilho baldan” ficou totalmente dentro das especificações do desenho, considerando-se um lote de 20 peças examinadas. Isto é, não ocorreram variações fora das medidas máxima e mínima consideradas críticas na peça. Também segundo os índices Cp e Cpk, o processo é considerado incapaz. Mesmo estando, estatisticamente, totalmente dentro das tolerâncias especificadas.
4. A importância dessas medições é que não se podem ter densidades baixas nos dentes. Como a compactação é feita com alturas fixas nos dentes do punção, a tendência é ter densidades mais baixas nos dentes, o que foi comprovado na medição de densidade da parte inferior da engrenagem em relação a parte superior referente aos dentes. Nos testes de resistência realizados não



ocorreram problemas de quebra dos dentes. De acordo com o Cp e Cpk, o processo é considerado aceitável.

## 7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- Aprofundar o conhecimento da ferramenta Controle Estatístico do Processo.
- Buscar outras ferramentas para o controle do processo produtivo.
- Estudar outros tipos de peças, materiais e tratamentos térmicos aplicados às peças.

## REFERÊNCIAS

ABLE, C. M. *et al.* Initial investigation using statistical process control for quality control of accelerator beam steering. *Radiation Oncology*, 2011. Disponível em: <<https://ro-journal.biomedcentral.com/articles/10.1186/1748-717X-6-180>>. Acesso em: 8 agosto 2015.

ASM HANDBOOK: Powder Metallurgy Technologies v. 7, 1990.

ASM HANDBOOK: Powder Metallurgy v. 7, 1990.

AVALE. Letramento Estatístico para Educação Básica. Disponível em: <<http://www.avale.iat.educacao.ba.gov.br>>. Acesso em: 5 junho 2015.

BARBOZA, J. S. Caracterização de compósitos magnéticos macios desenvolvidos através da metalurgia do pó aplicados a núcleos de máquinas elétricas. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2009.

BAYEUX, C. Análise da Capabilidade de Processos. *Revista Banas Qualidade*, n. 108, p. 57-60, maio 2001.

BEHBAHANI, M.; SAGHAEI, A.; NOOROSSANA, R. A case-based reasoning system development for Statistical Process control: Case representation and retrieval. *Computers & Industrial Engineering*, v. 63, n. 4, p. 1107-1117, dezembro 2012.

BERLEMANN, M.; FREESE, J.; KNOTH, S. Eyes Wide Shut? The U.S. House Market Bubble through the Lense of Statistical Process Control, 2012. Disponível em: <[http://macro.soc.uoc.gr/docs/Year/2016/papers/paper\\_1\\_179.pdf](http://macro.soc.uoc.gr/docs/Year/2016/papers/paper_1_179.pdf)>. Acesso em: 9 julho 2015.

BITTENCOURT, S. D. Caracterização de ligas magnéticas sinterizadas para aplicação em núcleos de máquinas elétricas rotativas. 2012. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2012.

BOFFOLI, N.; BALDASSARRE, M. T.; CAIVANO, D. Statistical Process Control for Software, 2010. Disponível em: <<http://www.intechopen.com>>. Acesso em: 7 outubro 2015.

BRAMWELL, D. An introduction to statistical process control in research proteomics. *Journal of Proteomics*, v. 95, p. 3-21, 16 dezembro 2013.

CHIAVERINI, V. Metalurgia do Pó. 3. ed. São Paulo: ABM, 1992.

CORREA, S. M. B. B. Probabilidade e Estatística. 2. ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003. 116 p.

CRISTOFOLINI, R. A.; MENAPACE, C.; MOLINARI, A. Influence of sintering temperature on the shrinkage and geometrical characteristics of steel parts produced by powder metallurgy. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 210, n. 13, p. 1716–1725, 1 outubro 2010.

DAL’CORTIVO, Z. Aplicação do controle estatístico de processo em sequências curtas de produção e análise estatística de processo através do planejamento econômico. 2005. 163 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.

DATALYZER. Disponível em: <<http://www.datalyzer.com.br/site/suporte/administrador/docs/arquivos/doc57/57.html>>. Acesso em: 27 março 2016.

DESIGN NEWS. Disponível em: <[HTTP://www.directory.designnews.com](http://www.directory.designnews.com)>. Acesso em: 12 março 2016.

DINIZ, M. G. Desmistificando o Controle Estatístico de Processo. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2006. 71 p.

DISTRIBUIÇÃO NORMAL. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/thiagoufal/distribuicaonormal?related=2>>. Acesso em: 24 junho 2015.

DOMINGOS, T. A. F. F.; SALGADO, L. Apostila “A Tecnologia do Sinterizado”.

DUDEK-BURLIKOWSKA, M. Using control charts X-R in monitoring a chosen production process. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, v. 49, n. 2, 12 p, dezembro 2011.

DUMIČIĆ, K.; ŽMUK, B. Statistical Control Charts: Performances of Short Term Stock Trading in Croatia. *Business Systems Research*, v. 6, n. 1, p. 22–35, março 2015.

EPMA. Spotlight on PM Case Studies. European Powder Metallurgy Association, 2013.

ESPER, F. J. The Properties of High Strength Ni-Mo-P P/M Steels. Modern developments in powder metallurgy, v. 10, p. 43-52, junho 1976.

ESTATÍSTICA GERAL. Distribuição Normal. Disponível em: <<http://estatisticageral.blogspot.com.br>>. Acesso em: 3 junho 2015.

FARIA, E. P.; ANDRADE, C. C.; SILVA, E. M. O CEP como ferramenta de melhoria de Qualidade e Produtividade nas Organizações, 2014. Disponível em:

<[http://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos08/194\\_evandro%20elvis%20e%20claudia%20-%20CEP.pdf](http://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos08/194_evandro%20elvis%20e%20claudia%20-%20CEP.pdf)>. Acesso em: 23 junho 2014.

FERREIRA, C. A. Desenvolvimento de núcleos para transformadores monofásicos de baixa potência pela metalurgia do pó. 2011. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2011.

GONÇALEZ, P. U.; WERNER, L. Comparação dos Índices de Capacidade do Processo para Distribuições Não-Normais. *Gestão & Produção*, v. 16, n. 1, p. 121-132, 2009.

HOGANAS: Handbook – PM School. (Data desconhecida).

HU, X.; QU, X. An individual-specific fall detection model based on the statistical process control chart. *Safety Science*, v. 64, p. 13-21, abril 2014.

JABUR, A. S. Effect of Powder Metallurgy Conditions on the Properties of Porous Bronze. *Powder Technology*, v. 237, p. 477-483, março 2013.

JAUPI, L.; DURAND, P.; GHORBANZADEH, D. Statistical Process Control Methods for Individual Observations. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, v. 1, 1-3 julho 2015.

KMETEUK FILHO, O. Pesquisa e análise estatística. In: Universidade Luterana do Brasil, Estatística e Pesquisa. Rio de Janeiro: Fundo de cultura, 2005, p. 79-80.

LAOSIRITAWORN, W.; BUNJONGJIT, T. Visual Basic Application for Statistical Process Control: A Case of Metal Frame for Actuator Production Process. *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, v. 3, 17-19 março 2010.

LENEL, F. V. *Powder Metallurgy Principles and Applications*. 1. ed. Princeton: MPIF, 1980, 598p.

LIMA, A. A. N. *et al.* Aplicação do controle estatístico de processo na indústria farmacêutica. *Revista Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada*, v. 27, n. 3, p. 177-187, 2006.

LUANGPAIBOON, P. Weighted Centroid Modified Simplex and Linear Constrained Response Surface Optimization Methods for the Xbar-R Chart Variable Determination. *Journal of Computer Science*, v. 7, n. 6, p. 836-843, 2011.

LUCHESA, C. J.; NETO, A. C. *Cálculo do tamanho da amostra nas pesquisas em Administração*. Curitiba: 2011. 27 p.

LOPES, L. F. D. Apostila de Estatística – UFSM, 2009. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/23835378/4/Parametros-x-Estatisticas>>. Acesso em: 16 junho 2015.

MAGALHÃES, M. S.; NETO, F. D. M. Economic-statistical design of variable parameters non-central chi-square control chart, v. 21, n. 2, p. 259-270, 8 fevereiro 2011.

MAICZUK, J.; ANDRADE JUNIOR, P. P. Aplicação de ferramentas de melhoria de qualidade e produtividade nos processos produtivos: um estudo de caso. *Qualitas Revista Eletrônica*, v. 14, n.1, p. 1-14, 2013.

MARTINS, G. A. Estatística geral e aplicada. In: Universidade Luterana do Brasil, *Estatística e Pesquisa*. Rio de Janeiro: Fundo de cultura, 2005, p. 78.

MATARAGAS, M. *et al.* Integrating statistical process control to monitor and improve carcasses quality in a poultry slaughterhouse implementing a HACCP system. *Food Control*, v. 28, n. 2, p. 205–211, dezembro 2012.

MOHANARAO, O. R. *et al.* Application of Univariate Statistical Process Control Charts for Improvement of Hot Metal Quality - A Case Study. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, v. 3, n. 3, p. 635-641, maio/junho 2013.

MOORE, D. A Estatística básica e sua prática. In: Universidade Luterana do Brasil, *Estatística e Pesquisa*. Rio de Janeiro: Fundo de cultura, 2005, p. 78.

MORAES, C. F.; FERREIRA, J. R.; BALESTRASSI, P. P. Análise crítica da aplicação de métodos estatísticos em processos definidos por dados que não apresentam distribuição normal, 2006. Disponível em: <<http://revista.feb.unesp.br>>. Acesso em: 2 abril 2014.

NUNES NETO, P. A. *et al.* Controle estatístico de processo aplicado ao monitoramento de envase da tintura de iodo. *Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada*, p. 75-81, 2010.

OLIVEIRA, C. C. *et al.* Manual para elaboração de cartas de controle para monitoramento de processos de medição quantitativos em laboratórios de ensaio, 2013. Disponível em: <[http://redsang.ial.sp.gov.br/site/docs\\_leis/pd/pd11.pdf](http://redsang.ial.sp.gov.br/site/docs_leis/pd/pd11.pdf)>. Acesso em: 8 julho 2014.

OLIVEIRA, J. B. *et al.* Tecnológica e Propriedade Intelectual: Desafios da Engenharia de Produção na Consolidação do Brasil no Cenário Econômico Mundial. XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Belo Horizonte, outubro 2011.

PARKASH, V.; KUMAR, D.; RAJORIA, R. Statistical Process Control. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, v. 2, n. 8, p. 70-72, agosto 2013.

POOTS, A. J.; WOODCOCK, T. Statistical Process Control for data without inherent order. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 2012. Disponível em: <<http://bmcmmedinformdecismak.biomedcentral.com/articles/10.1186/1472-6947-12-86>>. Acesso em: 27 abril 2015.

PORTAL ACTION. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br>>. Acesso em: 7 julho 2015.

PRASAD, R. S.; RAO, B. S.; KANTHAM, R. R. L. Monitoring Software Reliability using Statistical Process Control: An MMLE Approach. *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)*, v. 3, n. 5, 7 p., outubro 2011.

RAHMAN, M. N. A. *et al.* Statistical process control: Best practices in small and medium Enterprises. *Journal of Science and Technology*, v. 9, n. 2, p. 193-208, 2015.

RAO, P. S.; RATNAM, C. Health monitoring of welded structures using statistical process control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 27, p. 683–695, fevereiro 2012.

RAVI, S. P.; SUPRIYA, N.; MOHAN, G. K. SPC for Software Reliability: Imperfect Software Debugging Model. 2011. Disponível em: <[www.IJCSI.org](http://www.IJCSI.org)> Acesso em: 10 maio 2015.

ROHANI, J. M.; YUSOF, S. M.; MOHAMAD, I. The Development Of A Survey Instrument For Measuring A Relationship Between Statistical Process Control Success Factors And Performance. *JurnalMekanikal*, n. 30, p. 1-16, junho 2010.

SAMOHYL, R. W. *O Controle Estatístico da Qualidade*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 275p.

SHABBAK, A.; MIDI, H.; HASSAN, M. N. The Performance of Robust Multivariate Statistical Control Charts based on Different Cutoff-points with Sustained Shift in Mean. *Journal of Applied Sciences*, p. 56-65, 2011.

SILVEIRA, F. D. Sinterização de bronze ao alumínio seguido de endurecimento por precipitação através de envelhecimento artificial. 2009. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2009.

SINGH, R.; GILBREATH, G. A real-time information system for multivariate statistical process control. *International Journal of Production Economics*, v. 75, n. 1, p. 161-172, 10 janeiro 2002.

SKULJ G. *et al.* Statistical Process Control as a Service: An Industrial Case Study. *Procedia CIRP*, v.7, p. 401-406, 2013.

SOUZA, L. P. F.; CAMPOS, C. M. M. Evaluation of Turbidity Measuring Instruments Using Statistical Process Control. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 36, n. 4, p. 424-430, julho/agosto 2012.

SÓ MATEMÁTICA. Distribuição Normal. Disponível em: <<http://www.somatematica.com.br>>. Acesso em: 17 setembro 2015.

SRINIVASU, R.; REDDY, G. S.; RIKKULA, S. R. Utility of Quality Control Tools and Statistical Process Control to Improve the Productivity and Quality in an Industry. *International Journal of Reviews in Computing*, 2011. Disponível em: <<http://www.ijric.org/volumes/Vol5/3Vol5.pdf>>. Acesso em: 24 março 2015.

TASDEMIR, A.; KOWALCZUK, P. B. Application of Statistical Process Control for Proper Processing of the Fore-Sudetic Monocline Copper Ore. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2014. Disponível em: <<http://connection.ebscohost.com/c/articles/110572186/application-statistical-process-control-proper-processing-fore-sudetic-monocline-copper-ore>>. Acesso em: 14 maio 2015.

TECSINTER. Sinterizados. Disponível em: <<http://www.tecsinter.com.br>>. Acesso em: 10 agosto 2015.

VIJAYA, G.; ARUMUGAM, S. Monitoring the Stability of the Processes in Defined Level Software Companies Using Control Charts with Three Sigma Limits. *V. 7, n. 10*, p. 1220-1209, outubro 2010.

ULBRA, Universidade Luterana do Brasil. *Estatística e Pesquisa*. Canoas: 2010, 160 p.

WANG, P. *et al.* Machining Error Control by Integrating Multivariate Statistical Process Control and Stream of Variations Methodology. *Chinese Journal of Aeronautics*, v. 25, n. 6, p. 937-947, dezembro 2012.

WESCHENFELDER, F. Eletrodos porosos obtidos através de metalurgia do pó para aplicação em baterias. 2014. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2014.



## ANEXO A – Certificado de análise de pó de ferro AHC 100.29

# Höganäs



## CERTIFICADO DE ANALISE

Pág:  
1(1)

Nome do item  
PO DE FERRO AHC 100.29  
Código Produto  
080073  
PO DE FERRO AHC 100.29  
PO DE FERRO AHC 100.29

Nr lote  
1666626  
Nr pedido  
0010184388

Dt impressão  
2013-09-18  
Entrega  
1476759  
Expedição  
3179220

Cliente  
ARON METAL LTDA  
R. A  
PQ. AGRO  
INDL. IGARA  
CANOAS

21191

Quantidade  
1000,00 Kg

Nossa Referência

Data produção  
2013-07-23

Qtd produzida  
20000 Kg

Dt expiração  
2014-01-18

	Resultados dos Testes		Especificação		ISSUE	ISSUE: 1
	Unid		MIN	MAX		
<b>PROPRIEDADES QUÍMICAS</b>						
C	0.0060	%		0.0240	%	
S	0.013	%		0.030	%	
Oxigênio Total	0.11	%		0.17	%	
P	0.010	%		0.015	%	
Mn	0.12	%		0.15	%	
Si	0.01	%		0.05	%	
<b>PROPRIEDADES FÍSICAS</b>						
Densidade Aparente	3.00	g/cm3	2.90	3.05	g/cm3	
Escoamento	27.2	sec/50g		28.0	sec/50g	
Compressibilidade (600MPa)	7.13	g/cm3	7.09			
<b>GRANULOMETRIA</b>						
(Microns)						
+212	0.0	%				
+180	0.0	%		2.0	%	
+150	3.5	%				
150-212	3.5	%		12.0	%	
+106	17.9	%				
+75	21.1	%				
+45	29.6	%				
-45	27.9	%	10.0	30.0	%	

2013-09-18 22:27:35

Fonte: Hoganäs do Brasil

## ANEXO B – Certificado de análise grafite UF4

# Höganäs

## CERTIFICADO DE ANALISE

Pág.:  
1(1)

Nr lote	Dt impressão	
1391909	2013-02-22	
Nr pedido	Entrega	Expedição
0010161053	1416715	3150457

Nome do item  
GRAFITE UF4  
Código Produto  
079756  
GRAFITE UF4  
GRAFITE UF4

Cliente  
ARON METAL LTDA  
R A  
PQ.AGRO INDL IGARA

21191

Quantidade                      Nossa Referência  
30,000    Kg

CANOAS  
Data produção                      Qtd produzida  
2012-07-30                                      Kg

	Resultados dos Testes Unid	Especificação	
		MIN	MAX
<b>PROPRIEDADES QUÍMICAS</b>			
Umidade	0.09 %		0.20 %
Cinzas	3.5 %		4.0 %
C	96.5 %	96.0	
S	0.07 %		0.20 %
<b>PROPRIEDADES FÍSICAS</b>			
10% Abaixo (Sympatec)	2.5 Micron		3.0 Micron
50% Abaixo (Sympatec)	6.0 Micron	5.5	7.0 Micron
90% Abaixo (Sympatec)	11.8 Micron		13.0 Micron

Aprovado por



Quality Control Manager

13:56:11

Inspection certificate  
EN 10 204 3.1

Fonte: Hoganas do Brasil

**ANEXO C – Ficha de Controle de Qualidade de peça sinterizada.**

## **Aron Metal**

### CERTIFICADO DE QUALIDADE

NÚMERO DO CERTIFICADO	032 2011	DATA	00/01/1900
NOTA FISCAL	0	PEÇA	Pista do retentor
QUANTIDADE	0	CÓDIGO PEÇA	YD 065209
CLIENTE	Kuhn do Brasil SA Impl Agric		

<b>PROCESSAMENTO</b>
Compactação e sinterização a 11000C com atmosfera N2

<b>MATERIA-PRIMA</b>	
Tipo	Pó atomizado a água -100 mesh - AHC 100.29
Liga	Fe-C
Lote	0
Procedência	Höganäs do Brasil

<b>DIMENSOES</b>			
DIÂMETRO EXTERNO	Especificado	30h11	30h11
	Encontrado	29,95	30h11
DIÂMETRO INTERNO	Especificado	20,05	20,1
	Encontrado	20,08	20,1
ALTURA	Especificado	13,9	14,1
	Encontrado	13,9	14,1
CONCENTRICIDADE			
PADRÃO PASSA NÃO PASSA			
DUREZA	Especificado	50-60RC	
	Encontrado	50-58	
DENSIDADE, g/cm3	Especificado	6,5	6,6
	Encontrado		
TRATAMENTO TÉRMICO	Cementação e têmpera		
ACABAMENTO	Tamboreamento		

Fonte: Aron Metal Ltda

## ANEXO D – Certificado Pó de Cobre

	<b>CERTIFICADO DE ANÁLISE</b>	<b>FOR.12</b>
	<b>PÓ DE COBRE ELETROLÍTICO DENDRÍTICO</b>	Rev.03
		Pág. 1 de 1

<b>CLIENTE:</b>	ARON METAL
<b>MATERIAL:</b>	PÓ DE COBRE ELETROLÍTICO DENDRÍTICO PCED-030
<b>NOTA FISCAL:</b>	397
<b>LOTE:</b>	ABR/15 ARO
<b>DATA:</b>	15/04/2015

## Pó de cobre eletrolítico Dendrítico

TIPO DE ENSAIO	ESPECIFICADO	VERIFICADO	MÉTODO
1. Densidade		1,36 g/cm <sup>3</sup>	Cone Hall
2. Malha (Tyler)			Peneiramento
+100			
-100			
-100+150			
-100+200			
+150			
-150			
-150+200			
+200		0,50%	
-200		99,50%	
-200-250			
-200+325			
+250			
-250			
-250+325			
+325			
-325			
3. Teor de Cobre (lotes amostrados)	99.5% mín.	Ver gráfico abaixo	Espectrofotometria ou substituto

Resultados de Análise do Teor do Cobre						
Lotes amostrados conforme IT.10 Amostragem						
Análises realizadas em: Green Lab Análises química e toxicológica						
Lotes Amostrados	SET/01 ARO SET/12 BLE SET/24 MIX SET/30 ECS-A	OUT/02 ECS-B OUT/10 BLE OUT/23 ING OUT/31 UNI	NOV/03 BLE NOV/11 DAE5 NOV/20 ROS NOV/28 MET2	DEZ/01 CAL1 DEZ/10 UNI1 DEZ/16 ECS-A	JAN/06 ARO JAN/14 USI1 JAN/23 MIX1 JAN/30 BLE	FEV/03 LUC FEV/10 UNI3 FEV/23 BLE FEV/27 MIX1
Relatório de análises Green Lab	17757/2014-1.0 17758/2014-1.0 17759/2014-1.0 17760/2014-1.0	20172/20141.0 20174/20141.0 20176/20141.0 20178/20141.0	21933/2014-1.0 21934/2014-1.0 21935/2014-1.0 21936/2014-1.0	315/2015-1.0 316/2015-1.0 317/2015-1.0	1925/2015-1.0 1926/2015-1.0 1927/2015-1.0 1924/2015-1.0	3361/2015-1.0 3362/2015-1.0 3363/2015-1.0 3364/2015-1.0
Mês/Ano	SET/14	OUT/14	NOV/14	DEZ/14	JAN/15	FEV/15
Media dos resultados	99,85%	99,63%	99,61%	99,67%	99,91%	99,61%

Resultados atualizados em 15/04/2015 às 09h06min.

Data de fabricação: 15/04/2015

Prazo Validade: 12 meses

Técnico Químico Responsável: Bruna Becker da Silva – CRQV 05408283  
 Certificado emitido eletronicamente, válido sem assinatura.