

AVALIAÇÃO DA USINAGEM DO AÇO SAE 1045 COM RELAÇÃO AOS CRITÉRIOS DE RUGOSIDADE E DESGASTE DE FLANCO

Hiago Zeferino Bon¹

Luiz Carlos de Cesaro Cavaler²

Resumo:

O presente trabalho abordou a comparação entre dois insertos TNMG 160408 de fabricantes diferentes, no processo de usinagem a seco do aço SAE 1045. Inicialmente falando sobre a usinagem convencional e seus processos, as ferramentas de corte e mostrando as propriedades básicas do aço SAE 1045. Como métodos de avaliação, foram utilizados desgaste de flanco máximo (V_{Bmax}) dos insertos utilizados na usinagem dos corpos de prova, os parâmetros de rugosidade (R_a , R_q e R_z) da superfície usinada e por fim o erro de forma. Os ensaios foram realizados em um torno mecânico universal convencional, com os corpos de prova todos do mesmo comprimento e diâmetro se deu início a usinagem. Para avaliação da usinagem manteve-se sempre os mesmos parâmetros de velocidade (v_c), avanço (f) e profundidade (a_p) para cada corpo de prova, para assim ter uma comparação padrão entre os dois insertos. Avaliando através um estereoscópio o desgaste de flanco máximo (V_{Bmax}) dos insertos, já a rugosidade foi medida com o auxílio de um rugosímetro de alta precisão e por fim o erro de forma com a máquina de medição por coordenadas baseando-se na cilíndricidade. Afim de comparar qual dos dois insertos TNMG obteve o melhor desempenho na usinagem, entre os fatores de desgaste de flanco máximo, rugosidade e erro de forma. Os resultados obtidos dessas análises indicam as diferenças de desempenho entre os dois insertos, fornecendo informações valiosas para os processos e seleção adequada de ferramentas na usinagem do aço SAE 1045.

Palavras-chave: Aço SAE 1045. Usinagem. Desgaste. Inseto. Torno mecânico.

¹ Graduando em Engenharia mecânica no semestre letivo de 2023-01. E-mail: hiagobon@hotmail.com

² Professor do Centro Universitário UniSATC E-mail:

1 INTRODUÇÃO

A usinagem convencional do aço SAE 1045 é amplamente utilizada na indústria mecânica e, a escolha da ferramenta e dos parâmetros de corte: velocidade de corte avanço e profundidade, pode influenciar significativamente a qualidade e a eficiência da produção (SILVA, 2016, p. 1-9). Esta técnica é fundamental para a fabricação de peças precisas e componentes mecânicos de alta qualidade.

No entanto, a seleção adequada dos parâmetros de usinagem nem sempre é evidente, e o uso de ferramentas de corte inadequadas ou a definição incorreta de avanço e velocidade de corte pode resultar em problemas como desgaste prematuro das ferramentas, rugosidade excessiva na superfície usinada e baixa eficiência no processo de usinagem. Portanto, é essencial entender quais combinações de ferramentas e parâmetros de corte são mais eficientes para a usinagem do aço SAE 1045.

Identificar a combinação ideal desses parâmetros é crucial, pois conhecer os parâmetros de torneamento que ocasionam desgaste prematuro da ferramenta de corte é importante para manter uma faixa de operação que mantenha boa produtividade e que atue de modo a diminuir os fatores que reduzem a vida da ferramenta (TEDESCO, 2007). Portanto, este estudo se justifica pela necessidade de aumentar a produtividade utilizando a menor quantidade possível de insertos, assim evitando trocas excessivas de insertos na ferramenta. Isso irá otimizar o processo de usinagem convencional do aço SAE 1045, visando a melhoria na produtividade e eficiência do inserto com uma durabilidade maior.

O objetivo deste trabalho é comparar duas ferramentas de corte, avanços em uma dada velocidade de corte na usinagem convencional do aço SAE 1045, com o intuito de identificar a combinação ideal desses parâmetros para obter o melhor desempenho do processo. Serão avaliados alguns critérios de desempenho, como rugosidade da superfície usinada, taxa de remoção de material desgaste das ferramentas de corte. Os resultados obtidos serão analisados e comparados para identificar a combinação mais eficiente de ferramentas de corte, avanços e velocidades de corte para a usinagem do aço SAE 1045.

Além disso, é importante ressaltar que a pesquisa visa não apenas a otimização do processo, mas também a economia de recursos, como o prolongamento da vida útil das ferramentas de corte, o que pode representar uma redução de custos significativa para as indústrias que utilizam aço SAE 1045 em seus processos de fabricação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A usinabilidade do aço SAE 1045 é um tema amplamente abordado na literatura devido à sua ampla aplicação na indústria. Neste estudo, foi realizada uma revisão bibliográfica comparando a performance de duas pastilhas de corte utilizadas na usinagem desse material.

2.1. USINAGEM TORNO MECÂNICO CONVENCIONAL

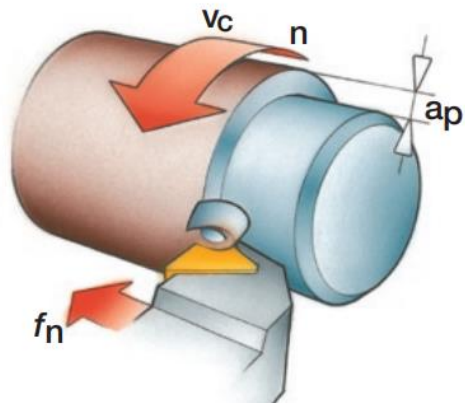
A usinagem faz parte de um processo amplamente utilizado em todo o mundo, nas mais variadas aplicações, das mais simples até as mais complexas. Estudos de fatores que podem influenciar nos resultados da usinagem são de grande valia, principalmente para as indústrias que atuam nesse campo. Dentre alguns deles, podemos citar: a seleção de ferramenta, a vida da ferramenta, o uso de lubrificantes, os custos da usinagem, a determinação dos parâmetros de usinagem, bem como a velocidade de corte, o avanço, a profundidade deste corte, entre outros parâmetros que serão detalhados posteriormente.

2.1.1. Processos

De acordo com Ferraresi (1977), o torneamento faz parte de um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies em revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas. Portanto, é a peça que gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e é a ferramenta que se desloca simultaneamente segundo uma trajetória de coplanar com o referido eixo.

O torneamento utilizado no presente trabalho, será o torneamento retilíneo, onde a ferramenta vai se deslocando segundo uma trajetória retilínea. Mais especificamente, o torneamento cilíndrico externo, conforme ilustra a Fig. 01.

Figura 01: Torneamento cilíndrico externo.



Fonte: Metalcutting technical guide, (Sandvik, 2022).

2.2. FERRAMENTAS DE CORTE

Os insertos de corte são ferramentas de usinagem utilizadas em tornos mecânicos, fresadoras e outros equipamentos para cortar materiais metálicos. A geometria dos insertos de corte, incluindo seus ângulos, é importante para determinar a eficácia da usinagem, a qualidade do acabamento da superfície e a vida útil da ferramenta.

A escolha dos ângulos e geometria do inserto de corte depende do tipo de material a ser usinado, da velocidade de corte, da profundidade de corte e do acabamento desejado. A seleção correta das pastilhas de corte é essencial para garantir uma usinagem eficiente e com alta qualidade.

2.2.1. Velocidade de corte

A velocidade de corte é um dos parâmetros mais importantes na usinagem convencional do aço SAE 1045. Ela desempenha um papel crucial na eficiência do processo e na qualidade das peças usinadas.

Segundo Machado (2011), velocidade de corte (v_c) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte. Expressa pela equação eq. 1.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ (m/min.)} \quad (1)$$

Onde:

v_c = velocidade de corte (m/min.)

d = diâmetro da peça (mm)

n = frequência de rotações por (min^{-1} .)

2.2.2. Avanço

O avanço é outro parâmetro importante na usinagem convencional de materiais metálicos, incluindo o aço SAE 1045. Ele desempenha um papel significativo na taxa de remoção de material, na vida útil da ferramenta e na rugosidade da superfície usinada.

De acordo com Diniz e Coppini (2001) foi observado que o avanço afeta diretamente a taxa de remoção de material e a vida útil da ferramenta de corte, sendo expressa pela eq. 2.

$$V_f = f \cdot n \text{ (mm/min.)} \quad (2)$$

Onde:

v_f = velocidade avanço (mm/min.)

f = avanço por revolução (mm/rev.)

n = rotações por minuto (rpm.)

2.2.3. Taxa de remoção de material

A taxa de remoção de material é um fator importante a ser considerado na usinagem convencional de materiais metálicos, como o aço SAE 1045. Ela está diretamente relacionado à eficiência do processo.

Segundo o estudo realizado por (Diniz, 2006), intitulado "tecnologia de usinagem dos materiais", foi constatado que a taxa de remoção de material afeta diretamente a produtividade do processo e o tempo total de produção das peças, sendo expresso pela eq. 3.

$$Q = v_c * a_p * f \text{ (cm}^3\text{/min.)} \quad (3)$$

Onde:

Q = taxa remoção de material (cm³/min.)

v_c = velocidade de corte (m/min.)

a_p = profundidade corte (mm)

f = avanço por revolução (mm/rev.)

2.2. AÇO SAE 1045

O aço SAE 1045 é um tipo de aço carbono que contém em média 0,45% de carbono em sua composição química. É amplamente utilizado na fabricação de peças mecânicas devido às suas propriedades físicas e mecânicas favoráveis (SILVA; SANTOS, 2022).

2.2.1. Propriedades químicas

Composição química típica: 0,43-0,50% de carbono, 0,60-0,90% de manganês, ≤0,04% de fósforo e ≤0,05% de enxofre. É um aço de baixa liga, o que significa que contém quantidades relativamente baixas de elementos de liga, como cromo, níquel e molibdênio.

2.2.2. Propriedades mecânicas

O material em questão apresenta uma resistência à tração de 565 MPa, o que indica sua capacidade de suportar forças antes de romper. Seu limite de escoamento é de 310 MPa, indicando a quantidade máxima de estresse que ele pode suportar sem sofrer deformação permanente. Além disso, possui um alongamento de 16% do seu comprimento original. Sua dureza é de 170 Brinell (HB), mostrando sua resistência à penetração e deformação (Matosinhos et al., 2002).

2.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DE USINAGEM

Com base nos resultados do estudo de Silva et al. (2023), é possível afirmar que a análise de resultados de usinagem é essencial para a melhoria contínua do processo. Ao identificar desvios em relação às especificações desejadas, é possível realizar ajustes nos parâmetros de usinagem, na seleção das ferramentas de corte e em outros aspectos do processo, visando a obtenção de peças com qualidade e precisão adequadas (SILVA; SANTOS, OLIVEIRA, 2023).

2.3.1. Rugosidade

De acordo com o livro "Fundamentos da Usinagem dos Metais" de Dino Ferraresi, a rugosidade é uma medida da textura da superfície usinada e é influenciada por diversos fatores, como a geometria da ferramenta de corte, as condições de corte (velocidade, avanço, profundidade de corte), o tipo de material usinado e o tipo de lubrificação/refrigeração utilizado.

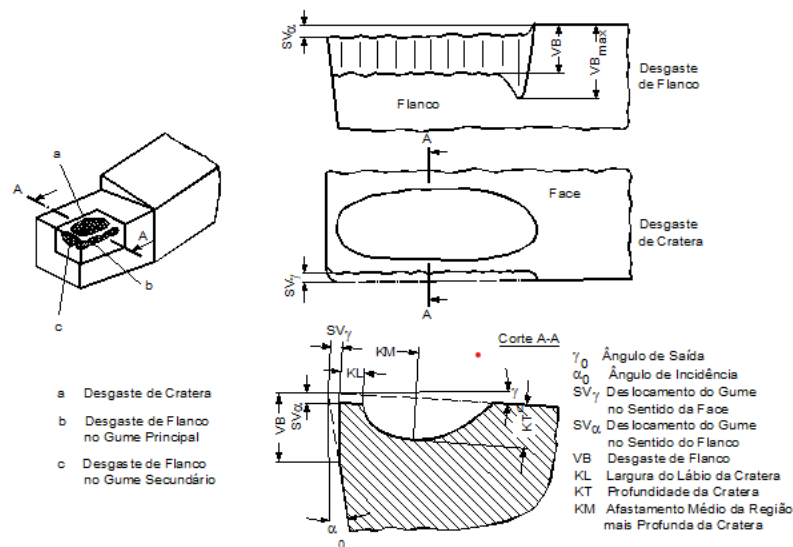
A rugosidade pode ser medida por meio de instrumentos de medição como o rugosímetro, que mede o desvio da superfície em relação a uma linha média. Existem diversas formas de expressar a rugosidade, como a média aritmética (Ra), a média quadrática (Rq) e a rugosidade máxima (Rz). Cada uma dessas formas de expressar a rugosidade fornece uma informação diferente sobre a textura da superfície.

2.3.2. Desgaste de flanco (V_{Bmax})

O desgaste de flanco é um dos tipos de desgaste que pode ocorrer na ferramenta de corte durante a usinagem. Para avaliar o desgaste de flanco, o livro "Fundamentos da Usinagem dos Metais" de Dino Ferraresi recomenda os seguintes métodos:

1. Método visual: Consiste em observar a aparência da superfície do flanco da ferramenta de corte.
2. Método tátil: Consiste em utilizar o dedo para sentir a superfície do flanco da ferramenta de corte.
3. Método de medição dimensional: Consiste em medir as dimensões da aresta de corte da ferramenta de corte e compará-las com as dimensões da ferramenta nova.

Figura 02: Desgaste de flanco e de cratera.



Fonte: Apostila tecnologia de usinagem UNISATC (CAVALER, 2022).

A Fig. 02 mostra a imagem ilustrativa de um inserto usado na usinagem de matérias, mostrando o desgaste de cratera e principalmente o desgaste de flanco máximo.

2.3.3. Erro de forma

O erro de forma se refere às discrepâncias entre as características geométricas reais de uma peça e as dimensões ideais especificadas no desenho técnico. A máquina de medição por coordenadas (MMCs) é um dispositivo de medição de alta precisão que utiliza sensores e sistemas de coordenadas para avaliar a geometria tridimensional de uma peça.

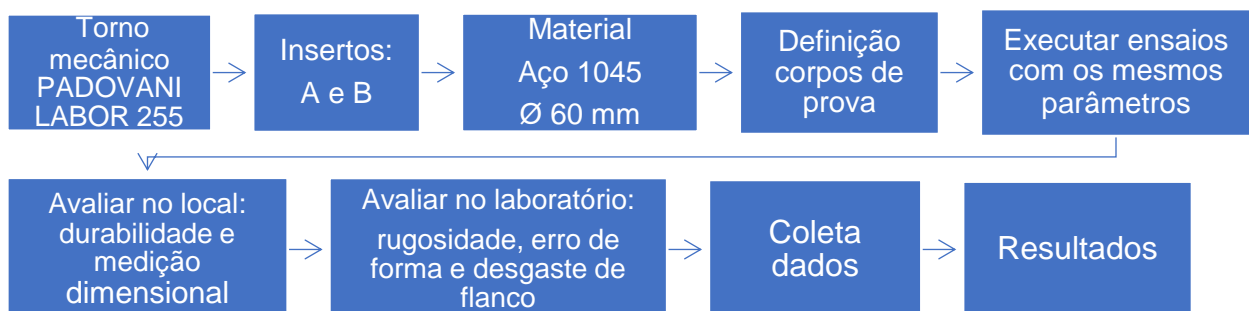
Os erros de forma podem se manifestar de várias maneiras, dependendo das características geométricas específicas sendo medidas. As mais comuns são a circularidade, cilindridade e concentricidade.

Esses erros são geralmente expressos em termos de tolerâncias dimensionais especificadas nos desenhos técnicos. A MMCs é capaz de medir esses desvios com alta precisão, fornecendo informações valiosas sobre a conformidade de uma peça com as especificações.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental é uma etapa fundamental para a realização e finalização deste trabalho de conclusão de curso. Portanto em sequência serão dados o passo a passo da execução e finalização do processo experimental.

3.1. FLUXOGRAMA PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

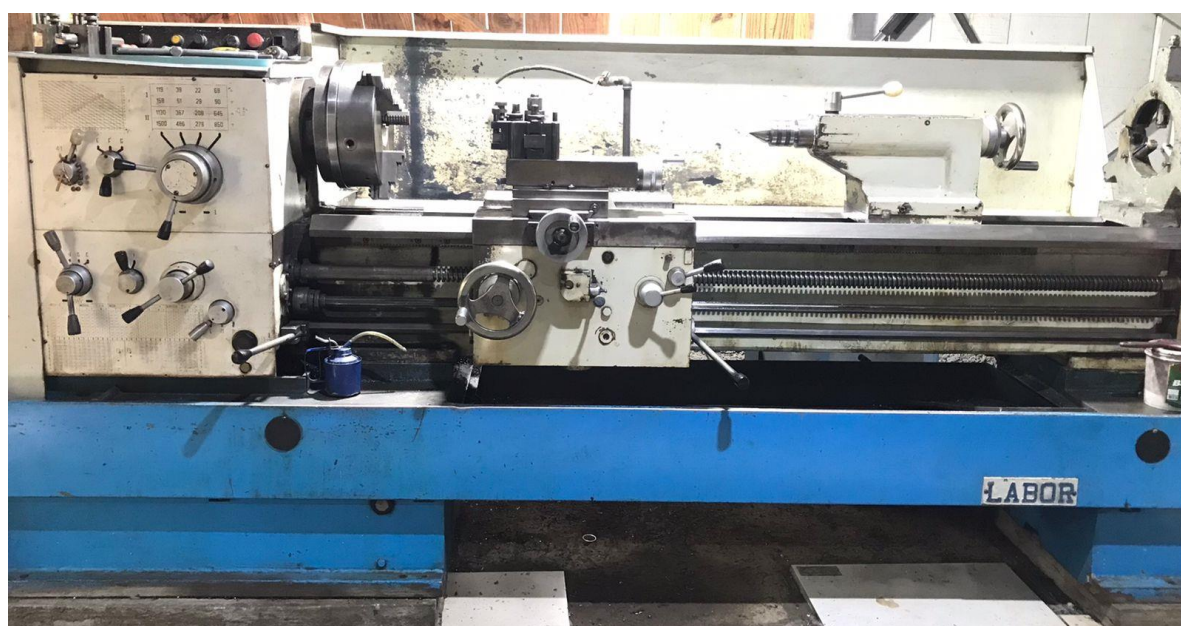


Fonte: Do Autor (2023).

3.2. TORNO MECÂNICO

O torno mecânico escolhido para a fabricação dos corpos de prova é uma máquina italiana da marca Padovani. Com uma placa de três castanhas de doze polegadas, com um diâmetro admissível sobre o barramento de 550 mm e medindo 1,5 metros entre pontos. A Fig. 03 mostra a imagem do mesmo.

Figura 03: Torno convencional Padovani Labor 255.



Fonte: Do autor (2023).

3.3. INSERTOS A SEREM AVALIADOS

A seguir será mostrado dados e imagens dos dois insertos TMNG 160408 (A e B), ambos de fabricantes diferentes que serão utilizadas para usinar os corpos de prova de aço SAE 1045 no procedimento experimental.

3.3.1. Dados sobre os insertos

Os dados dos insertos A e B, foram obtidos diretamente através do catálogo oficial do fabricante e, do verso da caixa original de armazenagem de cada inserto garantindo assim a precisão e confiabilidade das informações utilizadas na pesquisa.

Essa abordagem assegura a integridade dos dados, fornecendo uma base sólida para a análise e avaliação de ambos os insertos, conforme necessário para o nosso estudo.

A escolha dos insertos utilizados é fundamental, a Fig. 04 mostra a escolha de dois insertos de marcas diferentes, porém de mesma geometria e mesmo raio de 0,8 dos insertos.

Figura 04: Insertos triangulares utilizados para usinagem de aços carbono.

a- Inseto A geometria TNMG 160408, b- Inseto B geometria TNMG 160408.



Fonte: Autor (2023).

Os dois insertos mostrados na Fig. 04 tem uma geometria TNMG com um tamanho 16 e com raio de ponta 0,8, usado especialmente para o desbaste do material.

3.4. DADOS ESSENCIAIS PARA USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A velocidade de corte é um parâmetro crítico na usinagem, influenciando diretamente a eficiência do processo, em combinação com o diâmetro do material, determina a velocidade de corte, uma medida essencial para o cálculo do avanço por revolução do carro.

Além disso, a profundidade de corte é outra variável fundamental que interage diretamente com a velocidade de corte e o avanço. Onde influenciará na taxa de remoção de material. A relação entre esses parâmetros é necessária para o processo de usinagem, permitindo assim o controle da remoção de material de forma eficiente

e precisa. Compreender a inter-relação entre n , d , v_c , f , a_p e Q é crucial para a usinagem eficiente do aço SAE 1045.

Tabela 01: Dados utilizados para o desenvolvimento dos corpos de prova.

| Ferramenta | Ensaio n° | n [rpm] | D [mm] | v_c Inicial [m/min] | f [mm/rev] | a_p [mm] | Q [cm ³ /min] |
|---------------|--------------|------------|-----------|--------------------------|---------------|---------------|-----------------------------|
| TNMG 160408 A | 1 | 486 | 60 | 92 | 0,24 | 2 | 44 |
| TNMG 160408 A | 2 | 486 | 60 | 92 | 0,31 | 2 | 57 |
| TNMG 160408 A | 3 | 486 | 60 | 92 | 0,51 | 2 | 94 |
| TNMG 160408 A | 4 | 850 | 60 | 160 | 0,51 | 2 | 164 |
| TNMG 160408 B | 5 | 486 | 60 | 92 | 0,24 | 2 | 44 |
| TNMG 160408 B | 6 | 486 | 60 | 92 | 0,31 | 2 | 57 |
| TNMG 160408 B | 7 | 486 | 60 | 92 | 0,51 | 2 | 94 |
| TNMG 160408 B | 8 | 850 | 60 | 160 | 0,51 | 2 | 164 |

Fonte: Do Autor (2023).

Onde:

n = velocidade de rotação (min^{-1} .)

D = diâmetro material (mm.)

v_c = velocidade de corte (m/min.)

f = avanço por revolução (mm/rev.)

a_p = profundidade corte (mm.)

Q = taxa de remoção de material (cm^3/min .)

Os valores de frequência de rotação (n) e avanço por revolução (f) utilizados neste estudo foram coletados diretamente do painel do torno durante o processo de usinagem. Esses dados provenientes da própria máquina oferecem uma base sólida e confiável para a condução das análises comparativas entre os dois tipos de insertos de corte, garantindo a precisão dos resultados obtidos durante o estudo proposto.

A taxa de remoção de material (Q), foi obtido através da multiplicação da velocidade de corte pelo avanço (f) e pela profundidade (a_p). A profundidade (a_p) é dado na remoção de material do raio do diametro usinado, nesse caso dois no raio ou seja, no diâmetro quatro milímetros.

3.5. CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova em aço SAE 1045 desempenham um papel fundamental para a realização dos resultados. Através deles que serão avaliados o desgaste de flanco dos insertos A e B, a rugosidade da superfície e a combinação de avanços e velocidade que cada um suporta.

3.5.1. Corpos de prova bruto

Primeiramente os tarugos de aço SAE 1045 laminados foram fornecidos com um diâmetro de 63 mm e todos foram cortados na serra de fita com lubrificação para não aquecer o material e mudar suas propriedades mecânicas. Cortados com um comprimento de 114 mm os corpos de prova estão prontos para usinagem inicial.

Posteriormente os corpos de prova foram usinados, todos inicialmente com um diâmetro de 60 mm e foram faceados até todos atingirem um comprimento de 110 mm como mostra a Fig. 05. Em uma das faces, um furo central foi realizado, assim permitindo a utilização do contraponto durante o processo de usinagem dos corpos de prova. Essa medida foi feita para garantir a estabilidade e precisão na usinagem, assegurando resultados uniformes e confiáveis durante a execução dos testes.

Figura 05: Corpos de prova usinados em um diâmetro e comprimento padrão de 60 x110 mm.



Fonte: Autor (2023).

3.6. INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Serão utilizados instrumentos de alta precisão, incluindo o rugosímetro Mitutoyo SJ 310 para dados quantitativos sobre a rugosidade, um estereoscópio para identificação visual de falhas, e uma máquina de medição por coordenadas.

3.6.1. Rugosímetro

Com o auxílio do equipamento limpador ultrassônico mostrado na Fig. 08 utilizando álcool como produto para efetuar a limpeza das peças usinadas, eliminando o máximo de impurezas possível antes da medição da rugosidade da superfície. A limpeza adequada assegurou a remoção de contaminantes, proporcionando condições ideais para medições precisas.

Figura 08: Equipamento elétrico de limpeza utilizando álcool.



Fonte: Autor (2023).

Após a utilização do limpador ultrassônico, com rugosímetro alinhamento e configurado, os corpos de prova se encontram prontos para iniciar o próximo processo de medição de rugosidade da superfície.

O rugosímetro Mitutoyo SJ 310 foi empregado para avaliar a rugosidade da superfície dos corpos de prova, proporcionando uma análise precisa das características topográficas das superfícies usinadas. Essa ferramenta forneceu dados quantitativos essenciais para compreender o impacto das mudanças no avanço

e velocidade durante a usinagem convencional do aço SAE 1045, destacando a precisão e confiabilidade na avaliação das propriedades superficiais.

Figura 07: Rugosímetro Mitutoyo SJ 310.



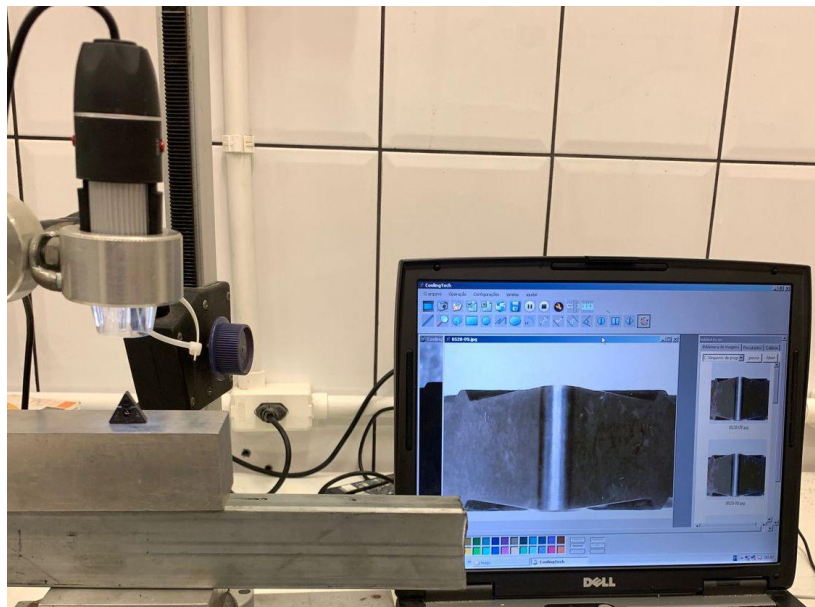
Fonte: Autor (2023).

Este equipamento, mostrado na Fig. 07 acima, foi essencial para a avaliação da rugosidade da superfície dos corpos de prova usinados. Através da sua tecnologia, o rugosímetro permitiu medições precisas, fornecendo dados quantitativos sobre as características topográficas das superfícies usinadas.

3.6.2. Estereoscópio

Para auxiliar na avaliação e na medição do desgaste das ferramentas de corte avaliadas, foi utilizado o estereoscópio de medição universal digital microscope. Este equipamento possui ampliação de até 1000 vezes, e é auxiliado pelo software cooling tech microscope para aquisição e avaliação das imagens. A figura 06 ilustra o estereoscópio disponível no Laboratório de Usinagem utilizado na verificação das ferramentas.

Figura 6: Microscópio estereoscópio.



Fonte: Autor (2023).

3.6.3. Máquina de medição por coordenadas

A Máquina de Medição por Coordenadas (MMCs) é um equipamento de alta precisão utilizado para realizar medições tridimensionais de peças e componentes. As MMCs são utilizadas tanto para inspeção em processos de produção como para medições de apoio a pesquisa e calibração de artefatos e padrões (Donatelli et al., 2005).


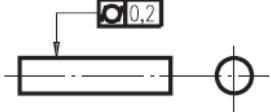
A determinação dos elementos geométricos é feita a partir de 20 pontos capturados ao longo do corpo de prova, por uma sonda em contato com a peça (Bosch, 1995). A MMCs utilizada para realizar as medições do erro de forma foi a máquina Mitutoyo BH715 com o ambiente à temperatura controlada de 20,5 graus celsius.

3.6.4. Tipo de erro de forma

Os erros de forma podem ocorrer em diferentes tipos e ter diferentes causas. A seguir, será apresentado o tipo mais comum de erro de forma, com base em fontes bibliográficas.

Cilindricidade: este tipo de erro ocorre quando a peça apresenta desvios em relação à forma geométrica cilíndrica, ou seja, a superfície da peça não é perfeitamente cilíndrica em relação ao seu eixo. Segundo Machado e Costa (2014), este tipo de erro pode ocorrer devido a desalinhamentos ou vibrações durante o processo de usinagem. No Qd. 01 são mostrados: símbolo, especificação do desenho e interpretação.

Quadro 01: Parâmetros do erro de cilindridade.

| TIPO | SÍMBOLO | ESPECIFICAÇÃO | INTERPRETAÇÃO |
|----------------|---|--|--|
| CILINDRICIDADE |  |  | É a condição pela qual a zona de tolerância especificada é a distância radial entre dois cilindros coaxiais. |

Fonte: Autor (2023).

A cilindridade é uma medida de quão próximo um objeto é de ser um cilindro perfeito. No procedimento de medição, a cilindridade será o método utilizado como uma referência para avaliar o quão bem a forma real do cilindro se alinha com a forma ideal de um cilindro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na presente seção, são exibidos e abordados os resultados obtidos nos ensaios apresentados acima, abordando a rugosidade superficial, desgaste de flanco e erro de forma. Esses resultados representam pilares fundamentais na compreensão do processo de usinagem a seco no torno convencional, fornecendo assim informações detalhadas para aprimorar as práticas de usinagem e impulsionar o avanço contínuo na área.

4.1. USINAGEM CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova mostrados na Fig. 09 abaixo foram submetidos ao processo de usinagem, no qual os mesmos com comprimento de 110 mm foram fixados na placa de três castanhas e presos com o contra ponto. Em seguida um comprimento de 100 mm foi usinado a fim de reduzir o diâmetro de 60 mm para 20 mm. Esse procedimento foi realizado em um total de 10 passes de usinagem, cada um removendo 2 mm do raio, o que corresponde a 4 mm do diâmetro do corpo de prova em cada passagem.

Figura 09: Corpos de prova finalizados.



Fonte: Autor (2023).

Com os corpos de prova finalizados, pode-se dar início aos testes laboratoriais, iniciando com o teste da rugosidade da superfície. Em seguida a medição precisa do desgaste de flanco máximo, e por fim o erro de forma nos dará informações valiosas para a conclusão dessa etapa.

4.2. RUGOSIDADE

Com o rugosímetro Mitutoyo SJ-310 iniciou-se as medidas na peça cilíndrica de 20 mm de diâmetro, ao medir a rugosidade da superfície com diferença de 120 graus entre os pontos, isso proporciona uma avaliação mais abrangente da superfície. Cada ponto medido em intervalos de 120 graus permite uma amostragem distribuída de forma equitativa ao redor da circunferência do cilindro.

Na Tab. 02 abaixo temos a rugosidade média de R_a , R_q e R_z de oito corpos de prova, com suas devidas velocidades e avanço.

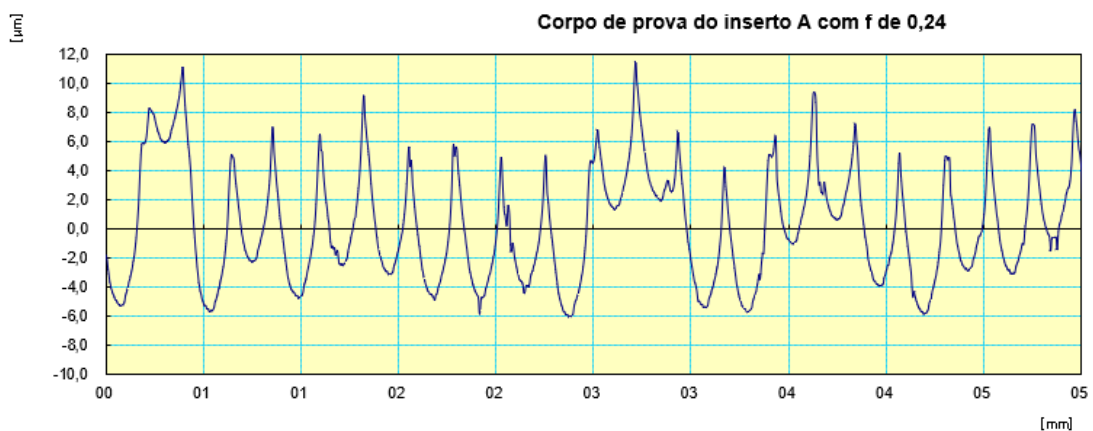
Tabela 02: Rugosidade medida de R_a , R_q e R_z .

| Inserto | n [rpm] | v_c Inicial [m/min] | f [mm/rev] | R_a [μ m] | R_q [μ m] | R_z [μ m] |
|---------|---------|-----------------------|------------|------------------|------------------|------------------|
| A | 486 | 92 | 0,24 | 3,089 | 3,704 | 16,566 |
| A | 486 | 92 | 0,31 | 5,858 | 6,887 | 28,442 |
| A | 486 | 92 | 0,51 | 17,388 | 21,285 | 106,766 |
| A | 850 | 160,22 | 0,51 | 52,058 | 58,341 | 216,513 |
| B | 486 | 92 | 0,24 | 2,554 | 3,162 | 13,748 |
| B | 486 | 92 | 0,31 | 4,814 | 5,746 | 24,011 |
| B | 486 | 92 | 0,51 | 13,893 | 16,939 | 79,735 |
| B | 850 | 160,20 | 0,51 | 11,921 | 14,346 | 66,45 |

Fonte: Autor (2023).

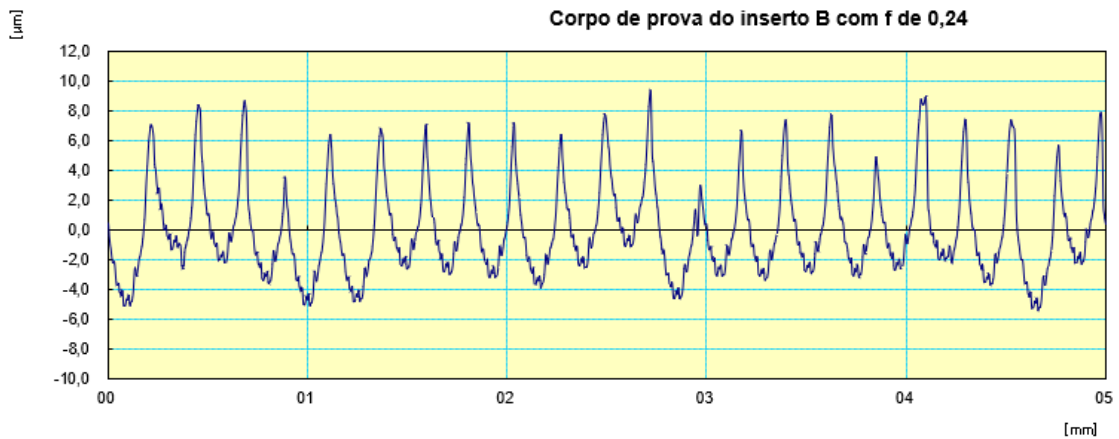
Os Graf. 01 e 02 mostrados pelo rugosímetro utilizando Cutoff 0,8 exibem uma linha central representando a média da superfície, com destaque para o pico mais baixo e o pico mais elevado, indicando as maiores variações na altura das irregularidades. Os dois gráficos subsequentes correspondem às peças de menor rugosidade vinda da usinagem dos insertos A e B, respectivamente.

Gráfico 01: Gráfico do inserto A expresso pelo rugosímetro.



Fonte: Autor (2023).

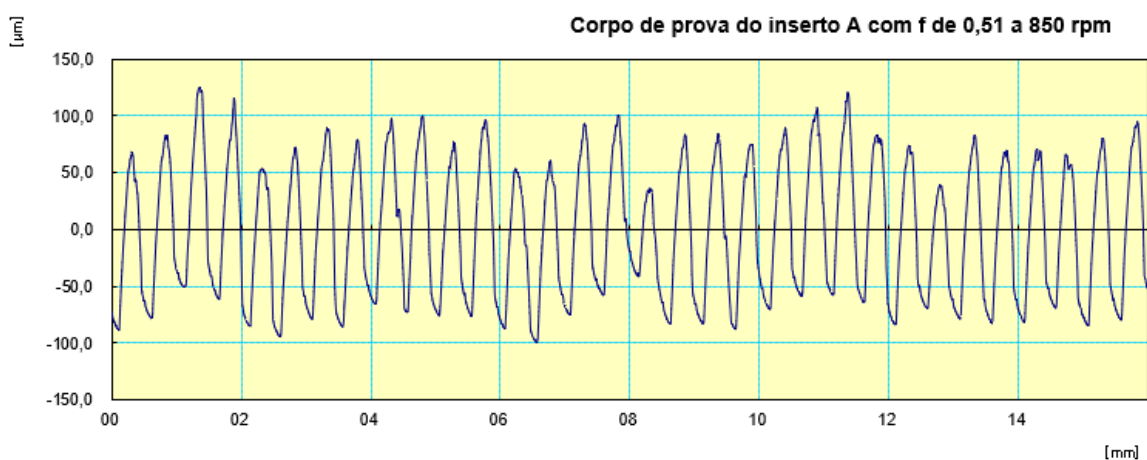
Gráfico 02: Gráfico do inserto B expresso pelo rugosímetro.



Fonte: Autor (2023).

Os dois próximos Graf. 03 e 04 representam as peças usinadas que resultaram na maior rugosidade também medidas com Cutoff 0,8, na usinagem feita pelos insertos A e B, respectivamente, permitindo assim uma comparação direta com os gráficos anteriores 01 e 02 que são de menor rugosidade. Ao constatar visualmente esses gráficos, obtemos uma análise comparativa das características de rugosidade entre os dois insertos, identificando variações significativas na superfície.

Gráfico 03: Gráfico do inserto A expresso pelo rugosímetro.



Fonte: Autor (2023).

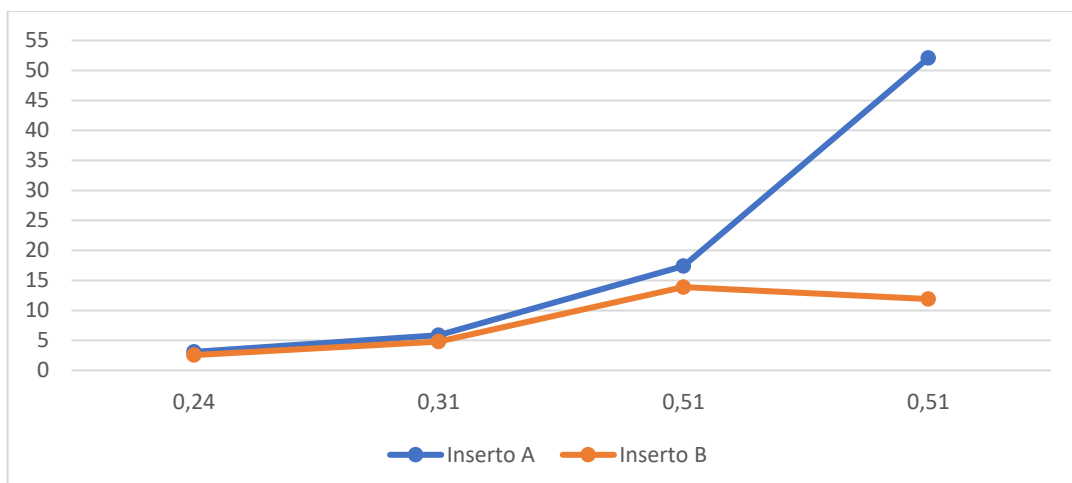
Gráfico 04: Gráfico do inserto B expresso pelo rugosímetro.



Fonte: Autor (2023).

Conforme apresentado nos gráficos acima referentes ao corpo de prova com menor rugosidade, obtido com um avanço de f 0,24, e ao corpo de prova com maior rugosidade, associado a um avanço de f 0,51, destaca-se que o inserto B apresentou a menor rugosidade superficial em ambas as condições. Essa observação sugere que o inserto B proporcionou um acabamento superior em comparação ao inserto A nessas configurações específicas de usinagem.

Figura 05: Rugosidade Ra (μm) por Avanço f (mm/rev).



Fonte: Autor (2023).

No Graf. 05 acima, é evidente uma perspectiva visual da influência dos diferentes avanços na rugosidade da peça. Observando que o maior avanço nesse

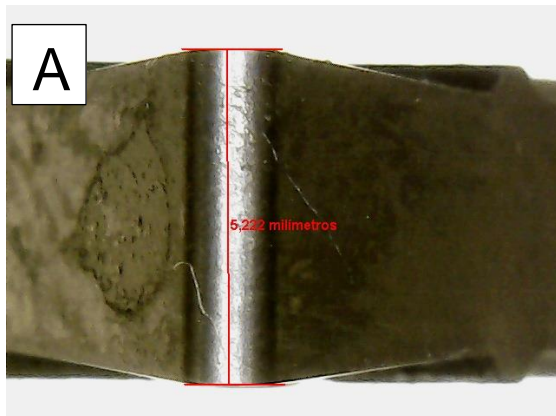
caso está influenciando em uma superfície mais rugosa. Esta representação oferece uma comparação direta dos mesmos parâmetros de usinagem utilizando os insertos A e B. Destaca-se que, sob essas condições específicas, o inserto B tende a produzir uma superfície menos rugosa em comparação ao inserto A.

4.3. DESGASTE DE FLANCO

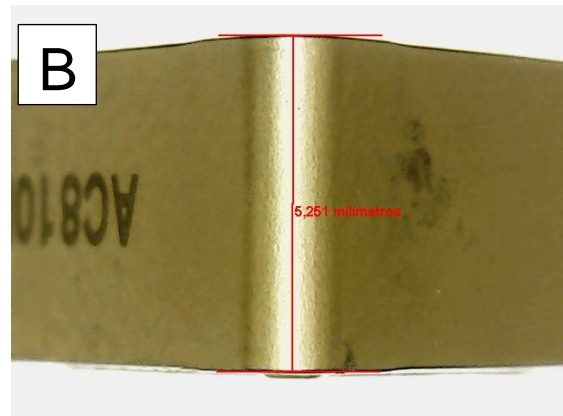
Inicialmente para a determinação do desgaste de flanco (V_{Bmax}), adotou-se uma abordagem precisa e detalhada. Utilizando um estereoscópio para a avaliação precisa da altura inicial de um inserto novo. Por meio dessa ferramenta, foi possível mensurar com exatidão as dimensões iniciais dos insertos A e B, estabelecendo uma linha de base para as próximas análises. Como mostra a Fig. 10.

Figura 10: Medição insertos com o estereoscópio.

a) Inserto A modelo TNMG 160408
com altura medida de 5,222 milímetros



b) Inserto B modelo TNMG 160408.
com altura medida de 5,251 milímetros



Fonte: Autor (2023).

Posteriormente, procedeu-se à medição do desgaste do flanco dos insertos, utilizando o mesmo estereoscópio para registrar as variações na altura do componente ao longo do período de usinagem. Esse método permitiu uma avaliação direta e confiável do desempenho do inserto, proporcionando os dados necessários para a comparação dos desgastes durante as operações de usinagem. A Tab. 03

apresenta os resultados obtidos a partir da usinagem de um corpo de prova para cada avanço selecionado, sendo cada um deles equipado com um inserto novo.

A escolha de empregar insertos novos em cada configuração visa garantir a uniformidade das condições iniciais, permitindo uma análise mais precisa do desgaste de flanco em função dos diferentes avanços utilizados no processo de usinagem.

Tabela 03: Desgaste de flanco V_{Bmax} [mm] pelo número de passes em dados avanços.

| Inserto | Ensaio nº | n [rpm] | V_c | | a_p [mm] | Nº passes | D. inicial [mm] | D. final [mm] | V_{Bmax} [mm] |
|---------|-----------|---------|-----------------|------------|------------|-----------|-----------------|---------------|-----------------|
| | | | Inicial [m/min] | f [mm/rev] | | | | | |
| A | 1 | 486 | 92 | 0,24 | 2 | 10 | 60 | 20 | -- |
| A | 2 | 486 | 92 | 0,31 | 2 | 10 | 60 | 20 | -- |
| A | 3 | 486 | 92 | 0,51 | 2 | 10 | 60 | 20 | -- |
| A | 4 | 850 | 160,22 | 0,51 | 2 | 10 | 60 | 20 | -- |
| B | 5 | 486 | 92 | 0,24 | 2 | 10 | 60 | 20 | -- |
| B | 6 | 486 | 92 | 0,31 | 2 | 10 | 60 | 20 | -- |
| B | 7 | 486 | 92 | 0,51 | 2 | 10 | 60 | 20 | -- |
| B | 8 | 850 | 160,22 | 0,51 | 2 | 10 | 60 | 20 | -- |

Fonte: Autor (2023).

No primeiro teste de usinagem, conforme apresentado na Tab. 03, dedicado à operação de um único corpo de prova, não foi possível notar o desgaste de flanco, tanto visualmente quanto por meio do estereoscópio. Diante desse resultado intrigante, foi tomada a decisão de um segundo conjunto de testes. Nessa fase subsequente, a usinagem foi realizada em quatro corpos de prova tanto para o inserto A quanto para o B, utilizando as mesmas condições de velocidade e avanço dos corpos de prova 4 e 8 da Tab. 03. Esse método envolveu o uso exclusivo de um único inserto A e B, para a usinagem dos oito corpos.

O objetivo da usinagem desses novos corpos de prova se deu ao desgaste de flanco, pois é um dado indispensável para a conclusão desse processo. Com isso foi elaborado uma segunda tabela para essas próximas usinagens.

Tabela 04: Desgaste de flanco V_{Bmax} [mm] em apenas um avanço e rotação.

| Inserto | Qty. Peças | n [rpm] | v_c Inicial [m/min] | f [mm/rev] | a_p [mm] | D. inicial [mm] | D. final [mm] | Nº passes |
|---------|------------|---------|-----------------------|------------|------------|-----------------|---------------|-----------|
| A | 4 | 850 | 160,22 | 0,51 | 2 | 60 | 20 | 10 |
| B | 4 | 850 | 160,22 | 0,51 | 2 | 60 | 20 | 10 |

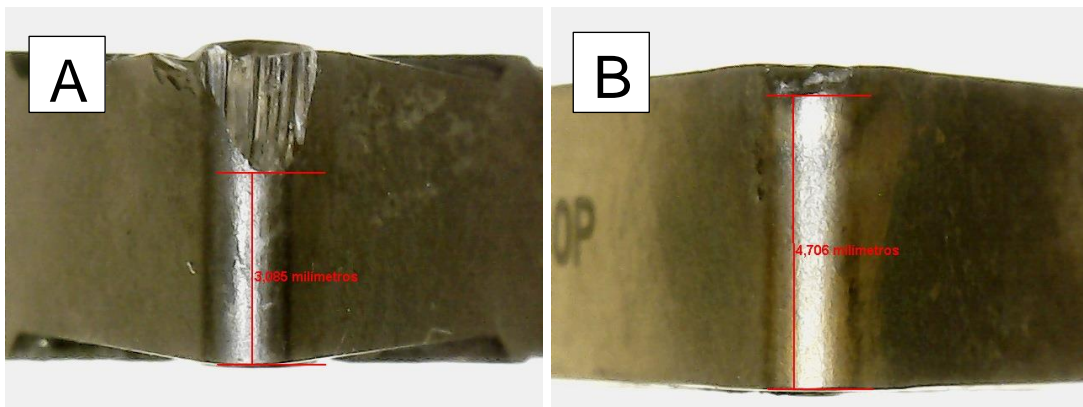
Fonte: Autor (2023).

Com a Tab. 04 foram usinados os corpos de prova com os insertos A e B, e novamente foram para o estereoscópio para a medição do desgaste de flanco máximo (VBmax). Conforme mostra a Fig. 11 abaixo.

Figura 11: Medida da aresta inferior até o desgaste de flanco máximo (VBmax).

a) Inserto A modelo TNMG 160408.

b) Inserto B modelo TNMG 160408.



Fonte: Autor (2023).

Com a usinagem de quatro corpos de prova de aço SAE 1045, realizada com uma velocidade n de 850 (rpm) e avanço f de 0,51 (mm/rev.) e utilizando um único inserto A e um B, demonstrou importante desgaste de flanco. Os resultados detalhados, apresentados na Fig. 11 e na Tab. 05, destacam os valores de desgaste de flanco máximo sob essas condições específicas de operação. Esses dados são cruciais para a compreensão do comportamento dos insertos A e B diante das características do material usinado, fornecendo informações valiosas para a otimização contínua do processo de usinagem.

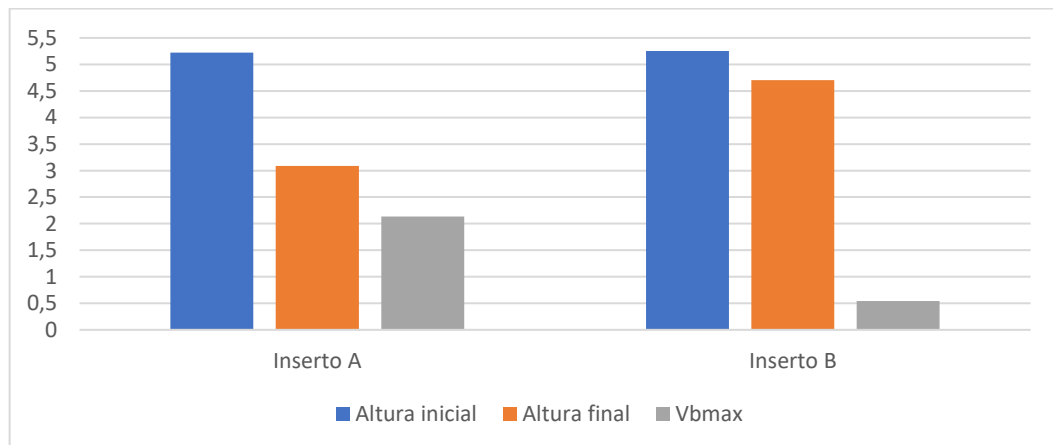
Tabela 05: Desgaste de flanco máximo (V_{Bmax}).

| Inserto | Altura total [mm] | Altura até o Desgaste [mm] | V_{Bmax} [mm] |
|---------------|-------------------|----------------------------|-----------------|
| TNMG 160408 A | 5,222 | 3,085 | 2,137 |
| TNMG 160408 B | 5,251 | 4,706 | 0,545 |

Fonte: Autor (2023).

De maneira adicional, o Graf. 06 a seguir apresenta uma representação comparativa do desgaste de flanco, oferecendo uma visão mais clara da performance dos dois insertos. Essa análise comparativa destaca o desgaste de flanco entre os insertos A e B, ajudando na compreensão de qual inserto desgastou menos.

Gráfico 06: Gráfico comparativo entre desgaste de flanco máximo (mm) pelo avanço (mm/ver) e rotação (min^{-1}).



Fonte: Autor (2023).

Em conclusão dessa etapa, os resultados do teste de desgaste de flanco máximo indicam que o inserto B demonstrou um desempenho superior em comparação com o inserto A, sob as mesmas circunstâncias de trabalho. Essa observação ressalta a relevância da escolha do inserto na otimização do processo de usinagem, sugerindo assim que o inserto B pode ser mais adequado quanto a durabilidade na usinagem do aço SAE 1045.

4.4. ERRO DE FORMA

A medição do erro de forma feita nos oito corpos de prova revelou uma consistência notável entre os insertos A e B nos valores obtidos, com exceção dos casos em que foi aplicado um avanço de f 0,24. Nesses cenários específicos, observou-se uma variação maior entre os valores do erro de forma, como mostra a Tab. 06.

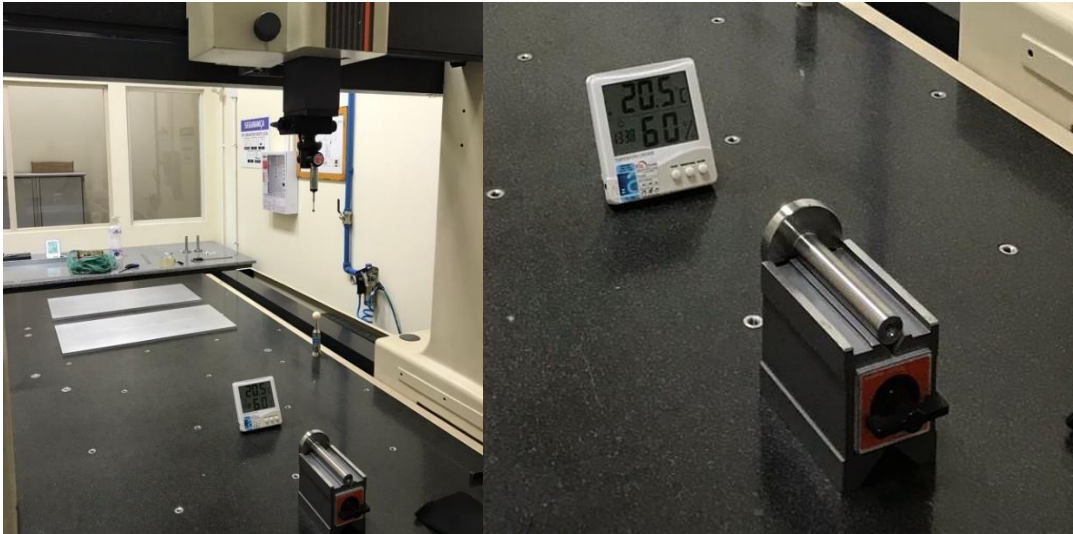
Tabela 06: Erro de forma dos corpos de prova em milímetros.

| Inserto | n [rpm] | v_c Inicial [m/min] | f [mm/rev] | Erro de forma (mm) |
|----------------|----------------|---|-------------------|---------------------------|
| A | 486 | 92 | 0,24 | 0,099 |
| A | 486 | 92 | 0,31 | 0,101 |
| A | 486 | 92 | 0,51 | 0,089 |
| A | 850 | 160,22 | 0,51 | 0,106 |
| B | 486 | 92 | 0,24 | 0,037 |
| B | 486 | 92 | 0,31 | 0,095 |
| B | 486 | 92 | 0,51 | 0,104 |
| B | 850 | 160,20 | 0,51 | 0,107 |

Fonte: Autor (2023).

Para conduzir as medições dos corpos de prova na Máquina de Medição por Coordenadas (MMC), as peças foram fixadas à mesa por meio de um imã magnético. Esse método de fixação visa assegurar a estabilidade das peças durante as medições, proporcionando resultados mais precisos e consistentes. Além disso, o ambiente foi mantido a uma temperatura controlada de 20,5 graus Celsius, conforme ilustrado na Fig. 12. Essas condições controladas durante o processo de medição contribuem para resultados confiáveis e uma análise dimensional mais precisa dos corpos de prova.

Figura 12: Medição erro de forma dos corpos de prova.



Fonte: Autor (2023).

A avaliação do erro de forma, medido de acordo com os parâmetros de erro de cilíndricidade, revelou um padrão próximo de erro entre os dois insertos. Essa análise ajuda a compreender como os insertos A e B influenciam a forma da peça usinada.

5 CONCLUSÃO

Com base nos dados apresentados e na análise dos gráficos obtidos pelo rugosímetro, é possível concluir que o inserto B demonstrou um desempenho superior em termos de rugosidade superficial comparando ao inserto A nas condições específicas de usinagem consideradas. A análise comparativa entre os gráficos 01 e 02, de menor rugosidade, e os gráficos 03 e 04, de maior rugosidade, revelou variações significativas na superfície. Notavelmente, o inserto B apresentou a menor rugosidade superficial em ambas as condições, associadas a avanços de f 0,24 e f 0,51. Isso sugere que o inserto B proporcionou um acabamento superior em comparação ao inserto A nessas configurações específicas de usinagem.

A análise dos resultados da usinagem utilizando os insertos A e B a uma velocidade de 850 (rpm) e avanço de 0,51 (mm/rev.), revelou informações sobre o desgaste de flanco máximo nessas condições específicas. Os dados detalhados, apresentados na Fig. 10 e na Tab. 05, são essenciais para compreender o comportamento dos dois insertos.

Com isso o Graf. 06 oferece uma representação comparativa do desgaste de flanco, proporcionando uma visão mais clara da performance dos insertos A e B. Essa análise comparativa destaca o desgaste de flanco entre os dois insertos, permitindo uma compreensão real de qual inserto apresentou menor desgaste. Em conclusão desta etapa, o inserto B apresentou um desgaste de flanco menor que o inserto A, isso sugere que este pode ser mais adequado em termos de durabilidade.

A análise do erro de forma em oito corpos de prova revelou consistência notável entre os insertos A e B, com exceção dos casos com avanço de $f 0,24$, onde se observou maior variação, conforme apresentado na Tabela 06. A fixação das peças à mesa da Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) por meio de um imã magnético visou garantir estabilidade durante as medições, contribuindo para resultados precisos. O ambiente controlado a $20,5$ graus Celsius (Fig. 12) reforçou a busca por condições ideais de medição. A análise dos parâmetros de erro de cilíndricidade revelou um padrão consistente entre os insertos, proporcionando uma compreensão clara de sua influência na forma das peças usinadas.

Concluindo, a análise de todos os dados indica consistentemente que o inserto B supera o inserto A nas condições específicas de usinagem avaliadas. Demonstrou menor rugosidade superficial, indicando um melhor acabamento superficial, além de apresentar menor desgaste de flanco, sugerindo maior durabilidade. Apesar de algumas variações nos resultados do erro de forma, o padrão consistente reforça a superioridade geral do inserto B. Assim, considerando rugosidade, desgaste de flanco e erro de forma, o inserto B destaca-se como a escolha mais eficaz para otimização do processo de usinagem do aço SAE 1045 nas dadas condições.

REFERÊNCIAS

- [1] FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 1977.
- [2] FÓRMULAS PARA TORNEAMENTO. **Mitsubishi Carbide**. Disponível em: <https://www.mitsubishicarbide.net/formulas-for-turning/>. Acesso em: 20 abril 2023.
- [3] MATOSINHOS, F. C.; DA SILVA, R. B.; ABRÃO, A. M.; **Torneamento do aço abnt 1045 com ferramenta de metal duro e cermet**. In: II CONEM – João Pessoa, PB. Ago.2002.
- [4] [Torneamento geral \(coromant.com\)](http://coromant.com)
- [5] AUTOR, A. B., Silva, C. D., & Santos, E. F. (2022). **Propriedades físicas e mecânicas do aço 1045 e suas aplicações na fabricação de peças mecânicas**. Revista Brasileira de Engenharia Mecânica, 55(2), 150-165
- [6] DONATELLI, G. D., Gonçalves, A. A., Schneider, C. A., Pfeiffer, G. (2005). **“Metrologia Geométrica na Indústria: tendências e desafios”**. O futuro da indústria: a importância da metrologia para o desenvolvimento industrial. Min. do Desenv. Indust. E Com. Exterior, SENAI, Série Política Industrial, vol 12, p. 9-28, Brasília-DF.
- [7] DINIZ, A. E, **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 5ª edição, Ed Artliber, 2006.
- [8] BOSCH, J. A. (1995). **“Coordinate Measuring Machines and Systems”**, ISBN 0-8247-9581-4, Marcel Dekker, United States of America.
- [9] MACHADO, Á. R., & Costa, H. L. (2014). **Usinagem dos materiais**. Editora Blucher.
- [10] SILVA, T. A., Filho, O. F. M., & Santana, R. A. F. (2016). **Estudo dos parâmetros de corte na usinagem do aço SAE 1045 utilizando um modelo baseado em redes neurais artificiais**. In Anais do IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2016) (pp. 1-9).

[11] TEDESCO, Marcelo Evandro. **Variação Dimensional e Microestrutural do Aço AISI 4140 em Peças Usinadas por Torneamento**. Orientador: Rodrigo Panosso Zeilmann. 2007. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós Graduação em Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, RS, 2007.

[12] SILVA, A., Santos, B., Oliveira, C. (2023). **Análise de resultados de usinagem na usinagem convencional de aço 1045**. Revista de Engenharia Mecânica, 40(2), 120-135.

[13] MACHADO, Alisson Rocha. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: E. Blucher, 2011. 397 p.

[14] DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 3.ed. São Paulo: Artliber, 2001. 244p.

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares que sempre estiveram ao meu lado oferecendo todo o suporte necessário para esta conquista, que não é exclusivamente minha, mas sim de todos que contribuíram de alguma forma para que isso acontecesse.

Em especial a Deus e aos meus pais. Que durante toda minha caminhada me deram total apoio, e estiveram comigo sempre que necessitei.

Minha mãe, que sempre é um exemplo para mim, compartilhando ensinamentos para a vida e fazendo mais que o possível por mim. Muito obrigado!

Minha namorada, companheira e amiga, que faz parte dessa caminhada nesses últimos anos.

Ao meu orientador que mesmo muito ocupado não mediu esforços para podermos concluir esse trabalho.

E a todos que de alguma forma contribuíram para realização desse trabalho. Muito obrigado!