

**Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica**

MONOGRAFIA

**ANÁLISE DA CAPABILIDADE PARA O PROCESSO DE
TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO DE UM TORNO CNC:
Uma abordagem detalhada utilizando Controle Estatístico de Processo**

**CAPABILITY ANALYSIS FOR THE EXTERNAL CYLINDRICAL
TURNING PROCESS OF A CNC LATHE:
A detailed approach using Statistical Process Control**

**Orientador:
Prof. Dr. Fabrício Tadeu Paziani**

**Aluno:
Luiz Gustavo Uekane**



São Carlos - SP – 2022

LUIZ GUSTAVO UEKANE

ANÁLISE DA CAPABILIDADE PARA O PROCESSO
DE TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO DE UM TORNO CNC:
Uma abordagem detalhada utilizando Controle Estatístico de Processo

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fabricio Tadeu Paziani

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do candidato Luiz Gustavo Uekane, realizada em 29/07/2022:

Prof. Dr. Fabrício Tadeu Paziani
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Marcos Roberto Monteiro
Universidade Federal de São Carlos

DEDICATÓRIA

À Elzio e Carla, que foram e continuam sendo meus pilares
de vida e exemplos de inúmeras virtudes.

À meu irmão Pedro e minha irmã Maria Paula, que sempre me
incentivaram na busca constante por conhecimento.

À minha amiga Namíbia que me incentivou e
me deu forças para continuar nessa jornada acadêmica.

AGRADECIMENTO

Para agradecer de forma justa, é necessário lembrar de quem esteve presente na caminhada até este momento, e que me proporcionaram as condições necessárias para tornar essa jornada possível.

Aos meus pais, Elzio e Carla, meus mais sinceros agradecimentos, pois nunca pouparam esforços para garantir a melhor educação possível. Além disso, sempre foram compreensivos e prestativos em todas as fases da minha vida. Não há dúvidas de que foram os principais atores que me proporcionaram uma base sólida para eu trilhar uma vida próspera e feliz.

Aos meus irmãos, Pedro e Maria Paula, que me incentivaram e me motivaram na busca pelos meus sonhos e realizações, sempre me proporcionando as condições necessárias para conseguir alcançá-los.

Se tratando da vida acadêmica, nada poderia ser realizado sem a tutoria das dezenas de professores e profissionais da educação que cruzam as diversas etapas do ensino. Hoje, chegando no ápice da vida acadêmica, agradeço a cada um por sua parcela de contribuição, que, de sua forma, foi essencial na minha construção como aluno.

Sobre esses, gostaria de mencionar especialmente meu orientador, Fabricio, que tive o privilégio de desenvolver uma relação de amizade com ele durante os últimos semestres, que resultou em ele me guiar nessa jornada do desenvolvimento da monografia. Sem dúvidas, foi uma honra desenvolver este projeto ao seu lado.

Por fim, mas com uma enorme relevância, me lembro de todos os amigos que, cada um à sua maneira, tornaram essa trajetória mais divertida e leve. Em específico, aos meus grandes companheiros: Mateus, Lucas, Gabriel, Deidson, Fernando, João Pedro e Fábio. Muito obrigado pela parceria!

RESUMO

O torneamento cilíndrico externo é um dos diversos processos de manufatura utilizados por indústrias para fabricação de peças para aplicações gerais, como eixos, pinos, parafusos dentre outros. Dado o uso extensivo deste processo, se faz necessário um maior entendimento dos fenômenos existentes no torneamento, de modo a assegurar que a máquina ferramenta seja capaz de produzir peças dentro de uma faixa admissível de tolerância dimensional. Este estudo busca fazer uma contribuição à análise estatística da Capabilidade de um torno CNC no processo de torneamento cilíndrico externo, levando em consideração os índices de capabilidade do processo C_p , C_{pk} e da máquina ferramenta C_M . Foi utilizado o método Controle Estatístico do Processo (CEP) para a análise e estimativa dos índices de capabilidade de um torno CNC, visando facilitar a aplicação destes índices por parte dos gestores do processo. Como resultado, foi constatado que para os índices de tolerâncias variando de IT7 a IT9 dado um afastamento “js” para dimensão nominal de 16 mm o processo é satisfatório e capaz de produzir as peças dentro dos limites de especificações. Embora o resultado para IT6 considerando o mesmo afastamento e dimensão nominal não tenha sido plenamente satisfatório, foram observados pontos de melhoria a serem implementados em futuros trabalhos visando garantir a referida relevância.

Palavras-chave: Controle Estatístico do Processo. Índices de Capabilidade. Torneamento. C_p . C_{pk} .

ABSTRACT

External cylindrical turning is one of several manufacturing processes used by industries to manufacture parts for general applications, such as shafts, pins, screws, among others. Given the extensive use of this process, a greater understanding of the phenomena existing in turning is necessary, in order to ensure that the machine tool is capable of producing parts within an admissible range of dimensional tolerance. This study seeks to make a contribution to the statistical analysis of the capability of a CNC lathe in the external cylindrical turning process, taking into account the capability indices of the process C_p , C_{pk} and the machine tool C_M . The Statistical Process Control (CEP) method was used to analyze and estimate the capability indices of a CNC lathe, in order to facilitate the application of these indices by process managers. As a result, it was found that for tolerance indices ranging from IT7 to IT9 given a “js” fit for a nominal dimension of 16 mm the process is satisfactory and capable of producing the parts within the specification limits. Although the result for IT6 considering the same fit and nominal size was not fully satisfactory, improvement points were observed to be implemented in future works in order to guarantee the referred relevance.

Keywords: Statistical Process Control. Capability Indexes. Turning, C_p . C_{pk} .

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Torneamento Cilíndrico Externo	08
Figura 2 – Variabilidade do resultado de um processo	09
Figura 3 – Gráficos da média (\bar{X}) e da amplitude (R) respectivamente	12
Figura 4 – Capacidade mínima exigida para uma característica com limite inferior de especificação (a) e com limite superior de especificação (b)	16
Figura 5 – Capacidade mínima requerida para uma característica com especificação bilateral	16
Figura 6 – Tipo de processo de acordo com os valores de C_p e C_{pk}	20
Figura 7 – Dimensões do corpo de prova de aço SAE 1045	24
Figura 8 – Inserto tipo D	24
Figura 9 – Porta Ferramenta utilizado	25
Figura 10 – Torno CNC ROMI centur 30D	25
Figura 11 – Micrômetro Externo Digital	26
Figura 12 – Corte das barras para produção dos corpos de prova	29
Figura 13 – Corpo de prova após operação de desbaste (a) e acabamento (b)	29
Figura 14 – Medição dos corpos de prova	30
Figura 15 – Distribuição normal de acordo com nível sigma.	32
Figura 16 – Gráfico do teste de Normalidade	33
Figura 17 – Gráficos de Controle	35
Figura 18 – Gráfico da Capacidade do Processo IT6	37
Figura 19 – Gráfico da Capacidade do Processo IT7	39
Figura 20 – Gráfico da Capacidade do Processo IT8	40
Figura 21 – Gráfico da Capacidade do Processo IT9	42
Figura 22 – Gráfico da Capacidade do Processo IT6 para 31mm	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correlação entre nível de sigma, índice Cpk, PPM e Tempo perdido	18
Tabela 2 – Escala de classificação para vários valores de C_p	19
Tabela 3 – Proporção de peças não conformes associadas a valores de C_{pk}	19
Tabela 4 – Composição química do aço SAE 1045 em %	24
Tabela 5 – Parâmetros de usinagem	29
Tabela 6 - Diâmetro medido para os 20 subgrupos. (Cilindro de 16 mm de diâmetro)	32
Tabela 7 – Fatores para Construção de Gráficos de Controle	35
Tabela 8 – Índices de Capabilidade	44

LISTA DE SÍMBOLOS

μ – Média

$\bar{\bar{X}}$ – Média das médias

\bar{X} – Média amostral

σ – Desvio padrão

$\sigma_{\bar{x}}$ – Desvio padrão da distribuição das médias

$\hat{\sigma}_R$ – Desvio padrão da distribuição das amplitudes

\bar{R} – Média das amplitudes

$LSC_{\bar{x}}$ – Limite superior de controle para as médias

$LIC_{\bar{x}}$ – Limite inferior de controle para as médias

$LC_{\bar{x}}$ – Linha central para as médias

LSC_R – Limite superior de controle para a amplitude

LIC_R – Limite inferior de controle para a amplitude

LC_R – Linha central para a amplitude

C_p – Índice de Capabilidade do processo

C_{pk} – Índice de Capabilidade considerando a centralização do processo

A – Amplitude da dispersão de trabalho da máquina

C_M – Índice de Capabilidade da máquina

σ_{global} – Desvio padrão global do processo

σ_{dentro} – Desvio padrão dentro dos subgrupos

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
1 INTRODUÇÃO	4
2 OBJETIVOS	6
2.1 Objetivo geral	6
2.2 Objetivos específicos	6
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
3.1 Processo de Torneamento	7
3.2 Aplicação do Controle Estatístico de Processo (CEP)	8
3.3 Gráfico de Controle para Variáveis	11
3.4 Capabilidade do Processo	15
3.5 Índices de Capabilidade	17
4 MATERIAIS	23
4.1 Material	23
4.2 Ferramenta de Corte	24
4.3 Porta-ferramenta	24
4.4 Máquina Ferramenta	25
4.5 Micrômetro Digital	26
5 MÉTODOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	27
5.1 Metodologia	27
5.2 Procedimento Experimental	28
6 ANÁLISE DE RESULTADOS	31
6.1 Resultados	31
6.1.1 Análise para IT6	36
6.1.2 Análise para IT7	38
6.1.3 Análise para IT8	39
6.1.4 Análise para IT9	41
7 CONCLUSÕES	44
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
9 APÊNDICE A – Folha de processos	49
9 APÊNDICE B – Análise de js6 para dimensão de 31mm	50

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, em decorrência da Globalização, vem acontecendo uma série de transformações no âmbito da política e economia mundial. O ponto primordial dessas mudanças é a integração dos mercados em uma comunidade global, na qual grandes corporações internacionais têm interesse em explorar. A partir desse ponto de vista, os Estados removem gradativamente as barreiras tarifárias que protegem sua produção da concorrência de produtos estrangeiros e se expandem ao comércio e ao capital internacional. Diante dessa perspectiva, a concorrência entre as empresas é cada vez mais acirrada (RODRIGUES, 2001).

Em decorrência dessas transformações, o grande desafio das empresas é descobrir novas tecnologias e métodos de gerenciamento que sejam capazes de fornecer uma vantagem competitiva capaz de consolidá-las no mercado em disputa. Nesse contexto, os processos de produção e as máquinas ferramentas estão em constante evolução na busca para atender as necessidades cada vez mais exigentes do mercado global.

A evolução de máquinas-ferramentas nos últimos anos tornou possível a obtenção de peças geometricamente complexas fornecendo uma qualidade superficial elevada e tolerâncias dimensionais cada vez mais estreitas. Neste aspecto é interessante um estudo mais aprofundado sobre o controle no processo de torneamento, capaz de fornecer resultados satisfatórios de modo a melhorar a qualidade e a produtividade do produto em uma determinada operação.

A usinagem é um processo de manufatura que tem como finalidade geral a produção de componentes mecânicos e a avaliação do desempenho de máquinas-ferramentas de corte é comumente baseada na sua capacidade de usinar peças de trabalho previamente especificadas em projetos. A capacidade do processo é o nível de desempenho em longo prazo de um processo que está sob controle estatístico. O controle estatístico do processo é uma ferramenta capaz de garantir uma qualidade elevada na fabricação das peças e se caracteriza na satisfação do cliente final (SHARMA; RAO, 2013).

Os índices e taxas que medem a capacidade do processo, ou seja, que mostram a capacidade que um determinado processo apresenta de fabricar produtos dentro da faixa de especificação, surgiram na década de 1920 provenientes dos estudos sobre Controle Estatístico do Processo (CEP) realizados por Shewhart (1926). A ideia central do CEP é controlar por meio de gráficos (cartas de processos), utilizando métodos estatísticos, visando

identificar a presença de causas especiais que devem ser eliminadas, tornando os processos previsíveis e estáveis com a atuação de apenas causas comuns.

Sendo assim, o propósito deste estudo é analisar a capacidade de um torno CNC ROMI Centur 30D de modo a assegurar que o mesmo seja capaz de produzir peças com as dimensões desejadas e conseqüentemente aumentar a capacidade de empresas na produção de peças com perfil e acabamento exigentes, como no caso das indústrias aeronáutica e automobilística. Portanto a qualidade do material relacionado a forma, dimensão e acabamento superficial podem representar um diferencial diante a concorrência (BONANDI, 2012).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo principal do trabalho é analisar estatisticamente a capacidade de um torno CNC no que se refere à obtenção de grau dos graus de tolerância padrão IT6 a IT9 na usinagem de uma peça de aço 1045 na dimensão nominal de 16 mm. Para tanto, foi executada uma análise estatística dos índices de capacidade do processo C_p , C_{pk} , visando garantir que o processo estava sob controle estatístico e posteriormente a análise do índice de capacidade da máquina C_M para o torno.

2.2 Objetivos específicos

- Foi especificado o material em bruto para a confecção das peças;
- Mediu-se o diâmetro das peças com um micrômetro milesimal digital;
- Aplicou-se o método para Controle Estatístico do Processo (CEP);
- Calculou-se os índices de capacidade do processo;
- Calculou-se o valor da Capacidade do torno CNC quanto à obtenção dos graus de tolerância padrão variando de IT6 a IT9, para afastamentos limites classe “js” na dimensão nominal 16 mm.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Processo de Torneamento

A atividade manufatureira nos países industrializados corresponde por cerca de 20 a 30% do Produto Interno Bruto, sendo um parâmetro para estabelecer o padrão de vida de uma sociedade (MACHADO et al, 2009). Nesse contexto, é interessante que os processos de manufatura sejam otimizados visando a redução de custos, tempo de produção, retrabalhos e produção de peças não conformes.

O propósito da usinagem, que é uma das principais atividades de manufatura, é produzir uma peça de trabalho na geometria, dimensões e acabamento superficial desejados. O torneamento cilíndrico é definido como um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes, em que a ferramenta se desloca em uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina (Ferraresi, 1970). A exigência por peças mais complexas, com tolerâncias dimensionais mais estreitas e elevada qualidade superficial tem aprimorado cada vez mais esse processo.

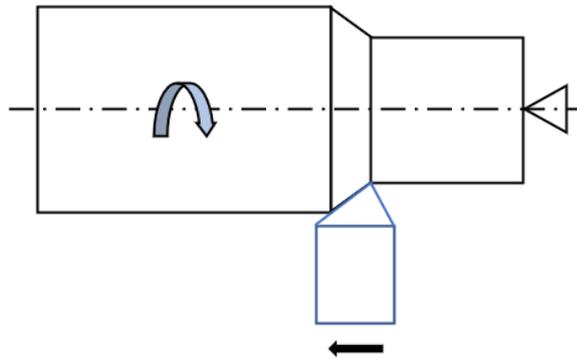
De acordo com Machado et al. (2009), as operações de usinagem são divididas em processos de usinagem convencional e não convencional. O processo de torneamento é considerado um dos mais amplamente difundidos dentre os processos de usinagem convencional. Segundo Trent (2000), o processo de torneamento é a operação de usinagem mais usualmente aplicada em operações de corte de metal. No torneamento, o material a ser usinado é fixado ao eixo-árvore do torno e rotacionado, em seguida, a ferramenta que está presa a um porta-ferramenta, move-se em um plano que, contém o eixo de rotação da peça. A Figura 1 a seguir representa visualmente como este processo ocorre.

O torneamento é um processo extremamente complexo, e possui inúmeras variáveis envolvidas (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, vibração da máquina, geometria da ferramenta, incluindo o raio de ponta etc) que podem afetar direta ou indiretamente seu resultado. Diversos trabalhos relatam as influências da interação entre a ferramenta e a peça usinada, assim como os parâmetros de corte e os fatores que afetam a qualidade superficial da peça (AKKUŞ, 2019; HESSAINIA et al., 2013).

No presente trabalho foi utilizado o processo de torneamento cilíndrico externo. Neste tipo de operação ocorre a usinagem externa da peça, por ser um dos processos mais

utilizados as exigências quanto ao controle de cavacos, segurança do processo e qualidade da peça são altas.

Figura 1 – Torneamento Cilíndrico Externo.



Fonte: Adaptado de Ferraresi (1969)

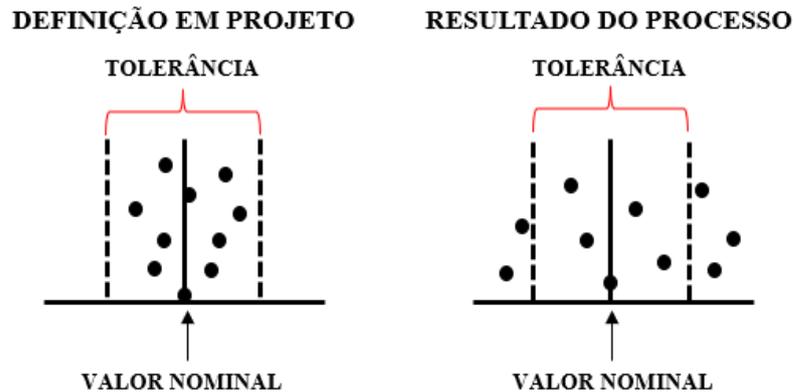
O processo de torneamento é classificado para fins de operação de desbaste e acabamento. A operação de desbaste antecede a de acabamento, visando obter na peça as dimensões próximas das finais, tipicamente os cavacos obtidos são grossos e a superfície apresenta sulcos profundos. A operação de acabamento é destinada a obter na peça as dimensões finais, ou um acabamento superficial especificado, ou ambos. Nessa operação os sulcos são imperceptíveis, pois os cavacos obtidos, em geral são finos. Tipicamente, adota-se baixo avanço devido à sua influência na rugosidade, pequena profundidade de corte e uma alta velocidade de corte (SOUSA, 2011).

3.2 Aplicação do Controle Estatístico de Processo (CEP)

De acordo com Carpinetti (2003), a primeira apuração importante para justificar o uso do Controle Estatístico de Processo é que todo e qualquer processo apresenta certo grau de variabilidade em seu resultado. Entende-se um processo como a transformação de um conjunto de parâmetros de entrada (por exemplo, material, máquina, método, etc) em uma saída, como no caso de um produto acabado ou semiacabado, sempre resultando em um determinado grau de variabilidade entre produtos. Ou seja, devido à impossibilidade de o processo ser absolutamente repetitivo, há uma distribuição em torno do valor nominal. Na Figura 2 está representada a variabilidade de um certo produto após o seu processo de fabricação. Como exemplo, pode ser a fabricação de um eixo, em que há um valor

estabelecido em projeto para o seu diâmetro, entretanto, não é possível fabricar todas as peças na exata dimensão, tendo como resultado valores admissíveis que permeiam o valor nominal.

Figura 2 – Variabilidade do resultado de um processo.



Fonte: Adaptado de Carpinetti, 2003, p. 19.

Shewhart (1930), em seu primeiro estudo, constatou que as causas da variabilidade dos processos podem ser classificadas em:

Causas Crônicas: são as causas de variabilidade inerentes do processo assim como ele foi concebido. A dispersão do resultado do processo devido a problemas como, por exemplo, equipamentos ou ajustagem do equipamento de maneira não adequada, por falta de supervisão ou capacitação por parte do operador ou até mesmo métodos inapropriados. Ou seja, são a somatória de causas de variabilidade inerente, ao processo, que culminam em resultados insatisfatórios.

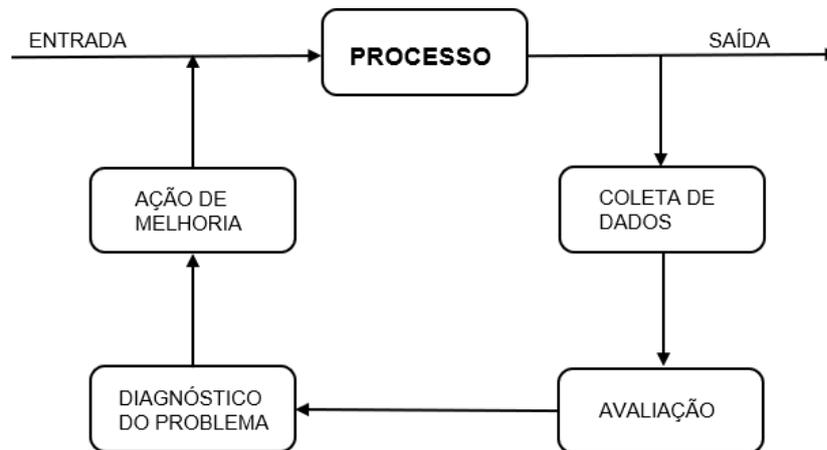
Causas Esporádicas: são variações resultantes de problemas momentaneamente presentes que desordenam o processo. Como por exemplo, ferramenta desgastada ou quebrada, contaminação da matéria-prima, erros do operador, etc. Portanto, são resultados de problemas que ocorrem ocasionalmente.

Shewhart (1930) notou também que um conjunto (ou uma população) de resultados de um processo sujeito somente à variabilidade proveniente de causas crônicas se distribui como uma distribuição Normal. Entretanto, a variabilidade excessiva é indesejável, já que ocasiona: perda da qualidade do resultado do processo ou produto (pois haverá uma grande dispersão do resultado em torno do valor nominal); perda de efetividade, previsibilidade e produtividade; aumento de custos (devido ao refugo, retrabalho etc).

Tendo em vista essa argumentação, Shewhart propôs a utilização dos gráficos de controle para detectar quando o processo deixa de operar dentro dos limites definidos como adequados.

Assim sendo, o Controle Estatístico de Processo (CEP) segue um ciclo para o controle e melhoria da qualidade, que envolve as seguintes etapas: coleta de dados; avaliação do processo; diagnóstico do problema; ação corretiva, como mostrado na Figura 2, a seguir.

Figura 2 – Ciclo de controle da qualidade para um processo.



Fonte: Adaptado de Carpinetti, 2003, p. 167.

A etapa de coleta de dados ocorre através de instrumentos de medição, em que o resultado do processo é coletado e registrado.

Na etapa de avaliação, por meio de gráficos de controle, são estabelecidos os limites de variabilidade do processo e com isso avalia-se a capacidade do processo para atender às especificações estabelecidas em projeto e monitorar o processo ao longo do tempo, para identificar possíveis ocorrências que não estejam sob controle estatístico do resultado do processo de fabricação.

Nas etapas seguintes, de posse do conhecimento do processo e da análise de todas as possíveis causas indesejáveis ao processo, busca-se identificar as causas mais prováveis para a ocorrência do problema e implementar ações corretivas com o intuito de melhorar o resultado do processo ou a eliminação do problema e conseqüentemente o reestabelecimento do processo em controle estatístico.

Portanto o Controle Estatístico de Processo tem por finalidade detectar a presença de causas esporádicas e monitorar o resultado da ação de melhoria do processo, eliminando as causas esporádicas de variabilidade e reduzindo a variabilidade natural do processo.

No presente estudo, foram realizadas as etapas de Coleta de Dados e de Avaliação do processo por meio da análise estatística para avaliar se o processo de torneamento está sob controle estatístico, e posteriormente obter os índices de capacidade do processo, analisando se os mesmos atendem os requisitos preestabelecidos para a qualidade das peças. As etapas de Ação de Melhoria e Ação de Diagnóstico não serão analisadas, ficando como sugestão para futuros estudos.

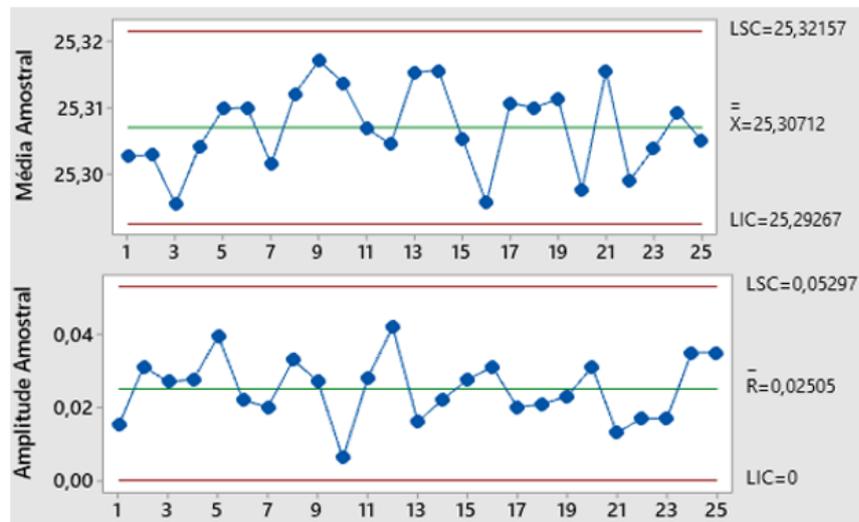
3.3 Gráfico de Controle para Variáveis

O gráfico de controle é uma ferramenta muito utilizada no controle estatístico de processo (CEP), cujo principal objetivo é monitorar e controlar os processos buscando garantir a estabilidade e previsibilidade dos mesmos. Segundo Montgomery (2009), os gráficos de controle são utilizados para identificar e medir as variações que ocorrem durante um determinado processo. Porém, ainda de acordo com Montgomery (2009), mudanças na média do processo devem ser toleradas mesmo quando este já atingiu um elevado nível de capacidade, de modo que os limites de controle se tornam significativamente menores do que os limites de especificação. Portanto, a variação da média dentro de um determinado intervalo de valores não afetaria o seu desempenho.

Tipicamente, um gráfico de controle da média é composto por uma linha central (*LC*) e duas linhas horizontais que são os limites de controle inferior e superior (*LIC* e *LSC*). Cada uma das linhas mencionadas anteriormente apresentam um conceito e equação específica, que estão explicitadas nos próximos subtópicos. Analisando estes gráficos é possível verificar a normalidade dos processos, e caso for necessário, aplicar melhorias.

Existem dois tipos de gráficos de controle para variáveis, que são o gráfico de \bar{X} (média das médias), que reflete o valor médio de um subgrupo, e o gráfico *R* (amplitude amostral) que mede as variações do produto. Estes dois gráficos devem obrigatoriamente ser analisados juntos a fim de controlar a variação do processo dentro de um subgrupo (*m*). Como exemplo, podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3 – Gráficos de (\bar{X}) e da amplitude (R) respectivamente.



Fonte: Autor.

Pode ser visto através da Figura, para o exemplo de um processo de produção de peças com diâmetro nominal de 23,3 mm, que este é um processo estável e está sob controle estatístico, pois todos os valores estão contidos nos limites de controle. Entretanto, não se pode concluir se o processo é capaz ou não de produzir as peças na devida dimensão nominal sem que se faça as análises dos índices de capacidade.

Nos subtópicos a seguir será demonstrado como se prosseguiu para a criação dos gráficos mencionados acima, de modo a avaliar se o processo tem comportamento estável e previsível.

3.3.1 Construção do Gráfico de \bar{X}

Como na prática não são conhecidos a média (μ) e o desvio-padrão (σ) do processo, estes devem ser inferidos a partir de amostras preliminares do processo. Logo da Teoria Estatística, temos a seguinte relação (CARPINETTI, 2003):

$$\mu = \bar{\bar{X}} \quad (1)$$

A Equação (2) fornece a estimativa da média das médias ($\bar{\bar{X}}$).

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_i^m \bar{X}_i}{m} \quad (2)$$

Sendo $i = 1, \dots, m$.

m representa o número de amostras e \bar{X} é a média amostral, dada por:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_i^n x_i \quad (3)$$

Sendo $i = 1, \dots, n$.

Onde, n é o tamanho da amostra.

x é o valor de cada amostra.

Para obter os limites do gráfico, é necessário estimar o desvio-padrão do processo (σ). Entretanto, o desvio-padrão da distribuição de uma população de resultados do processo é obtido através do desvio padrão da distribuição das médias, representado pela seguinte relação:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

A estimativa de σ , para a construção dos gráficos de controle, baseia-se no método da amplitude das amostras. Deste modo, existe uma relação entre a amplitude de uma amostra com Distribuição Normal e o desvio-padrão desta distribuição, dada por:

$$\sigma = \hat{\sigma} = \frac{R}{d_2} \quad (5)$$

Em que d_2 é um valor tabelado para diferentes tamanhos amostrais, e n é o tamanho da amostra.

Onde \bar{R} é calculado por:

$$\bar{R} = \frac{\sum_i^m R_i}{m} \quad (6)$$

$$R_i = X_{m\acute{a}x} - X_{m\acute{i}n} \quad (7)$$

Sendo $i = 1, \dots, m$.

R_i : são as amplitudes da i -ésima amostra.

$X_{m\acute{a}x}$: maior valor de amplitude.

$X_{m\acute{i}n}$: menor valor de amplitude.

Com os valores estimados de \bar{X} e $\hat{\sigma}$ torna-se possível a obtenção dos limites de controle superior e inferior (LSC e LIC), considerando $\pm 3\sigma_{\bar{x}}$ de acordo com as seguintes equações:

$$LSC_{\bar{x}} = \bar{X} + 3\sigma_{\bar{x}} \quad (8)$$

$$LSC_{\bar{x}} = \bar{X} + 3 \frac{\bar{R}}{d_2 \sqrt{n}} \quad (9)$$

$$LIC_{\bar{x}} = \bar{X} - 3\sigma_{\bar{x}} \quad (10)$$

$$LIC_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} - 3 \frac{\bar{R}}{d_2 \sqrt{n}} \quad (11)$$

$$A_2 = \frac{3}{d_2 \sqrt{n}} \quad (12)$$

$$LSC_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} + 3A_2 \quad (13)$$

$$LIC_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} - 3A_2 \quad (14)$$

Em que a constante A_2 depende do tamanho da amostra.

A Equação (15) fornece a relação de igualdade da média das médias $\bar{\bar{X}}$ com a linha central (LC):

$$LC_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} \quad (15)$$

Linha Central (LC): representa o valor nominal do processo caso não houvesse variabilidade no processo, no qual os valores retirados da amostra deveriam estar situados.

Limites de Controle (LSC e LIC): são limites obtidos de acordo com o desempenho do processo. Esses limites definem se o processo está sob controle estatístico ou não.

De posse desses valores, torna-se possível construir o Gráfico da Média, cuja função é monitorar a média da característica da qualidade de um processo.

3.3.2 Construção do Gráfico R

Para manter o processo sob controle é necessário também controlar possíveis alterações da dispersão dos resultados do processo. Logo, pode-se monitorar alterações do desvio-padrão do processo por meio de um Gráfico de Variações da Amplitude (Gráfico R).

Para definir os limites, é preciso estimar o desvio-padrão da distribuição da amplitude $\hat{\sigma}_R$. Da Teoria Estatística, mostra-se que existe uma relação de proporcionalidade entre o desvio-padrão do processo e o desvio-padrão da distribuição da amplitude, representada dada por:

$$\hat{\sigma}_R = d_3 \sigma \quad (16)$$

Como o desvio-padrão do processo σ , é desconhecido, estima-se $\hat{\sigma}_R$, utilizando a seguinte relação:

$$\hat{\sigma}_R = d_3 \hat{\sigma} \quad (17)$$

Em que, d_3 é um valor tabelado. Considerando $\pm 3\hat{\sigma}_R$, os limites de controle superior e inferior (LSC e LIC) do gráfico são dados respectivamente por:

$$LSC_{\bar{R}} = \bar{R} + 3 \frac{d_3}{d_2} \bar{R} \quad (18)$$

$$D_4 = 1 + 3 \frac{d_3}{d_2} \quad (19)$$

$$LSC_{\bar{R}} = D_4 \bar{R} \quad (20)$$

$$LIC_{\bar{R}} = \bar{R} - 3 \frac{d_3}{d_2} \bar{R} \quad (21)$$

$$D_3 = 1 - 3 \frac{d_3}{d_2} \quad (22)$$

$$LIC_{\bar{R}} = D_3 \bar{R} \quad (23)$$

O cálculo da linha central (*LC*) para o gráfico de *R* é dada pela seguinte equação:

$$LC_{\bar{R}} = \bar{R} \quad (24)$$

As constantes D_3 e D_4 são tabeladas para diferentes tipos de amostra.

A linha central (*LC*) e limites superior e inferior (*LIC* e *LSC*) seguem o mesmo conceito explicitado no subtópico acima, mas aplicado aos parâmetros da amplitude (*R*). Entretanto aqui, quando o limite inferior de controle (*LIC*) calculado for menor que zero, admite-se que ele seja zero.

Portanto para a construção dos referidos gráficos, é de extrema relevância que o processo esteja sob controle estatístico, certificando-se que os dados utilizados sejam representativos e estejam sujeitos apenas as causas crônicas de variabilidade.

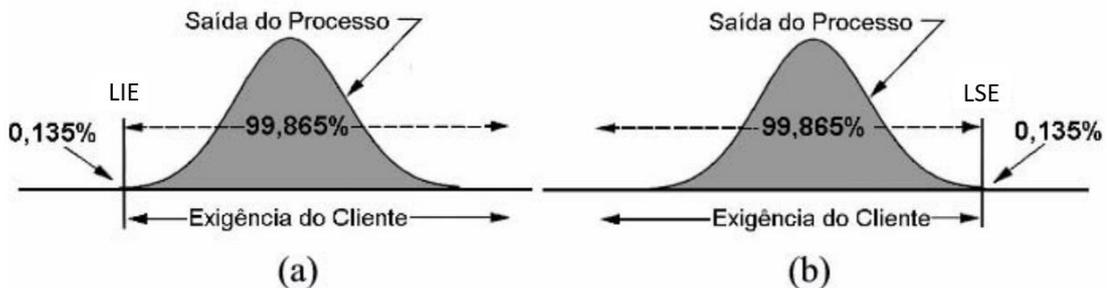
3.4 Capabilidade do Processo

A capabilidade do processo é a capacidade do equipamento de produzir um determinado produto que satisfaça frequentemente aos requisitos do projeto e às expectativas do cliente. O ponto central é comparar o que um processo deveria fazer, com o que realmente faz. Sendo assim, admite-se um intervalo de variação permitido ao processo como padrão e compara-se com a variação resultante do processo (KANE, 1986). Tal intervalo compõe os limites de especificação de engenharia, que podem ser bilaterais ou unilaterais, implicando em diferentes formas de avaliação da capabilidade para cada caso. Entretanto, não deve se confundir limites de especificação (*LIE* e *LSE*) com limites de controle (*LIC* e *LSC*). Os limites de especificação são definidos de acordo com as exigências do cliente, enquanto os

limites de controle são calculados a partir dos dados do processo e representam o desempenho real do mesmo.

Para um processo ser considerado capaz, no caso de uma característica de interesse com especificação unilateral, é permitido que máximo 0,135% das peças produzidas fiquem de fora dos limites de especificação (KANE, 1986). Este valor percentual, corresponde à área de $\mu - 3\sigma$, quando existir apenas o limite inferior de especificação (LIE) evidenciado na Figura 4(a), ou à área acima de $\mu + 3\sigma$, quando existir apenas o limite superior de especificação (LSE) Figura 4(b).

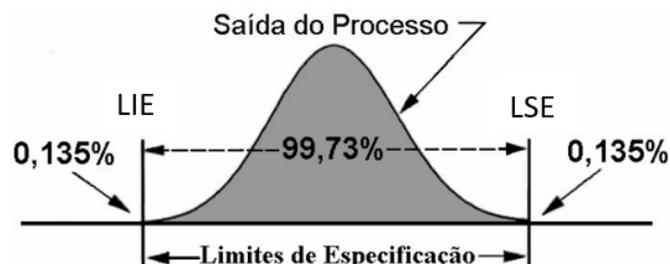
Figura 4 – Capacidade mínima exigida para uma característica com limite inferior de especificação (a) e com limite superior de especificação (b).



Fonte: Adaptado de Bothe, 1997, p. 55.

No caso de uma característica de interesse com especificação bilateral, o critério mínimo para o processo ser considerado capaz é que pelo menos 99,73% de seus produtos estejam dentro dos limites de especificação, o que corresponde ao processo gerar, no máximo, 0,27% de peças não conformes (KANE, 1986). A Figura 5 representada a seguir mostra um processo com especificação bilateral, que gera 0,27% de peças não conformes que estão igualmente distribuídas abaixo e acima das especificações. O valor de 99,73% foi escolhido por corresponder a uma área sob a curva normal compreendida entre $\mu \pm 3\sigma$, onde μ é a média e σ o desvio padrão geral do processo.

Figura 5 – Capacidade mínima requerida para uma característica com especificação bilateral.



Fonte: Adaptado de Bothe, 1997, p. 54.

A análise de capacidade de um processo deve ser utilizada como uma previsão para seu estado futuro. Sendo assim, há a necessidade de que o processo se comporte de modo estável e previsível. Desta maneira, espera-se que o desempenho atual do processo venha a se repetir futuramente e, portanto, quanto maior for sua estabilidade, maior será o grau de confiabilidade na qual sua capacidade futura não será diferente da capacidade passada. No caso de um processo instável e imprevisível, Wheeler (1999) diz que a forma mais adequada de caracterizar este processo é informar o percentual de peças não conformes, advertindo de que o passado não pode ser uma referência confiável para o futuro.

3.5 Índices de Capacidade

Os índices de capacidade de processo servem para medir o desempenho da operação da máquina e, portanto, se tornaram muito comuns na avaliação da capacidade dos processos de manufatura, determinando o desempenho da máquina-ferramenta. Progressivamente, mais esforços têm sido dedicados a estudos e aplicações desses índices para avaliar a capacidade de processo. Um índice de capacidade do processo é um valor numérico que compara o desempenho de um produto ou característica do processo com as especificações de engenharia (KANE, 1986; KAHRAMAN, 2012).

De acordo com Eramah et al (2016), um grande valor do índice de capacidade mostra que o processo é capaz de produzir peças que, com alta probabilidade, serão capazes de atender ou exceder os requisitos do cliente. Portanto, o índice de capacidade é adequado, pois reduz informações complexas sobre o processo a um único valor numérico. Estes índices são utilizados para informar o quão bem o processo foi executado, e também, para processos estáveis ou previsíveis, pressupõe-se que os índices indiquem o desempenho futuro esperado.

Rajvanchi e Belokar (2013), em seu estudo, mostram que os índices de capacidade do processo são excelentes ferramentas para a melhoria contínua da qualidade e produtividade. Estes índices compõem um sistema complementar de medição do desempenho do processo. Os índices de capacidade do processo no torneamento podem ser avaliados para medir o desempenho desse processo, comparando a saída do processo controlado com o limite de especificação desejado (SHREEHAH, 2010; SHINDE e KATIKAH, 2012).

Bottani et. al (2021), em seu estudo, utilizando-se da teoria Seis Sigma, relata na Tabela 1, as correlações entre o nível sigma alcançado, porcentagem de conformidade dos

produtos, índice C_{pk} , PPM (parte por milhão) de produtos defeituosos e tempo perdido por má produção em um mês.

Tabela 1 – Correlação entre nível de sigma, índice Cpk, PPM e Tempo perdido

σ	Conformidade %	C_{pk}	PPM	Tempo Perdido/ 720 h
±1	68,26	0,33	317400	228,5 h
±2	95,46	0,67	45500	32,8 h
±3	99,73	1	2700	1,94 h
±4	99,994	1,33	63	2,74 min
±5	99,99994	1,67	0,57	1,49 min
±6	99,9999998	2	0,002	0,005 s

Fonte: Bottani et al. (2021)

Sendo assim, a análise de capacidade garante que os processos estão em conformidade com as especificações industriais e, portanto, limitar a variação do processo é imprescindível para atingir as características de qualidade do produto (WANARE; GUDADHI, 2013).

O índice C_p , conhecido como Capacidade de Processo, é definido como a taxa de tolerância à variação real (tolerância do processo) e, quanto maior esse índice, é menos provável que o processo esteja fora das especificações. Já o índice C_{pk} considera a centralização do processo, e é definido como o ajuste do índice C_p , ou seja, é a taxa de tolerância à variação real, considerando a média do processo relativa ao ponto médio das especificações.

O índice de Capacidade do Processo relaciona as especificações de engenharia com o comportamento observado do processo. A capacidade de um processo é definida como a razão entre a distância do centro do processo para o limite de especificação mais próximo dividido por uma medida de variabilidade do processo. Os índices C_p e C_{pk} são amplamente utilizados pelas indústrias de manufatura, e são estimados pelas equações a seguir:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (25)$$

Onde,

LSE é o limite de especificação superior.

LIE é o limite de especificação inferior.

σ é o desvio padrão do processo estimado pela Equação (7).

A equação (24) a seguir, dá a estimativa do valor de C_{pk} :

$$C_{pk} = \min \left[\frac{LSE - \bar{X}}{3\sigma}, \frac{\bar{X} - LIE}{3\sigma} \right] \quad (26)$$

Grandes valores para os índices C_p e C_{pk} correspondem a um processo capaz de produzir uma elevada quantidade de peças dentro dos limites de especificação. Na Tabela 2 é apresentada a escala de classificação de C_p proposta por Juran et al. apud Bothe (1997).

Tabela 2 – Escala de classificação para vários valores de C_p .

Amplitude de C_p	Avaliação da Capacidade
$2,00 \leq C_p$	Excelente
$1,67 \leq C_p < 2,00$	Muito Boa
$1,33 \leq C_p < 1,67$	Boa
$1,00 \leq C_p < 1,33$	Moderada
$0,67 \leq C_p < 1,00$	Fraca
$0,00 \leq C_p < 0,67$	Ruim

Fonte: Bothe, 1997, p.133

Montgomery (2009) recomenda como valor mínimo $C_p = 1,50$ para os novos e a processos existentes, $C_p = 1,33$. Kotz e Johnson (1993) recomendam $C_p = 1,67$ como valor mínimo para novos processos e $C_p = 1,50$ para os processos existentes.

Kotz e Lovelace (1998) apresentaram uma estimativa do percentual de peças que não estão em conformidade, representada na Tabela 3. Estes valores devem ser utilizados apenas como referência.

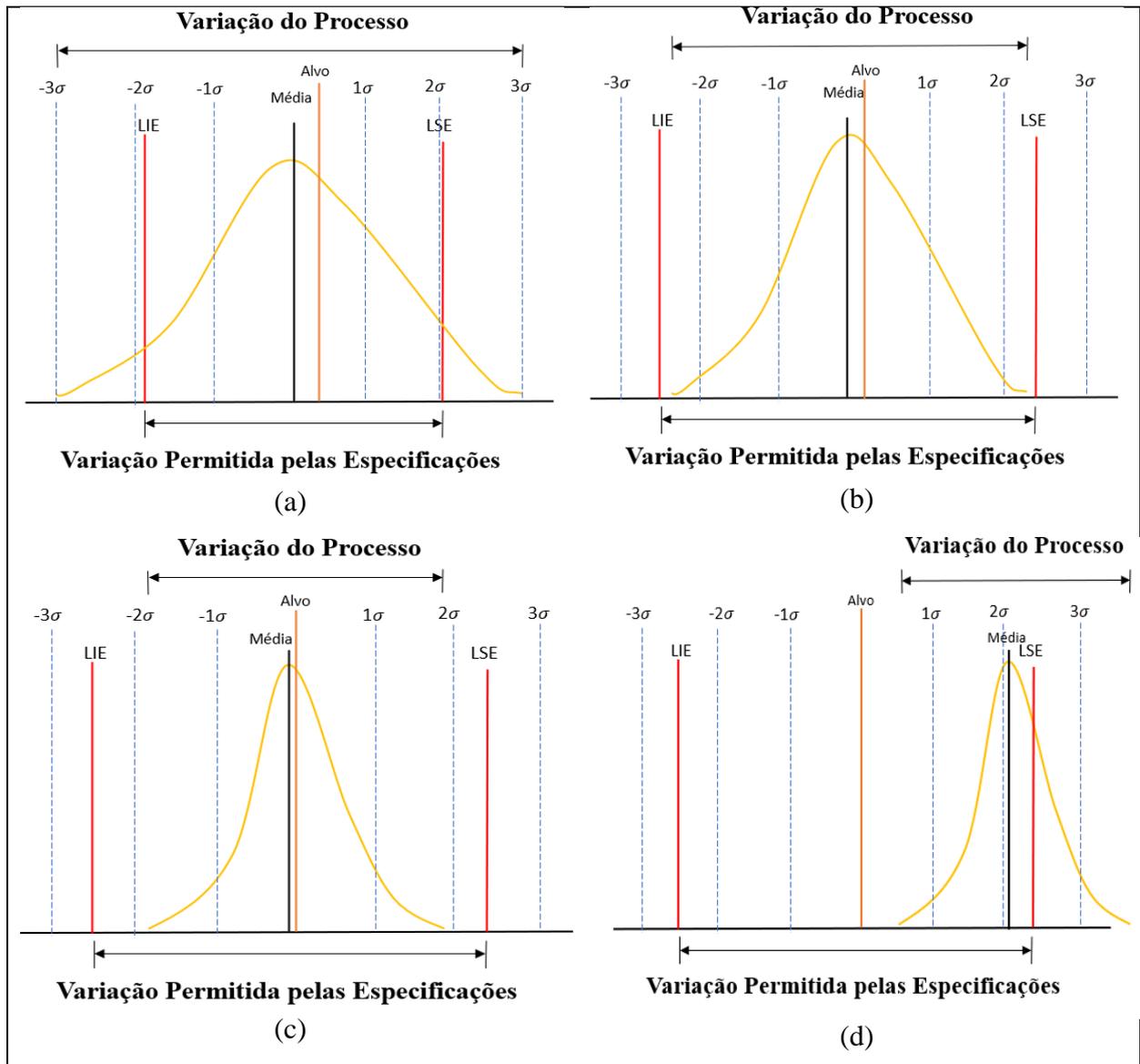
Tabela 3 – Proporção de peças não conformes associadas a valores de C_{pk} .

C_{pk}	Peças Fora de Especificação
0,25	16 em 100
0,50	7 em 100
1,00	13 em 10.000
1,33	3 em 100.000
1,67	1 em 1.000.000
2,00	1 em 1.000.000.000

Fonte: Kotz, Lovelace, 1998, p. 51.

Nas Figuras 6(a, b, c e d) a seguir, é possível visualizar de forma gráfica alguns cenários para os índices C_p e C_{pk} e a denominação para o processo quando analisados estes cenários.

Figura 6 - Tipo de processo de acordo com os valores de C_p e C_{pk} .



Fonte: Autor.

Na Figura 6(a) é representado um Processo Incapaz, ou seja, apresenta C_p baixo (exemplo $C_p = 0,65$) ocasionado por uma variação do processo maior que a faixa dos limites de especificação e C_{pk} baixo (exemplo $C_{pk} = 0,60$), pois apesar de a distribuição estar centrada, há uma variação consideravelmente maior que a faixa dos limites de especificação, resultando em um processo que produz muitas peças defeituosas.

Em 6(b) é representado um Processo Satisfatório, que apresenta moderado C_p (exemplo $C_p = 1,00$), ocasionado por uma baixa variação em relação à faixa dos limites de especificação, apresenta um moderado C_{pk} (exemplo $C_{pk} = 1,00$) há uma baixa variação em relação à faixa dos limites de especificação e a distribuição está centrada em relação a nominal, resultando em um processo que produz uma quantidade tolerável de peças não conformes.

Em 6(c) é representado um Processo Capaz, ou seja, apresenta C_p alto (exemplo $C_p = 2,00$), baixa variação em relação a faixa dos limites de especificação e C_{pk} alto (exemplo $C_{pk} = 1,95$) com a distribuição centrada e a variação do processo é consideravelmente menor que a variação permitida pelas especificações do produto, resultando em um processo capaz de produzir peças dentro das especificações.

Em (d) é representado um Processo Incapaz, que apresenta C_p bom (exemplo $C_p = 1,68$) ocasionado por uma baixa variação em relação faixa dos limites de especificação e C_{pk} baixo (exemplo $C_{pk} = 0,30$), este processo pode ser considerado estável, mas não está centralizado com a dimensão nominal especificada, nota-se que a média do processo está mais próxima do limite superior de especificação do que da dimensão nominal, resultando em um processo que produz muitas peças defeituosas.

Portanto, ao se fazer um estudo de Capabilidade de Processo, o objetivo é a busca dos índices mais altos que resultam no gráfico do tipo (c), pois estes resultados são os que conferem as melhores condições para que um processo esteja sob controle estatístico, minimizando a produção de peças não conformes.

Gonçalves (1991, p. 84) introduz o conceito de Capabilidade de Máquina que é um conceito ligado à Precisão de Trabalho e que pode ser entendido como a relação entre a dispersão do trabalho de uma máquina e a tolerância almejada para essa máquina. Usualmente o índice C_M expressa a relação em porcentagem e deve ter um valor máximo percentual conforme a máquina. O método para a determinação da Capabilidade de Tornos é um método prático, de usinagem de um certo número de peças, que pode ser aplicado em tornos mais novos como no caso das máquinas de comando numérico e também para a verificação das máquinas após uso, para identificar falhas quando peças defeituosas começarem a aparecer. Portanto, o teste de Capabilidade de máquinas é uma ferramenta preciosa da manutenção preventiva e na busca por reduzir ao máximo a produção de peças defeituosas.

Para a obtenção do índice de capacidade da máquina seguiu-se o referencial teórico proposto por Gonçalves (1991). Primeiramente calcula-se o valor da média das amplitudes \bar{R} ,

e em seguida o valor de desvio padrão (σ) através das equações (8) e (7) respectivamente. Posto isso é necessário a obtenção da Amplitude da dispersão de trabalho da máquina (A), como mostrado nas equações a seguir:

$$A = 6\sigma \quad (27)$$

Note que, as equações (8) e (7) já foram utilizadas anteriormente para a obtenção dos índices C_p e C_{pk} , entretanto aqui a abordagem é para análise das tolerâncias e cálculo do índice C_M (Capabilidade da máquina), portanto, serão levados em conta apenas os valores de ordem centesimal e milesimal (mesma ordem de unidade das tolerâncias analisadas), desconsiderando o valor da dimensão nominal para os cálculos dos novos valores \bar{R} e σ .

De posse desses valores e da tolerância T especificada previamente, torna-se possível o cálculo do índice de capabilidade da máquina C_M , dado por:

$$C_M = \frac{A}{T} \times 100 \quad (28)$$

O resultado do cálculo da Capabilidade da Máquina será tanto menor quanto maior for o campo de tolerâncias adotado ou quanto menor for a dispersão do trabalho executado, deste modo, para um certo grau de qualidade adotado, a máquina é tão mais precisa quanto menor for o resultado do seu teste de Capabilidade (Gonçalves, 1991).

4 MATERIAIS

Foi planejado que todos os ensaios tenham por objetivo avaliar a capacidade do processo e a capacidade do torno CNC utilizando o método de Controle Estatístico de Processo (CEP). Nesta seção estão explicitados os materiais utilizados para a realização do experimento e a metodologia utilizada para a análise do mesmo.

4.1 Material

O aço SAE 1045 é classificado como um aço médio carbono para beneficiamento e possuindo teores de carbono entre 0,43% e 0,50% em sua composição. Este aço é caracterizado por uma boa soldabilidade, usinabilidade e média resistência mecânica. Após passar por tratamentos térmicos (têmpera, recozimento, revenimento e/ou normalização) é comumente utilizado na indústria automobilística para a fabricação de peças como eixos, engrenagens, peças para indústria mecânica em geral, implementos agrícolas e rodoviários, hastes para cilindros hidráulicos, entre outros. Os valores de sua composição química, de acordo com a norma NBR NM 87 (ABNT, 2000) estão listados na Tabela 4 a seguir.

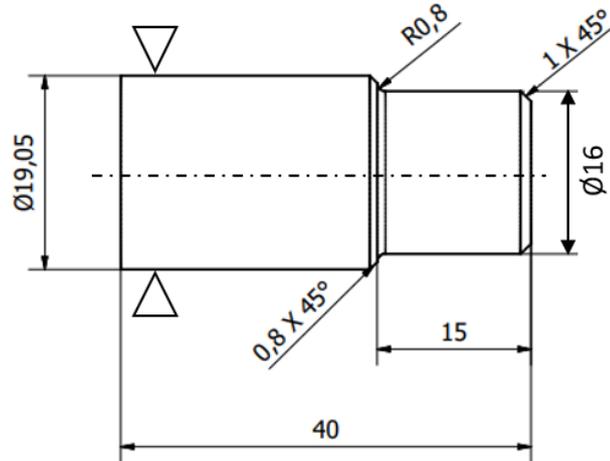
Tabela 4 – Composição química do aço SAE 1045 em %.

AÇO	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1045	0,43-0,50	0,25	0,60-0,90	0,040 máx	0,050 máx	0,17	0,02

Fonte: Norma ABNT NBR NM 87 (ABNT, 2000, p.5).

Sendo assim, o material utilizado para a realização dos ensaios são corpos de prova construídos a partir de uma barra trefilada de aço SAE 1045. A Figura 7 mostra as dimensões do corpo de prova visando a realização dos experimentos. O diâmetro de 19,05 mm foi escolhido para garantir sobremetal para a usinagem do corpo de prova e para a execução dos ensaios.

Figura 7 – Dimensões do corpo de prova de aço SAE 1045



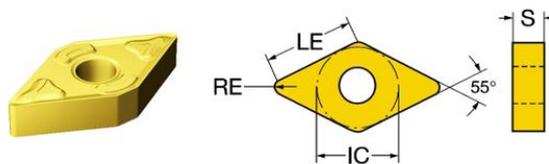
Fonte: Autor.

Os corpos de prova foram confeccionados levando em consideração um comprimento mínimo ideal para a fixação adequada na placa e um comprimento a ser usinado suficiente para a medição do diâmetro.

4.2 Ferramenta de Corte

Optou-se por utilizar inserts intercambiáveis modelo ISO DNMG 15 06 08-XM CG30, revestimento de CVD TiCN+Al₂O₃+TiN, classificação de nível de material 1 P, M e K (TMC1ISO) , com raios de ponta (r_ϵ) 0,8 mm, comprimento efetivo de corte (LE) de 14,704 mm, ângulo de ponta de 55° e espessura (S) de 6,35mm, como representado na Figura 8.

Figura 8 – Inseto tipo D



Fonte: Catálogo Sandvik, 2020.

4.3 Porta-ferramenta

O porta-ferramenta escolhido foi o modelo ISO DDJNR 2525M 15, RC CoroTurn, da marca Sandvik, possui ângulo da aresta de corte da ferramenta (KAPR1) de 93°, largura da haste (B) de 25 mm, altura da haste (H) de 25 mm, comprimento funcional (LF) de 150 mm,

altura funcional (HF) de 25 mm, balanço máximo (OHX) de 39,4 mm e largura funcional (WF) de 32 mm.

Figura 9 – Porta Ferramenta utilizado.



Fonte: Autor.

4.4 Máquina Ferramenta

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Processos de Fabricação (LPF) localizado no Núcleo de Laboratórios de Ensino em Engenharia (NuLEEn) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec-UFSCar). Será utilizado um Torno CNC ROMI modelo Centur 30D; com comando CNC Siemens Sinumerik 828D; potência de 12,5 cv; rotação máxima de 3000 RPM como mostrado na figura abaixo.

Figura 10 – Torno CNC ROMI centur 30D.

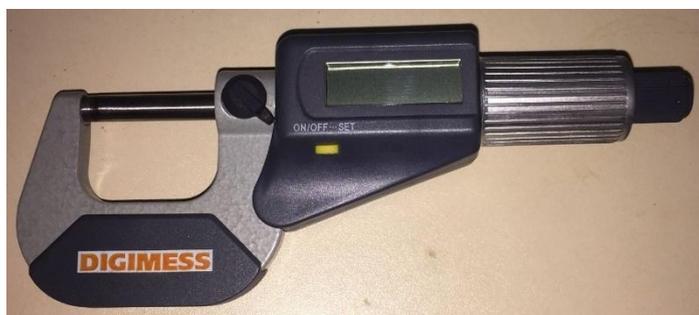


Fonte: Catálogo ROMI, p 4.

4.5 Micrômetro Digital

Para a realização das medidas foi utilizado um micrômetro externo digital DIGIMESS, modelo 110.284-New 202506, com capacidade de 0-25 mm, resolução de 0,001 mm. O micrômetro foi previamente calibrado pelo técnico de modo que estivesse adequado ao uso para evitar desvios nos processos de análise.

Figura 11 – Micrômetro Externo Digital.



Fonte: Autor.

5 MÉTODOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1 Metodologia

É recomendado que a primeira etapa para aplicação do Controle Estatístico do Processo seja analisar os gráficos de controle, para levantar todos os dados necessários quanto a estabilidade e previsibilidade do processo em estudo. Estes gráficos, fornecem informações que servem de base para ajustes e/ou correções em alguma etapa do processo de modo a atingir os objetivos de qualidade para a produção de determinada peça.

Para a segunda etapa, a análise estatística da capacidade do processo foi baseada nas referências teóricas que norteiam este estudo, partiu-se do pressuposto que a característica da qualidade em estudo segue uma distribuição normal, $X \sim N(\mu; \sigma^2)$, e os valores da média (μ) e desvio padrão (σ) foram estimados após a realização dos experimentos, adotando-se um grau de confiabilidade de 99,73%. Entretanto, deve-se notar que há um número infinito de distribuições que podem apresentar a curva em forma de sino, mas que não estão normalmente distribuídas. Sendo assim, é importante salientar ao realizar as análises de capacidade se a distribuição subjacente pode realmente ser modelada por uma distribuição normal. Caso a distribuição normal não for apropriada, mas os índices de capacidade forem obtidos, pode-se comprometer severamente a verdadeira capacidade do processo (PHANPET, et al, 2017).

Como os índices de capacidade do processo são determinados a partir de estimativas do desvio padrão, eles são afetados pelo tamanho da amostra (Graus de liberdade). Em geral, quanto maior a amostra mais fácil detectar pequenas mudanças no processo (MONTGOMERY, 2009). A estabilidade das estimativas do desvio padrão aumenta com o tamanho da amostra, desta maneira, foi definido um valor (n) de 5, os dados foram classificados em 20 subgrupos, medindo-se os diâmetros de cada corpo de prova totalizando em 100 observações, fornecendo uma estimativa mais estável e robusta da capacidade do processo.

Esse tipo de estudo de capacidade geralmente mede o desempenho funcional do produto. Segundo Montgomery (2009), quando o engenheiro pode observar diretamente o processo e controlar os métodos de coleta de dados, considera-se um “verdadeiro estudo de capacidade do processo”. Entretanto, ainda de acordo com o autor, quando dados históricos são utilizados e a observação direta do processo não é possível, ele se refere a isso como um

estudo de caracterização do produto, em que só é possível estimar a distribuição das características de qualidade do produto e não se pode afirmar nada sobre a estabilidade estatística do processo.

A questão a ser avaliada é: Quão capaz é o torno CNC para produzir peças dado um determinado grau de tolerância (IT6 a IT9) para um ajuste js e dimensão nominal de 16 mm? E a resposta é dada de acordo com os índices de capacidades obtidos, pela análise estatística utilizando o CEP.

Na última etapa foram obtidos os valores para os índices de capacidade de acordo com cada grau de tolerância e foi feita uma análise comparativa de modo que foi constatada a capacidade real da máquina em produzir as peças nas devidas faixas de tolerâncias para um diâmetro nominal de 16 mm e ajuste js.

5.2 Procedimento Experimental

Os parâmetros de corte adotados para os experimentos são a velocidade de corte (v_c), o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p), listados na Tabela 5. Nesta tabela foram representados apenas os parâmetros para o passe de acabamento, entretanto no Apêndice A é possível consultar a folha de processos contendo todas as operações de torneamento realizadas.

Tabela 5 – Parâmetros de usinagem

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Velocidade de corte	v_c	150	m/min
Avanço	f	0,25	mm/rot
Profundidade de corte	a_p	0,5	mm

Fonte: Autor.

Primeiramente, as barras de aço SAE 1045 de 0,5 m de comprimento foram devidamente fixadas e cortadas em tarugos de 40 mm de comprimento, na Máquina Serra de Fita Horizontal Gravitacional da marca Starrett, modelo S3120, como visto na Figura 12.

Figura 12 – Corte das barras para produção dos corpos de prova.



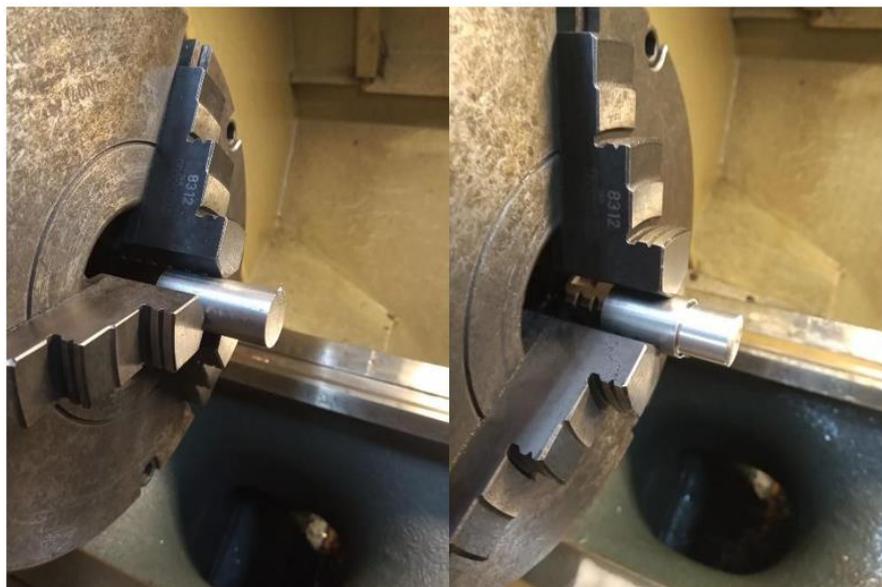
(a) Serra fita.

(b) Processo de corte das barras.

Fonte: Autor.

Em seguida foram preparados os corpos de prova, prendendo o tarugo na placa de fixação do torno, foram realizadas as operações de faceamento e de desbaste, respectivamente para remover qualquer camada residual de impurezas e deixar o diâmetro com sobremetal suficiente para operação de acabamento. Em seguida foi feito o setup do torno CNC, de acordo com a Tabela 5 e foi realizada a operação de acabamento como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 – Corpo de prova após operação de desbaste (a) e acabamento (b).



(a)

(b)

Fonte: Autor.

Os corpos de provas produzidos receberam um revestimento de vaselina de modo a evitar a oxidação devido à umidade do ar e foram armazenados cuidadosamente em sacos plásticos e depositados em um caixa.

Esperou-se um período de 24 horas para a estabilização térmica dos corpos de prova, de modo que fosse possível avançar para a etapa de coleta de dados. Nesta etapa, foram coletadas as amostras, e mediu-se o diâmetro com o auxílio de um micrômetro externo digital localizado sob o desempenho. Foram realizadas duas medições para cada corpo de prova e calculado a média destas, de modo a garantir a repetibilidade do experimento.

Figura 14 – Medição dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 Resultados

Com base, no experimento realizado, foram coletadas as medidas de diâmetros dos corpos de prova como demonstrado na Tabela 6 abaixo. De posse destes dados, foi possível a obtenção das variáveis para a confecção dos gráficos de controle.

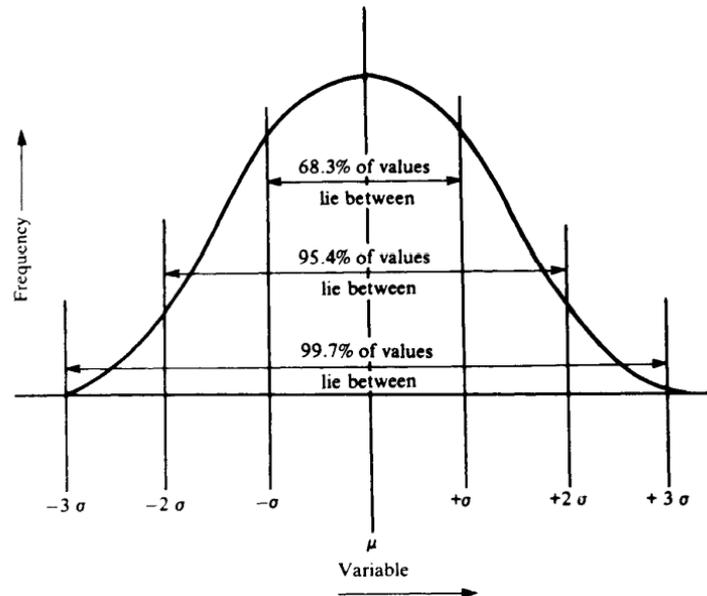
Tabela 6 - Diâmetro medido para os 20 subgrupos. (Cilindro de 16 mm de diâmetro).

Amostra Peças	Desvios em [μm]					Média \bar{x}	Amplitude R
	I	II	III	IV	V		
1	16,002	16,001	16,000	15,995	15,997	15,999	0,007
2	16,001	15,999	16,002	15,999	15,994	15,999	0,008
3	16,000	15,999	15,996	16,006	15,999	16,000	0,010
4	15,999	16,003	16,003	16,002	15,998	16,001	0,005
5	16,004	16,006	16,005	15,999	16,006	16,004	0,007
6	16,002	15,996	16,003	15,998	16,001	16,000	0,007
7	15,997	16,000	16,004	16,000	16,000	16,000	0,007
8	15,999	16,003	16,001	16,002	16,000	16,001	0,004
9	16,000	16,003	15,999	16,001	16,001	16,001	0,004
10	15,998	16,006	15,998	16,000	16,003	16,001	0,008
11	15,999	16,001	15,998	16,000	16,005	16,001	0,007
12	16,001	16,002	16,000	15,999	16,002	16,001	0,003
13	16,002	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	0,002
14	16,000	15,999	16,001	16,001	16,002	16,001	0,003
15	15,998	16,000	16,001	16,002	16,005	16,001	0,007
16	16,005	16,002	16,001	15,999	16,000	16,001	0,006
17	15,998	16,001	16,001	15,999	16,002	16,000	0,004
18	16,001	16,000	16,002	16,001	16,003	16,001	0,003
19	16,001	16,001	16,005	15,998	16,004	16,002	0,007
20	16,001	16,003	16,002	15,999	15,998	16,001	0,005

Fonte: Autor.

Neste estudo, foi admitido previamente que os dados seguem uma distribuição normal com variação em torno da média de $\mu \pm 3\sigma$, de acordo com os autores Bothe (1997) e Oakland (2003), para uma especificação bilateral, o que resulta em um grau de confiança de 99,73% como pode ser visto na Figura 15 a seguir.

Figura 15 – Distribuição normal de acordo com nível sigma.

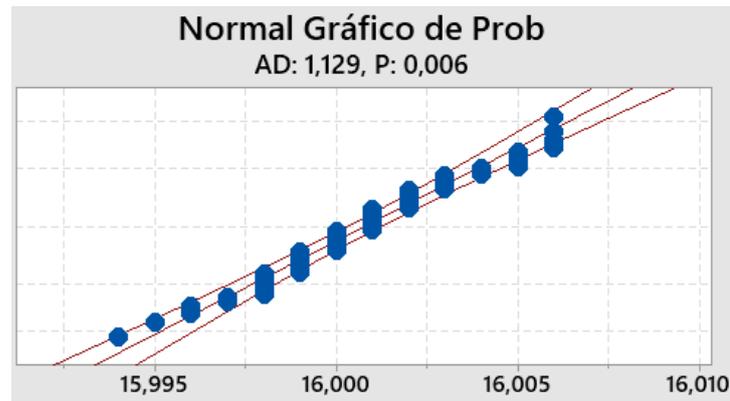


Fonte: Oakland (2003)

Phanphet et. al (2017), em seu trabalho, adota um nível de significância α de 0,005 em oposição aos níveis mais tradicionais utilizados, o que corresponde a um grau de confiança de 99,5% para a sua análise de capacidade. Sendo assim, para o atual estudo o valor adotado para o nível de significância, corresponde a α de 0,0027, em contrapartida dos valores tradicionalmente utilizados em outros estudos.

A partir do gráfico de probabilidade Normal na Figura 16 abaixo deve-se fazer algumas considerações de modo a verificar de fato a normalidade do parâmetro analisado, de acordo com o teste de Hipóteses, para um nível de significância α de 0,0027. Da teoria estatística, sabe-se que se p-valor for menor ou igual ao nível de significância, deve-se rejeitar a hipótese nula (H_0) e concluir que os dados não seguem uma distribuição normal. Entretanto se p-valor for maior que o nível de significância não se deve rejeitar a hipótese nula (H_0), pois não há evidências suficientes para concluir que os dados não seguem uma distribuição normal.

Figura 16 – Gráfico do teste de Normalidade.



Fonte: Autor.

O teste de Normalidade mostra que tem indícios de que se pode aceitar o valor da Hipótese nula, H_0 : os dados seguem uma distribuição Normal; em contrapartida, da hipótese alternativa H_1 : os dados não seguem uma distribuição Normal com o nível de significância $\alpha \leq 0,0027$. Isto se deve ao fato de que o p-valor testado foi de 0,006 que é maior que 0,0027. Tendo isso em vista, rejeitou-se a hipótese alternativa H_1 , adotando a hipótese nula H_0 , portanto, não tem indícios de que os parâmetros não seguem uma distribuição Normal.

Feitas as considerações, tornou-se possível seguir para análise estatística dos gráficos de controle onde foi verificado a estabilidade e previsibilidade do processo de torneamento.

Nas observações registradas, tem-se uma série de resultados de medição variável para o número de corpos de provas usinados. Para analisar a capacidade do processo, as técnicas estatísticas de gráficos de controle de qualidade podem ser implementadas da seguinte forma:

Cálculo da média das amplitudes, utilizando-se da Equação (6) repetida abaixo.

$$\bar{R} = \frac{\sum_i^m R_i}{m} = \frac{0,114}{20} = 0,0057 \quad (6)$$

As constantes A_2 , D_3 , D_4 , d_2 e d_3 , foram adotadas de acordo com o apêndice VI de Montgomery 4ª ed. (2009), e estão representadas na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 – Fatores para Construção de Gráficos de Controle.

Observações na Amostra	Gráfico para a Média	Gráfico para Amplitudes			
	Fator para limites de Controle (\bar{X})	Fatores para Linha Central		Fatores para Limites de Controle (R)	
n	A ₂	d ₂	d ₃	D ₃	D ₄
5	0,577	2,326	0,864	0	2,115

Fonte: Adaptado de Montgomery, 2009.

Logo, os limites de controles foram calculados pelas Equações (20) (23) e (24):

$$LSC_{\bar{R}} = D_4 \bar{R} \quad (20)$$

$$LIC_{\bar{R}} = D_3 \bar{R} \quad (23)$$

$$LC_{\bar{R}} = \bar{R} \quad (24)$$

Para a construção do gráfico de \bar{X} foi necessário encontrar a média das médias do processo, por meio da Equação (2):

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_i^m \bar{X}_i}{m} = \frac{320,015}{20} = 16,001 \quad (2)$$

Em seguida foram calculados os limites de controle para o gráfico de controle da média das médias $\bar{\bar{X}}$. De acordo com as Equações (15) (16) e (17):

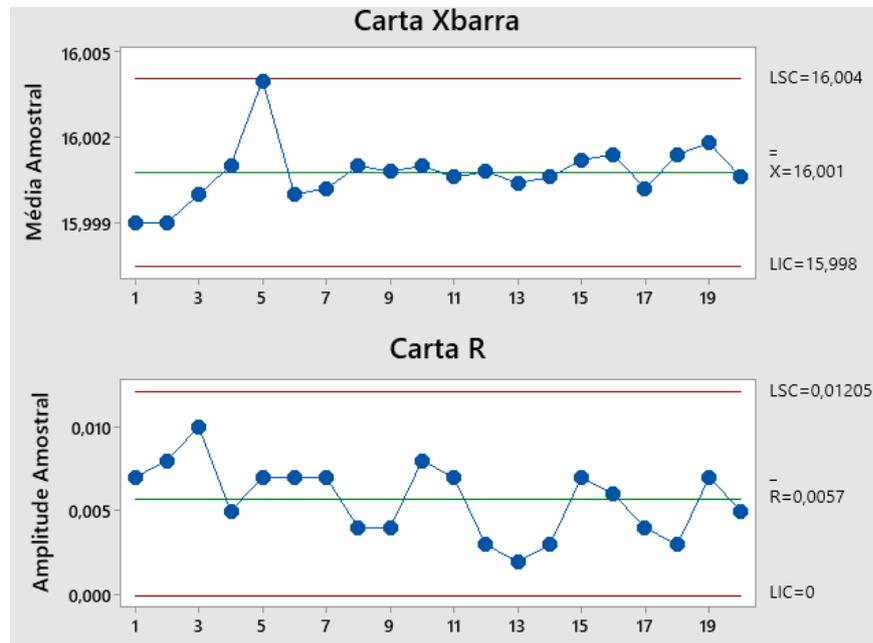
$$LSC_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} + 3A_2 \quad (13)$$

$$LIC_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} - 3A_2 \quad (14)$$

$$LC_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} \quad (15)$$

De posse dos resultados obtidos o gráfico de controle da média das médias $\bar{\bar{X}}$ e o gráfico de controle da amplitude R foram plotados, como mostrados na Figura 17 a seguir.

Figura 17 – Gráficos de Controle.



Fonte: Autor.

Notou-se que em ambos os gráficos todos os valores dos dados obtidos para o diâmetro estão dentro dos limites de controle. Sendo assim, pode se considerar que o processo de torneamento para o Torno CNC é um processo previsível, estável e está sob controle estatístico.

Baseado na Tabela 6 acima, calculou-se o valor para o desvio padrão global (amostral) S . Este desvio padrão global é o desvio padrão de todas as medições e é uma estimativa da variação global do processo.

$$S = \sigma_{global} = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j (X_{ij} - \bar{X})^2}{(\sum n_i) - 1}} = 0,002397 \quad (29)$$

Em seguida utilizando-se da Equação (6), obteve-se o valor para o desvio padrão dentro $\hat{\sigma}$ (estimativa da variação dentro dos subgrupos). Este desvio padrão utiliza apenas a variabilidade dentro de cada subgrupo para ser estimado.

$$\hat{\sigma} = \sigma_{dentro} = \frac{R}{d_2} = 0,002451 \quad (6)$$

Para comparar as medidas de capacidade do processo na operação de torneamento utilizando o torno CNC, é necessário comparar as duas estimativas de desvio padrão σ_{global} e σ_{dentro} . Nota-se que a variação total no processo de torneamento é a soma da variabilidade interna e geral do subgrupo e como os valores destes desvios padrões obtidos são bem próximos, tem-se um maior indício de que o processo é estável confirmando a análise dos gráficos de controle (\bar{X} e R).

Deste modo, após a verificação da estabilidade do processo por meio da teoria estatística, foi feito o estudo de capacidade do processo, calculando-se os valores dos índices de capacidade para a constatação do desempenho real do processo.

6.1.1 Análise para IT6

Para a análise referente ao grau de tolerância IT6 e dos índices de capacidade do processo, adotou-se um valor alvo para o diâmetro do cilindro de 16 mm, com ajuste js6 e uma faixa de tolerância correspondente a $\pm 5,5 \mu\text{m}$, de acordo com a NBR 6158 (1995). Entretanto, devido a resolução do micrometro foi necessário arredondar para cima o valor da tolerância e consequentemente o LSE = 16,006 mm e LIE = 15,994 mm.

Para a estimativa dos índices C_p e C_{pk} utilizou-se as Equações (25) e (26), respectivamente:

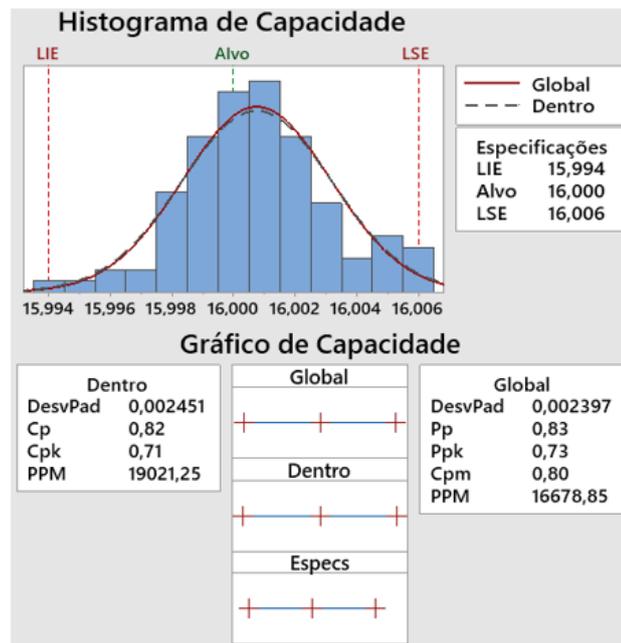
$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} = \frac{16,006 - 15,994}{6(0,002451)} = 0,82 \quad (25)$$

$$C_{pk} = \left[\frac{LSE - \bar{X}}{3\sigma}, \frac{\bar{X} - LIE}{3\sigma} \right] = \min \left[\frac{16,006 - 16,001}{3(0,002451)}, \frac{16,001 - 15,994}{3(0,002451)} \right] = 0,71 \quad (26)$$

Analisando-se os valores dos índices $C_p = 0,82$ e $C_{pk} = 0,71$ e comparando com as Tabelas 1 e 2 representadas no subtópico (3.5) nota-se que para o valor do índice C_p este processo é considerado fraco, segundo Bothe (1997). Para o valor do índice C_{pk} , de acordo com Kotz e Lovelace (1998), este processo apresenta uma quantidade relevante de peças não conformes.

A Figura 18 ilustra o gráfico de capacidade do processo de torneamento, evidenciando que este processo não apresentou resultados satisfatórios para atingir o objetivo de fabricar peças no diâmetro exigido de 16 mm para um grau de tolerâncias IT6 com ajuste js6. Neste estudo foi adotado o valor de 16 mm pela questão do custo do material para realizar os experimentos.

Figura 18 – Gráfico da Capacidade do Processo IT6



Fonte: Autor.

Notou-se que a distribuição está centrada e há uma alta variação em relação aos limites de especificação, resultando em um processo não satisfatório, que produz muitas peças fora de especificações. Isto pode ser visto de acordo com a quantidade de peças produzidas por milhão (PPM). Ao analisar o processo dentro dos subgrupos, tem-se um valor de 19021,25 (PPM), enquanto que, para a análise do processo global tem-se um valor de 16678,85 (PPM).

Para a análise da capacidade da máquina (C_M), seguindo-se o referencial teórico proposto por Gonçalves (1991), calculou-se o valor deste índice através das Equações (27) e (28):

$$A = 6\sigma = 6(100)0,002451 = 1,47 \quad (27)$$

Lembrando que na Equação (27), houve a necessidade de multiplicar o valor de σ por 100 para que fosse considerado apenas os valores milesimal e centesimal (referentes a ordem dos valores de tolerâncias).

$$C_M = \frac{A}{T} \times 100 = \frac{1,47}{11} \times 100 = 13,37 \quad (28)$$

Portanto, segundo Gonçalves, o valor obtido para o índice C_M referente a um grau de tolerância IT6 para uma dimensão nominal de 16 mm, mostra que o torno CNC é capaz de produzir as peças nas dimensões desejadas, com precisão razoável.

6.1.2 Análise para IT7

Para a análise referente ao grau de tolerância IT7 e dos índices de capacidade do processo, adotou-se um valor alvo para o diâmetro do cilindro de 16 mm, com qualidade de acabamento js7 e uma faixa de tolerância correspondente a $\pm 9 \mu\text{m}$, de acordo com a NBR 6158 (1995), conseqüentemente o LSE = 16,009 mm e LIE = 15,991 mm.

Para a estimativa dos índices C_p e C_{pk} utilizou-se as Equações (25) e (26), respectivamente:

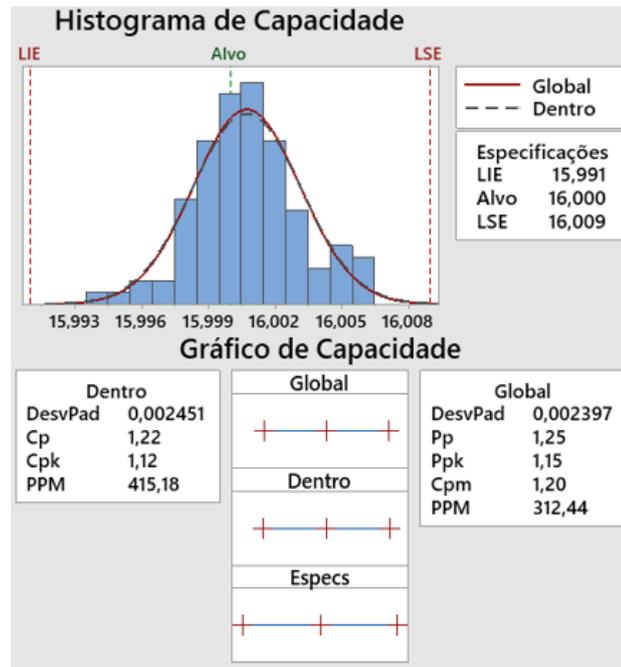
$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} = \frac{16,009 - 15,991}{6(0,002451)} = 1,22$$

$$C_{pk} = \left[\frac{LSE - \bar{X}}{3\sigma}, \frac{\bar{X} - LIE}{3\sigma} \right] = \min \left[\frac{16,009 - 16,001}{3(0,002451)}, \frac{16,001 - 15,991}{3(0,002451)} \right] = 1,12$$

Analisando-se os valores dos índices $C_p = 1,22$ e $C_{pk} = 1,12$ e comparando com as Tabelas 1 e 2 representadas no subtópico (3.5) nota-se que para o valor do índice C_p este processo é considerado moderado, segundo Bothe (1997). Para o valor do índice C_{pk} , de acordo com Kotz e Lovelace (1998), este processo apresenta uma quantidade aceitável de peças não conformes.

A Figura 19 ilustra o gráfico de capacidade do processo de torneamento, evidenciando que este processo é capaz de fabricar peças no diâmetro exigido de 16 mm para um grau de tolerâncias IT7 com ajuste js7.

Figura 19 – Gráfico da Capacidade do Processo IT7



Fonte: Autor.

Notou-se que a distribuição está centrada e há uma pequena variação em relação aos limites de especificação, resultando em um processo moderado, que é capaz de produzir as peças nas especificações estabelecidas. Isto pode ser visto de acordo com a quantidade de peças produzidas por milhão (PPM). Ao analisar o processo dentro dos subgrupos, tem-se um valor de 415,18 (PPM), enquanto que, para a análise do processo global tem-se um valor de 312,44 (PPM).

Para a análise da capacidade da máquina (C_M) e de posse do valor de $A = 1,47$ calculado anteriormente, utilizando a Equação (28) obteve-se:

$$C_M = \frac{A}{T} \times 100 = \frac{1,47}{18} \times 100 = 8,17$$

Portanto, segundo Gonçalves, o valor obtido para o índice C_M referente a um grau de tolerância IT7 para uma dimensão nominal de 16 mm, mostra que o torno CNC é capaz de produzir as peças nas dimensões desejadas, com boa precisão.

6.1.3 Análise para IT8

Para a análise referente ao grau de tolerância IT8 e dos índices de capacidade do processo, adotou-se um valor alvo para o diâmetro do cilindro de 16 mm, com ajuste js8 e uma faixa de tolerância correspondente a $\pm 13,5 \mu\text{m}$, de acordo com a NBR 6158 (1995), foi

necessário arredondar o valor para cima devido a resolução do micrometro, e consequentemente o LSE = 16,014 mm e LIE = 15,986 mm.

Para a estimativa dos índices C_p e C_{pk} utilizou-se as Equações (25) e (26), respectivamente:

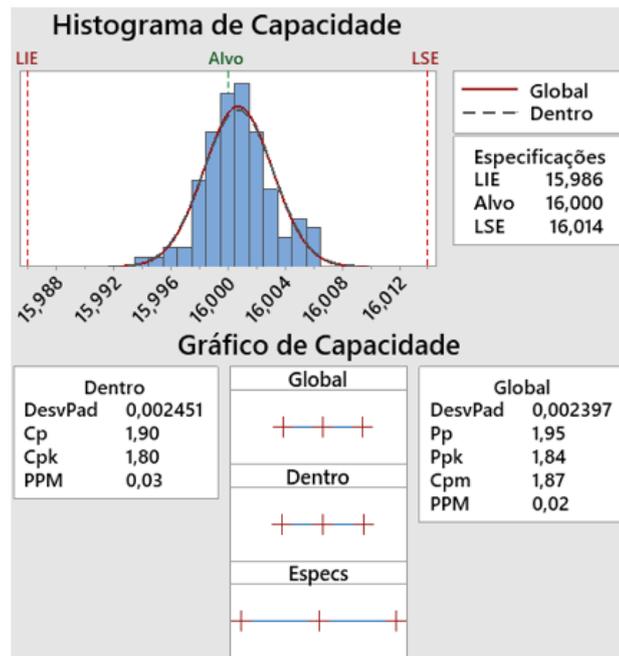
$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} = \frac{16,014 - 15,986}{6(0,002451)} = 1,90$$

$$C_{pk} = \left[\frac{LSE - \bar{X}}{3\sigma}, \frac{\bar{X} - LIE}{3\sigma} \right] = \min \left[\frac{16,014 - 16,001}{3(0,002451)}, \frac{16,001 - 15,986}{3(0,002451)} \right] = 1,80$$

Analisando-se os valores dos índices $C_p = 1,90$ e $C_{pk} = 1,80$, nota-se que para o valor do índice C_p este processo é considerado muito bom, segundo Bothe (1997). Para o valor do índice C_{pk} , de acordo com Kotz e Lovelace (1998), este processo apresenta uma pequena quantidade de peças não conformes.

A Figura 20 abaixo ilustra o gráfico de capacidade do processo de torneamento, evidenciando que este processo conseguiu atingir o objetivo de fabricar peças no diâmetro exigido de 16 mm para um grau de tolerâncias IT8 com ajuste js8.

Figura 20 – Gráfico da Capacidade do Processo IT8



Fonte: Autor.

Notou-se que a distribuição está centrada e há uma pequena variação em relação aos limites de especificação, resultando em um processo muito bom, que é capaz de produzir as

peças nas especificações estabelecidas. Isto pode ser visto de acordo com a quantidade de peças produzidas por milhão (PPM). Ao analisar o processo dentro dos subgrupos, tem-se um valor de 0,03 (PPM), enquanto que, para a análise do processo global tem-se um valor de 0,02 (PPM).

Para a análise da capacidade da máquina (C_M) e de posse do valor de $A = 1,47$ calculado anteriormente, utilizando a Equação (28) obteve-se:

$$C_M = \frac{A}{T} \times 100 = \frac{1,47}{27} \times 100 = 5,45$$

Portanto, segundo Gonçalves, o valor obtido para o índice C_M referente a um grau de tolerância IT8 para uma dimensão nominal de 16 mm, mostra que o torno CNC é capaz de produzir as peças nas dimensões desejadas, com alta precisão.

6.1.4 Análise para IT9

Para a análise referente ao grau de tolerância IT9 e dos índices de capacidade do torno CNC, adotou-se um valor alvo para o diâmetro do cilindro de 16 mm, com qualidade de acabamento js9 e uma faixa de tolerância correspondente a $\pm 21,5 \mu\text{m}$, de acordo com a NBR 6158 (1995), foi necessário arredondar o valor para cima devido a resolução do micrometro, e consequentemente o LSE = 16,022 mm e LIE = 15,978 mm.

Para a estimativa dos índices C_p e C_{pk} utilizou-se as Equações (25) e (26), respectivamente:

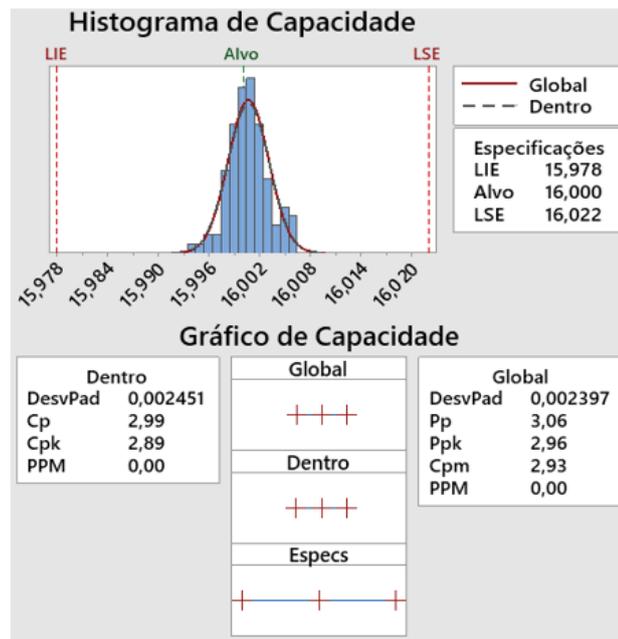
$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} = \frac{16,022 - 15,978}{6(0,002451)} = 2,99$$

$$C_{pk} = \left[\frac{LSE - \bar{X}}{3\sigma}, \frac{\bar{X} - LIE}{3\sigma} \right] = \min \left[\frac{16,022 - 16,001}{3(0,002451)}, \frac{16,001 - 15,978}{3(0,002451)} \right] = 2,89$$

Analisando-se os valores dos índices $C_p = 2,99$ e $C_{pk} = 2,89$, nota-se que para o valor do índice C_p este processo é considerado excelente, segundo Bothe (1997). Para o valor do índice C_{pk} , de acordo com Kotz e Lovelace (1998), este processo não apresenta quantidades significativas de peças não conformes.

A Figura 21 abaixo ilustra o gráfico de capacidade do processo de torneamento, evidenciando que este processo conseguiu atingir o objetivo de fabricar peças no diâmetro exigido de 16 mm para um grau de tolerâncias IT9 com ajuste js9.

Figura 21 – Gráfico da Capacidade do Processo IT9



Fonte: Autor.

Notou-se que a distribuição está centrada e há uma variação muito pequena em relação aos limites de especificação, resultando em um processo excelente, que é capaz de produzir as peças nas especificações estabelecidas. Para este caso, o número de peças defeituosas por milhão é insignificante.

Para a análise da capacidade da máquina (C_M) e de posse do valor de $A = 1,47$ calculado anteriormente, utilizando a Equação (28) obteve-se:

$$C_M = \frac{A}{T} \times 100 = \frac{1,47}{43} \times 100 = 3,42$$

Portanto, segundo Gonçalves, o valor obtido para o índice C_M referente a um grau de tolerância IT9 para uma dimensão nominal de 16 mm, mostra que o torno CNC é capaz de produzir as peças nas dimensões desejadas, com elevada precisão.

A Tabela 8 a seguir sumariza os valores encontrados para os índices de capacidade, referentes as análises realizadas.

Tabela 8 – Índices de Capabilidade

Índices de Capabilidade para um afastamento "js"				
	IT6	IT7	IT8	IT9
C_p	0,82	1,22	1,90	2,99
C_{pk}	0,71	1,12	1,80	2,89
C_M	13,37	8,17	5,45	3,42

7 CONCLUSÕES

Constatou-se que o processo de torneamento, nas condições utilizadas, para o torno CNC é previsível e está sob controle estatístico, evidenciando assim, que todos os dados obtidos respeitaram os limites de controle. Pode-se inferir também, que o processo está sujeito apenas as causas crônicas (comuns), e que não houve a influência de causas especiais como por exemplo, erros do operador, uso de ferramentas desgastadas e maquinário descalibrado, dentre outros. Assim, as cartas de controle obtidas, são ótimas ferramentas para o monitoramento da capacidade produtiva deste processo para um determinado período. Além disso, os gráficos de controle permitem a fácil comparação entre desvios da média possibilitando avaliar os resultados de mudanças no processo e buscar soluções quando necessário.

Após as análises de resultados foi possível concluir que, para uma dimensão de 16 mm, considerando a faixa de índices de tolerância variando de IT7 a IT9 e afastamento “js”, o processo de torneamento para o torno CNC é capaz de produzir as peças de acordo com as especificações estabelecidas. Como já era esperado, a medida que as análises progrediram para faixas de tolerâncias mais abertas o processo também era cada vez mais capaz, e consequentemente, a produção de peças não conformes em partes por milhão era reduzida, como constatado no tópico de resultados.

No que diz respeito a análise para o grau de tolerância IT6, pode-se constatar que apesar de não ter apresentado um resultado satisfatório, para a dimensão nominal de 16 mm. Entretanto, caso a dimensão nominal fosse maior que 31 mm, ter-se-ia um outro resultado que poderia talvez ser considerado satisfatório, pois os valores de tolerância para os mesmos IT's aumentariam, resultando em valores de C_p e C_{pk} mais altos (consultar Apêndice B). Portanto, conclui-se que o processo de torneamento para o torno CNC é capaz de produzir peças para uma dimensão de 16 mm, para os graus de tolerância variando de IT7 a IT9, mas com tendência a IT6.

Para a análise da capacidade da máquina, constatou-se que quanto maior a faixa de tolerâncias mais capaz o torno CNC é de produzir as peças, demonstrado pelo índice CM calculado.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se fazer o estudo de capacidade para dimensões maiores que 30 mm, para averiguar a capacidade do torno CNC, dados os mesmos graus de tolerâncias aqui abordados e fazer um estudo de repetibilidade e reprodutibilidade

para avaliar a variação do sistema de medição. Também é possível variar os processos, como por exemplo, realizar estudo de capacidade para o processo fresamento, torneamento cilíndrico interno, retificação etc.

Outra sugestão seria para análise de capacidade referente às rugosidades que este torno CNC é capaz de atingir para avaliar a qualidade superficial das peças produzidas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKKUŞ, H. Experimental and Statistical Investigation of Surface Roughness in Turning of AISI 4140 Steel. **Sakarya University Journal of Science**, v. 23, n. 44066, p. 775–781, 2019

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 87: Aço carbono e ligados para construção Mecânicas - Designação e composição química**. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6158: Sistema de tolerâncias e ajustes**. Rio de Janeiro, 1995.

BONANDI, M (2012), Estudo das condições de Corte no Torneamento do Aço AISI M4, endurecido, utilizando a Metodologia de Experimentos. Dissertação de Mestrado. Departamento de Pós-Graduação de Engenharia de Produção, Universidade Nove de Julho. São Paulo, 2012.

BOTHE, D. R. *Measuring Process Capability – Techniques and Calculations for Quality and Manufacturing Engineers*. McGraw-Hill, 1997.

BOTTANI, E.; MONTANARI, R.; VOLPI, A.; TEBALDI, L; DI MARIA, G. Statistical Process Control of assembly lines in manufacturing plant: Process Capability assessment. *International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing*, 1024-033, 2021.

CARPINETTI, L.C.R. *Controle da Qualidade de Processo*, 2ª. Ed. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2003.

ERAMEH, A.; RAJI, N.; DUROJAYE, R.; YUSSOUFF, A. (2016) Process Capability Analysis of a Centre Lathe Turning Process. *Engineering*, **8**, 79-85.
doi: [10.4236/eng.2016.83010](https://doi.org/10.4236/eng.2016.83010).

FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. 1ª. Ed. **São Paulo: Edgard Blücher**, 1970.

GONÇALVES, A.C, *Guia Prático para o Recebimento de Tornos Convencionais e a Comando Numérico*. 1ª Ed. **São Paulo: Edgard Blücher**, 1991.

HESSAINIA, Z.; BELBAH, A.; YALLESE, M. A.; MABROUKI, T.; RIGAL, J. F. On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 46, n. 5, p. 1671–1681, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.12.016>.

KAHRAMAN, F., ESME, U., KULEKCI, M.K. and KAZANCOGLU, Y. (2012) Process Capability Analysis in Machining for Quality Improvement in Turning Operations. *Material Testing*, 54, 120-125. <http://dx.doi.org/10.3139/120.110306>.

KANE, V. E. Process Capability Indices. *Journal of Quality Technology*, 18(1), Jan. 1986. <http://science.kennesaw.edu/~vkane/LSSInfo/KaneJQT>.

KOTZ, S.; JOHNSON, N. L. *Process Capability Indices*. London: Chapman & Hall, 1993.

KOTZ, S.; LOVELACE, C. R. *Process Capability Indices in Theory and Practice*, New York: Arnold, 1998.

MACHADO, Álisson Rocha et. al. *Teoria da Usinagem dos Materiais*, 1ª. Ed. **São Paulo: Blücher**, 2009.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 4ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

OAKLAND, J (2003). "Statistical Process Control". Oxford: Butterworth-Heinemann, Fifth edition.

PHANPHET, S; SUKPRASERT, N; CHIMBOONMA,P; THONGYOD, W; BANGPHAN, S; BANGPHAN, P. Process Capability Analysis of a Turning Operation. *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, Hong Kong, Vol II, March, 2017.

RAJVANCHI, P.K. and BELOKAR, R.M. (2012) Improving the Process Capability of a Boring Operation by the Application of Statistical Techniques. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3, 1-6.
<http://www.ijser.org/viewPaperDetail.aspx?I014630>.

RODRIGUES, L.A.A.C (2001) Índices de Avaliação de Processos: Abordagem Univariada e Multivariada, *Dissertação de Mestrado*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

ROMI, Catálogo: Tornos CNC Linha Centur, 2017; p 4

SANDVIK, Catálogo: Ferramentas para Torneamento, 2020.

SHARMA, G.V.S.S. and RAO, P.S. (2013) Process Capability Improvement of an Engine Connecting Rod Machining Process. *Journal of Industrial Engineering*, 9, 1-9.
<http://dx.doi.org/10.1186/2251-712x-9-37>

SHEWHART, W. A. "Economic quality control of manufactured product," in *The Bell System Technical Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 364-389, April 1930. Disponível em doi: [10.1002/j.1538-7305.1930.tb00373.x](http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1930.tb00373.x).

SHINDE, J.H. and KATIKAH, R.S. (2012) Importance of Process Capability and Process Performance Indices in Machine Tool. *International Journal of Research in Engineering & Applied Sciences*, 2, 1211-1217.

SHREEHAH, T.A.A. (2010) Extending the Technological Capability of Turning Operation. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2, 192-201. www.ijest-ng.com/ijest-ng-vol2-no1-pp192-201 <http://dx.doi.org/10.4314/ijest.v2i1.59112>.

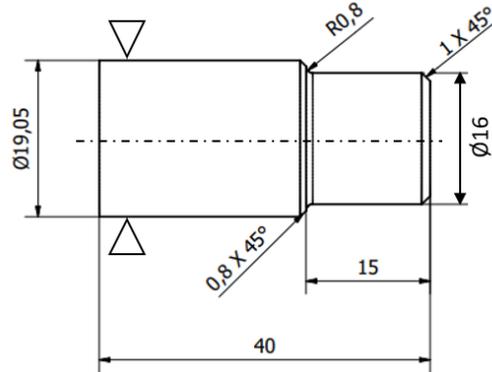
SOUZA, A. J. Processos de Fabricação por Usinagem, Parte 1 Fundamentos da Usinagem de Materiais, GPFAI-DEMEC-UFRGS/Apostila, 2011.

TRENT, M.C., WRIGHT, P.K., 2000. **“Metal cutting principles - 4th edition”**, Butterworth-Heinemann, USA.

WANARE, S.P. and GUDADHE, M.V. (2013) Performance Analysis of Vertical Machining Center through Process Capability. International Journal of Innivations in Engineering and Technology, 2, 198-207.

WHEELER, D. J. Beyond Capability Confusion – The Average Cost-of-Use. Knoxville, Tennessee, SPC Press, 1999.

9 APÊNDICE A – Folha de processos



	Condição	Máquina	
10	Fixar o tarugo de $\varnothing 19,05$ mm no eixo-arvore. Facear a extremidade e chanfrar $1 \times 45^\circ$.	Torno CNC.	<p>Technical drawing showing the diameter $\varnothing 19,05$ mm and the total length of 40 mm.</p>
20	Torneamento de desbaste. $\varnothing 19,05$ mm x 15 mm. Passe 1 - $vc = 130$ m/min $ap = 0,525$ mm $ft = 0,2$ mm Passe 2 - $vc = 130$ m/min $ap = 0,5$ mm $ft = 0,2$ mm	Torno CNC.	<p>Technical drawing showing the diameter $\varnothing 19,05$ mm, the length of the reduced diameter section (15 mm), the diameter of the reduced diameter section ($\varnothing 17$ mm), and the 1 mm overmetal.</p>
30	Torneamento de Acabamento $\varnothing 17$ mm x 15 mm. $Vc = 150$ m/min $Ap = 0,5$ mm $Ft = 0,1$ mm	Torno CNC.	<p>Technical drawing showing the diameter $\varnothing 19,05$ mm, the length of the reduced diameter section (15 mm), the diameter of the reduced diameter section ($\varnothing 16$ mm), the chamfer at the end of the reduced diameter section ($1 \times 45^\circ$), the radius at the transition ($R0,8$), and the chamfer at the end of the main diameter section ($0,8 \times 45^\circ$).</p>

9 APÊNDICE B – Análise de js6 para dimensão de 31mm

Análise referente ao grau de tolerância IT6 e dos índices de capacidade do processo, adotando-se um valor alvo para o diâmetro do cilindro de 31 mm, com qualidade de acabamento js6 e uma faixa de tolerância correspondente a $\pm 8 \mu\text{m}$, de acordo com a NBR 6158 (1995), conseqüentemente o LSE = 31,008 mm e LIE = 30,992 mm.

Para a estimativa dos índices C_p e C_{pk} utilizou-se as Equações (25) e (26), respectivamente:

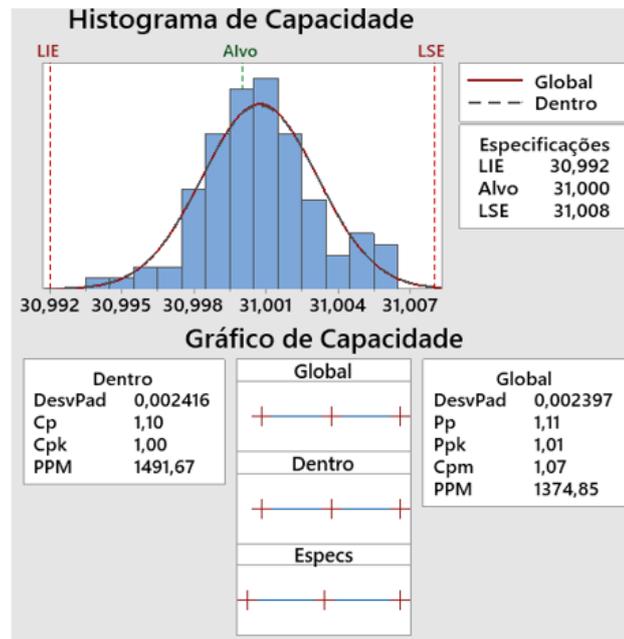
$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} = \frac{31,008 - 30,992}{6(0,002451)} = 1,10$$

$$C_{pk} = \left[\frac{LSE - \bar{X}}{3\sigma}, \frac{\bar{X} - LIE}{3\sigma} \right] = \min \left[\frac{31,008 - 31,001}{3(0,002451)}, \frac{31,001 - 30,991}{3(0,002451)} \right] = 1,00$$

Analisando-se os valores dos índices $C_p = 1,10$ e $C_{pk} = 1,00$ e comparando com as Tabelas 2 e 3 representadas no subtópico (3.5) nota-se que para o valor do índice C_p este processo é considerado moderado, segundo Bothe (1997). Para o valor do índice C_{pk} , de acordo com Kotz e Lovelace (1998), este processo apresenta uma quantidade aceitável de peças não conformes.

A Figura 22 abaixo ilustra o gráfico de capacidade do processo de torneamento, evidenciando que este processo é capaz de fabricar peças no diâmetro exigido de 31 mm para um grau de tolerâncias IT6 com ajuste js6.

Figura 22 – Gráfico da Capacidade do Processo IT6 para 31mm



Fonte: Autor.

Notou-se que a distribuição está centrada e há uma pequena variação em relação aos limites de especificação, resultando em um processo moderado, que é capaz de produzir as peças nas especificações estabelecidas. Isto pode ser visto de acordo com a quantidade de peças produzidas por milhão (PPM). Ao analisar o processo dentro dos subgrupos, tem-se um valor de 1491,67 (PPM), enquanto que, para a análise do processo global tem-se um valor de 1374,85 (PPM).

Para a análise da capacidade da máquina (C_M) e de posse do valor de $A = 1,47$ calculado anteriormente, utilizando a Equação (28) obteve-se:

$$C_M = \frac{A}{T} \times 100 = \frac{1,47}{16} \times 100 = 9,19 \quad (28)$$

Portanto, segundo Gonçalves, o valor obtido para o índice C_M referente a um grau de tolerância IT6 para uma dimensão nominal de 31 mm, mostra que o torno CNC é capaz de produzir as peças nas dimensões desejadas, com boa precisão.