

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise de produtividade no torneamento externo de
desbaste no aço AISI 8630M**

Matheus Schultz Câmara Silva
Rodrigo Lutz Cechin

Prof. Orientador: Manuel Joaquim de Castro Lourenço

**Rio de Janeiro
Novembro de 2018**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise de produtividade no torneamento externo de
desbaste no aço AISI 8630M**

Matheus Schultz Câmara Silva
Rodrigo Lutz Cechin

Projeto final apresentado em cumprimento
às normas do Departamento de Educação
Superior do CEFET/RJ, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientador: Manuel Joaquim de Castro Lourenço

**Rio de Janeiro
Novembro de 2018**

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

S586 Silva, Matheus Schultz Câmara
Análise de produtividade no torneamento externo de desbaste
no aço AISI 8630M / Matheus Schultz Câmara Silva [e] Rodrigo Lutz
Cechin.—2018.
ix, 61f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.

Bibliografia : f. 59-61

Orientador : Manuel Joaquim de Castro Lourenço

1. Engenharia mecânica. 2. Torneamento. 3. Aço. 4. Usinagem.
5. Produtividade industrial. I. Cechin, Rodrigo Lutz. II. Lourenço,
Manuel Joaquim de Castro (Orient.). II. Título.

CDD 621

Elaborada pela bibliotecária Mariana Oliveira CRB-7/5929

RESUMO

A indústria de óleo e gás está sempre inovando e se desenvolvendo, atualmente é exigido redução de custo e fabricação em menor tempo para os principais componentes dos equipamentos submarinos. Logo o processo de usinagem destes equipamentos deve eliminar desperdícios, visando aumentar a produtividade, reduzir tempo de processo e consequentemente reduzir custos. A escolha correta da ferramenta de corte, assim como seus parâmetros torna-se fundamental para alcançar estes objetivos, por isso no presente trabalho foi estudado o processo de torneamento externo de desbaste, no aço AISI 8630M, em uma peça utilizada pela indústria de óleo e gás. Para atingir os resultados foram escolhidos 3 insertos distintos e foram realizados testes com eles, após os testes foi avaliado o desgaste em cada aresta dos insertos através de uma lente de ampliação de 24x. Analisou-se os tipos e intensidade dos desgastes, sendo que, os mais encontrados foram desgaste de flanco e desgaste de cratera. Ainda foi realizada a análise dos cavacos gerados pela usinagem com as pastilhas utilizadas, avaliando a geometria final dos cavacos com relação a ISO 3685 de 1993, onde é apresentado os tipos de cavacos encontrados no processo de usinagem. Para finalizar o trabalho foi realizada uma análise de produtividade, onde foi gerado um cálculo de custo da operação para cada um dos insertos avaliados. Então, concluiu-se que o inserto mais produtivo foi o da marca Kennametal, modelo CNMG 190612 MP da classe KC5010.

Palavras-chave: Torneamento externo, desgaste da ferramenta de corte, análise de produtividade.

ABSTRACT

The oil and gas industry is always innovating and developing, it is currently required to reduce cost and manufacturing in less time for the main components of the subsea equipment. Therefore, the machining process of these equipment should eliminate waste, aiming to increase productivity, reduce cycle time and consequently reduce costs. The correct choice of the cutting tool as well as its parameters becomes fundamental to reach these objectives, so in the present work the external turning process of roughing in AISI 8630M steel was studied in a part used by the oil industry and gas. To achieve the results, 3 different inserts were chosen, and tests were performed. After the tests, the wear on each edge of the inserts was evaluated through a 24x magnification lens. The types and intensity of the wear were analyzed, being the most found were flank wear and crater wear. Also, the chip analysis generated by the machining process with the used inserts was carried out, evaluating the chip geometry in relation to ISO 3685 of 1993, where the chip types found in the machining process are presented. Finally, a productivity analysis was performed, where a calculation of the cost of the operation was generated for each of the evaluated inserts. It was concluded that the most productive insert was the Kennametal, model CNMG 190612 MP of class KC5010.

Key-words: External turning, cutting tool wear, productivity analysis.

Sumário

| | |
|--|-----------|
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação | 1 |
| 1.2 Justificativa | 2 |
| 1.3 Objetivo | 3 |
| 2. Revisão bibliográfica | 4 |
| 2.1 Torneamento | 4 |
| 2.2 Parâmetros de corte..... | 6 |
| 2.2.1 Movimentos de corte | 6 |
| 2.2.2 Grandezas | 6 |
| 2.2.2.1 Avanço (F) | 7 |
| 2.2.2.2 Velocidade de corte - (Vc)..... | 7 |
| 2.2.2.3 Profundidade de corte - (Ap)..... | 8 |
| 2.3 Usinabilidade..... | 8 |
| 2.4 Ferramentas para torneamento | 8 |
| 2.4.1 Porta-ferramentas | 8 |
| 2.4.2 Insertos | 9 |
| 2.4.2.1 Materiais dos insertos..... | 11 |
| 2.4.2.2 Revestimentos aplicados em insertos | 11 |
| 2.4.2.3 Geometria dos insertos | 12 |
| 2.4.2.4 Nomenclatura de insertos | 14 |
| 2.4.2.5 Nomenclatura de porta-ferramentas (Suporte) | 17 |
| 2.5 Desgaste do inserto | 20 |
| 2.5.1 Deformação plástica | 20 |
| 2.5.2 Desgaste de cratera..... | 21 |
| 2.5.3 Desgaste de entalhe..... | 22 |
| 2.5.4 Desgaste de flanco..... | 22 |

| | |
|--|----|
| 2.5.5 Quebra da aresta de corte..... | 23 |
| 2.5.6 Lascamento | 24 |
| 2.5.7 Trincas térmicas | 24 |
| 2.6 Vida ao desgaste da ferramenta | 25 |
| 2.7 Geometria do cavaco | 27 |
| 2.7.1 Classificação dos cavacos quanto à forma..... | 27 |
| 2.8 Aço AISI 8630M | 28 |
| 3. Materiais e métodos..... | 30 |
| 3.1 Materiais..... | 30 |
| 3.2 Máquina..... | 30 |
| 3.3 Processo de usinagem | 31 |
| 3.4 Pastilhas intercambiáveis..... | 31 |
| 3.5 Porta ferramentas..... | 34 |
| 3.6 Análise de falhas | 36 |
| 3.6.1 Análise dos inserts | 36 |
| 3.6.2 Análise do cavaco..... | 36 |
| 4. Resultados e discussão..... | 37 |
| 4.1 Análise dos inserts | 37 |
| 4.1.1 Análise do CNMG 190612 RP da classe KCU25 (Kennametal)..... | 37 |
| 4.1.2 Análise do CNMG 190612 MP da classe KC5010 (Kennametal)..... | 40 |
| 4.1.3 Análise do WNMG 080412 RP da classe KCU25 (Kennametal)..... | 44 |
| 4.2 Análise dos cavacos..... | 49 |
| 4.2.1 Cavaco gerado com o inserto CNMG 190612 RP - KCU25..... | 49 |
| 4.2.2 Cavaco gerado com inserto CNMG 190612 MP - KC5010..... | 50 |
| 4.2.3 Cavaco gerado com inserto WNMG 080612 RP - KCU25..... | 51 |
| 4.3 Análise de produtividade | 52 |
| 5. Conclusão | 57 |

| | |
|--|-----------|
| 5.1 Sugestão para trabalhos futuros | 58 |
| 6. Bibliografia..... | 59 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - ÁRVORE DE NATAL MOLHADA [1] | 2 |
| FIGURA 2 - OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO [4] | 5 |
| FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS MOVIMENTOS NO PROCESSO DE TORNEAMENTO [5] | 6 |
| FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DAS VARIÁVEIS PRINCIPAIS DO PROCESSO DE TORNEAMENTO [6] | 7 |
| FIGURA 5 - PORTA-FERRAMENTAS PARA OPERAÇÕES DE TORNEAMENTO [4] | 9 |
| FIGURA 6 - GEOMETRIA RECOMENDADA PARA CADA PERFIL DE TORNEAMENTO EXTERNO [4] | 10 |
| FIGURA 7 - ÂNGULO DE FOLGA [4] | 12 |
| FIGURA 8 - ÂNGULOS DE SAÍDA E INCLINAÇÃO [4] | 13 |
| FIGURA 9 - COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES TIPOS DE RAIOS DE PONTA DA ARESTA CORTANTE [4] | 14 |
| FIGURA 10 - DEFORMAÇÃO PLÁSTICA NA ARESTA DE CORTE [11] | 21 |
| FIGURA 11 - DESGASTE DE CRATERA NA ARESTA DE CORTE [11] | 21 |
| FIGURA 12 - DESGASTE DE ENTALHE NA ARESTA DE CORTE [11] | 22 |
| FIGURA 13 - DESGASTE DE FLANCO NA ARESTA DE CORTE [11] | 23 |
| FIGURA 14 - QUEBRA DA ARESTA DE CORTE [11] | 23 |
| FIGURA 15 - LASCAMENTO DA ARESTA DE CORTE [11] | 24 |
| FIGURA 16 - TRINCA TÉRMICA NA ARESTA DE CORTE [11] | 25 |
| FIGURA 17 - DESENHO ESQUEMÁTICO DEMONSTRANDO O DESGASTE DE FLANCO (VB_B) E A PROFUNDIDADE DA CRATERA (KT) [14] | 26 |
| FIGURA 18 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE CAVACO [12] | 27 |
| FIGURA 19 - CLASSIFICAÇÃO DOS CAVACOS SEGUNDO A NORMA ISO 3685 [14] | 28 |
| FIGURA 20 - MATÉRIA PRIMA FORJADA | 30 |
| FIGURA 21 - INSERTO CNMG 190612 RP DA CLASSE KCU25 PRODUZIDO PELA KENNAMETAL [19] | 32 |
| FIGURA 22 – INSERTO CNMG 190612 MP DA CLASSE KC5010 PRODUZIDO PELA KENNAMETAL [19] | 33 |
| FIGURA 23 - INSERTO WNMG 080412 RP DA CLASSE KCU25 PRODUZIDO PELA KENNAMETAL [20] | 34 |
| FIGURA 24 - IMAGEM ILUSTRATIVA DO SUPORTE PCLNL 3232P 19 [21] | 35 |
| FIGURA 25 - IMAGEM ILUSTRATIVA DO SUPORTE C8-DWLNR-55080-08 [22] | 35 |
| FIGURA 26 - LENTE DE AUMENTO DA SANDVIK COROMANT | 36 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 27 - INSERTO DA KENNAMETAL, MODELO CNMG 190612RP DA CLASSE KCU25 APÓS TESTE. | 38 |
| FIGURA 28 - DESGASTE DA PRIMEIRA ARESTA DO INSERTO CNMG 190612 RP - KCU25 | 38 |
| FIGURA 29 - DESGASTE DA SEGUNDA ARESTA DO INSERTO CNMG 190612 RP - KCU25 | 39 |
| FIGURA 30 - DESGASTE DA TERCEIRA ARESTA DO INSERTO CNMG 190612 RP - KCU25 | 40 |
| FIGURA 31 - INSERTO DA KENNAMETAL, MODELO CNMG 190612 MP DA CLASSE KC5010 APÓS A USINAGEM. | 41 |
| FIGURA 32 - DESGASTE DA PRIMEIRA ARESTA DO INSERTO CNMG 190612 MP - KC5010 | 41 |
| FIGURA 33 - DESGASTE DA SEGUNDA ARESTA DO INSERTO CNMG 190612 MP - KC5010 | 42 |
| FIGURA 34 - DESGASTE DA TERCEIRA ARESTA DO INSERTO CNMG 190612 MP - KC5010 | 43 |
| FIGURA 35 - DESGASTE DA QUARTA ARESTA DO INSERTO CNMG 190612 MP - KC5010 | 44 |
| FIGURA 36 – INSERTO KENNAMETAL, MODELO WNMG 080412 RP DA CLASSE KCU25 APÓS USINAGEM. | 45 |
| FIGURA 37 - DESGASTE DA PRIMEIRA ARESTA DO INSERTO WNMG 080412 RP - KCU25 | 45 |
| FIGURA 38 - DESGASTE DA SEGUNDA ARESTA DO INSERTO WNMG 080412 RP - KCU25 | 46 |
| FIGURA 39 - DESGASTE DA TERCEIRA ARESTA DO INSERTO WNMG 080412 RP - KCU25 | 47 |
| FIGURA 40 – DESGASTE DA QUARTA ARESTA DO INSERTO WNMG 080412 RP - KCU25 | 47 |
| FIGURA 41 – DESGASTE DA QUINTA ARESTA DO INSERTO WNMG 080412 RP - KCU25 | 48 |
| FIGURA 42 - GEOMETRIA FINAL DO CAVACO GERADO NO PRIMEIRO EXPERIMENTO (PASTILHA CNMG 190612RP DA CLASSE KCU25, PRODUZIDO PELA KENNAMETAL) | 50 |
| FIGURA 43 - GEOMETRIA FINAL DO CAVACO GERADO NO SEGUNDO EXPERIMENTO (PASTILHA CNMG 190612 RP DA CLASSE KC5010, PRODUZIDO PELA KENNAMETAL) | 51 |
| FIGURA 44 - GEOMETRIA FINAL DO CAVACO GERADO NO TERCEIRO EXPERIMENTO (PASTILHA WNMG 080412 RP DA CLASSE KCU25, PRODUZIDO PELA KENNAMETAL) | 52 |
| FIGURA 45 – GRÁFICO DE CUSTO DA OPERAÇÃO COM CADA INSERTO | 55 |
| FIGURA 46 – REDUÇÃO DE CUSTO DA OPERAÇÃO PARA 50 PEÇAS | 56 |
| FIGURA 47 – REDUÇÃO DE TEMPO DE USINAGEM DA OPERAÇÃO PARA 50 PEÇAS | 56 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 1 - INSERTOS E SUAS GEOMETRIAS | 15 |
| TABELA 2 – ÂNGULOS DE FOLGA [9] (ADAPTADO) | 16 |
| TABELA 3 - ESPESURA DOS INSERTOS [9] (ADAPTADO) | 17 |
| TABELA 4 - MÉTODOS DE FIXAÇÃO DOS PORTA-FERRAMENTAS [9] (ADAPTADO) | 18 |
| TABELA 5 - ÂNGULO DE POSIÇÃO DOS PORTA-FERRAMENTAS [9] (ADAPTADO) | 19 |
| TABELA 6 - COMPRIMENTO DAS HASTES DOS PORTA FERRAMENTAS [9] (ADAPTADO) | 20 |
| TABELA 7 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA AÇO AISI 8630M [17] | 29 |
| TABELA 8 - REQUISITOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS UTILIZADAS EM APLICAÇÕES SUBMARINAS [17] | 29 |
| TABELA 9 - DIMENSÕES E PARÂMETROS DO INSERTO CNMG 190612 RP DA CLASSE KCU25 PRODUZIDO PELA KENNAMETAL [19] | 32 |
| TABELA 10 - PARÂMETROS UTILIZADOS NO INSERTO CNMG 190612 RP DA CLASSE KCU25 PRODUZIDO PELA KENNAMETAL | 32 |
| TABELA 11 - DIMENSÕES E PARÂMETROS DO INSERTO CNMG 190612 MP DA CLASSE KC5010 PRODUZIDO PELA KENNAMETAL [19] | 33 |
| TABELA 12 - PARÂMETRO UTILIZADOS NO INSERTO CNMG 190612 MP DA CLASSE KC5010 PRODUZIDO PELA KENNAMETAL | 33 |
| TABELA 13 - DIMENSÕES E PARÂMETROS DO INSERTO WNMG 080412 RP DA CLASSE KCU25 PRODUZIDO PELA KENNAMETAL [20] | 34 |
| TABELA 14 - PARÂMETRO UTILIZADOS NO INSERTO WNMG 080412 MP DA CLASSE KCU25 PRODUZIDO PELA KENNAMETAL | 34 |
| TABELA 15 - TEMPOS DE CORTE PARA CADA INSERTO | 53 |

1. Introdução

O petróleo representa a maior parcela da matriz energética mundial, além de ser utilizado como fonte de matéria prima para diversas indústrias. Esses números tendem a aumentar com as descobertas de novas reservas petrolíferas no mundo e com isso o mercado de óleo e gás está investindo cada vez mais em novas tecnologias para a exploração em águas profundas.

Outro foco do setor petrolífero é na eliminação de desperdícios. As grandes operadoras dos campos de petróleo não aceitam mais ineficiências e custos desnecessários nos processos de produção dos equipamentos. Além de exigirem alta qualidade, menor custo e tempo de entrega. Por estes motivos o estudo das operações de usinagem tem grande importância, visto que é um processo produtivo que tem um custo elevado e possui alta complexidade.

Nos dias de hoje, há no mercado brasileiro fabricantes de ferramentas de cortes com diversas tecnologias para a usinagem de ligas. Assim, para adequar-se ao cenário atual é necessário a constante pesquisa e análise das ferramentas de corte. Características como custo, parâmetros de corte e vida útil da ferramenta influenciam diretamente o processo produtivo e consequentemente no lucro das empresas.

1.1 Motivação

Com o desafio de atender aos requisitos dos clientes do setor de óleo e gás, neste projeto será abordada a operação de torneamento externo, que é muito utilizada para fabricação de peças de equipamentos submarinos, para extração de petróleo e seus derivados, como: Árvore de Natal Molhada, Manifolds e Conectores. A geometria destas peças apresenta geralmente uma parte do corpo em formato cilíndrico.



Figura 1 - Árvore de natal molhada [1].

Além disto, neste projeto o objeto de estudo será o aço baixa liga AISI 8630M. Segundo Garza [2], este material é muito aplicado na indústria petrolífera por apresentar características como: alta resistência mecânica e boa tenacidade. Tais propriedades são indispensáveis para garantir a confiabilidade e qualidade dos componentes que serão utilizados em campos de petróleo.

1.2 Justificativa

A tendência dos últimos anos é o crescimento da exploração e produção de óleo e gás em águas profundas, como em campos no golfo do México e na bacia de campos com a exploração do pré sal. Logo, materiais de baixa liga com resistência a baixas temperaturas e altas pressões, como o AISI 8630M, serão cada vez mais utilizados devido a estas características.

O presente trabalho será uma contribuição na compreensão da produtividade e custo benefício no torneamento externo do aço AISI 8630M. Neste trabalho são estudados aspectos como a vida útil dos insertos intercambiáveis, a análise do cavaco gerado e o custo de produção do inserto. A análise de tais condições visa chegar em importantes conclusões sobre tempo de usinagem, vida útil da ferramenta, quebra do cavaco e a ferramenta que irá gerar o menor custo de produção.

1.3 Objetivo

De forma geral este projeto tem como objetivo levantar a vida útil dos insertos intercambiáveis selecionados na usinagem por torneamento externo uma liga de aço AISI 8630M. No final da análise de desgaste (vida da ferramenta) será feito a análise do cavaco gerado e por último o custo de produção com cada inserto. Assim, o trabalho tem como objetivo:

- Usinar o aço AISI 8630M com três insertos intercambiáveis distintos, utilizando parâmetros selecionados de acordo com a geometria e classe do inserto;
- Análise de desgaste de cada aresta de cada inserto, analisando se os parâmetros selecionados são de fato o ideais;
- Análise do cavaco gerado, visando garantir a qualidade da peça usinada;
- Análise de produtividade de cada inserto.

2. Revisão bibliográfica

As operações de usinagem têm como objetivo transformar uma matéria prima em uma geometria desejada através da remoção de material (cavaco), esta nova geometria tem forma, dimensões e rugosidade determinadas. Cavaco é o material retirado pela ferramenta de corte durante o processo de usinagem como torneamento, furação, fresamento, entre outros [3].

Assim, a operação de usinagem tem como objetivo alterar a forma, dimensão ou acabamento da peça através da retirada de material com formação de cavaco. Diferente das operações de conformação que tem o mesmo objetivo, porém não há formação de cavaco (estampagem, dobramento, calandragem, etc.).

2.1 Torneamento

Na operação de torneamento a matéria prima a ser usinada é presa em um torno (máquina que realiza operações de torneamento) e sofre rotação enquanto a ferramenta de corte movimenta-se retirando material. A ferramenta de corte no torneamento move-se no eixo longitudinal ou radial da peça, ela também pode mover-se na combinação dos dois eixos. Ao movimentar-se na direção longitudinal da peça, a ferramenta retira material em seu diâmetro e assim diminui o diâmetro da peça, ao movimentar-se na direção radial (operação chamada de faceamento) reduzir o comprimento da peça [4].

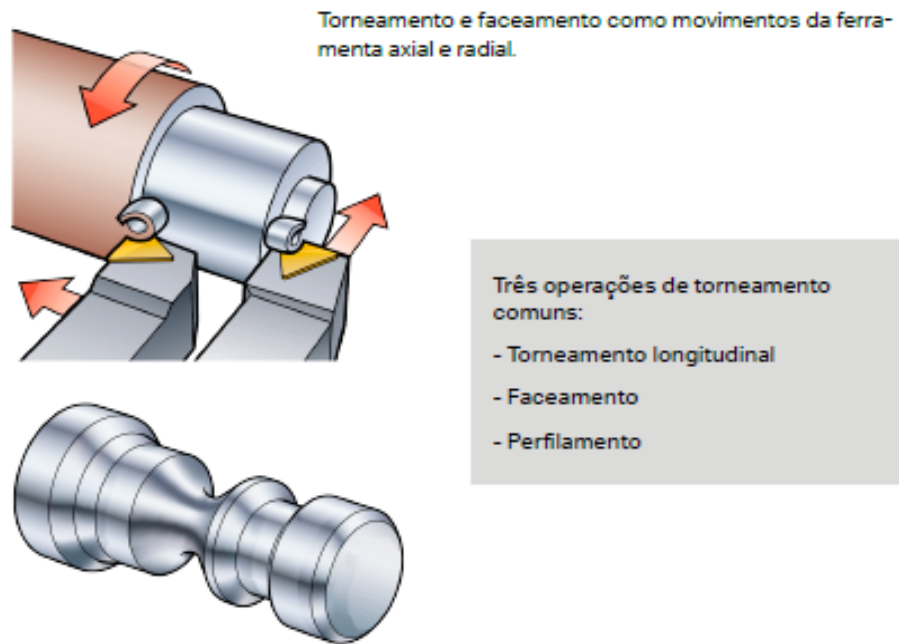


Figura 2 - Operação de torneamento [4].

Observa-se na figura 2, o torneamento altera a forma da peça deixando-a com o formato desejado (desde que o formato desejado seja um formato obtido através de revolução), alterando suas dimensões. A rugosidade final da peça dependerá diretamente dos parâmetros adotados no processo de torneamento como, velocidade de corte, avanço, raio da ponta do inserto, entre outros.

Segundo Ferraresi [3] o torneamento pode ser dividido em duas classificações, retilíneo ou curvilíneo.

- Torneamento retilíneo - torneamento no qual a ferramenta movimenta-se de forma retilínea. Este tipo de torneamento pode ser dividido em: torneamento cilíndrico (movimento longitudinal), cônico (movimento longitudinal e radial ao mesmo tempo), radial (movimento radial) e perfilamento [3].
- Torneamento curvilíneo - quando a ferramenta se movimenta em trajetória curvilínea. Este movimento é empregado para gerar formas curvas na peça, por exemplo raios para remoção de canto vivo [3].

2.2 Parâmetros de corte

2.2.1 Movimentos de corte

No torneamento existem três movimentos ativos, ou seja, que promovem remoção de material. São eles:

- Movimento de corte - movimento relativo entre ferramenta e peça, este movimento gera a remoção de cavaco durante uma única rotação [5];
- Movimento de avanço - movimento no qual a ferramenta se desloca, juntamente com o movimento de corte gera a remoção constante de material da peça (também gerando cavaco continuamente) até que a ferramenta chegue no final do seu curso [5];
- Movimento efetivo de corte - movimento entre ferramenta e peça, resultante do movimento de corte e o movimento de avanço [5]. O movimento efetivo de corte pode ser visto, assim como os outros movimentos na figura 3.

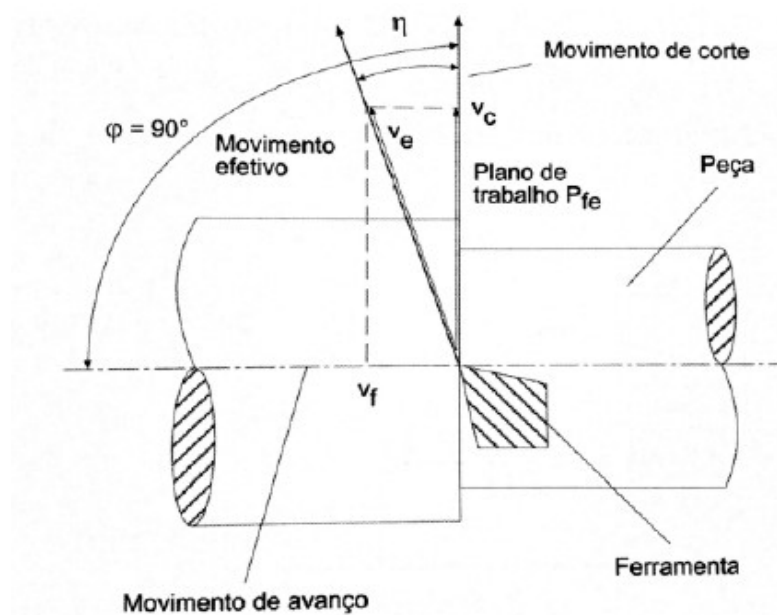


Figura 3 - Representação esquemática dos movimentos no processo de torneamento [5].

2.2.2 Grandezas

Atualmente os parâmetros de corte são as grandezas definidas pela engenharia, que são inseridas nos programas de máquinas CNC. Tais grandezas influenciam diretamente na

usinagem, tempo de processo, acabamento superficial, quebra do cavaco e custo. Para o processo de torneamento os principais parâmetros a serem determinados são: avanço, velocidade de corte e profundidade de corte [4]. Na figura 4 observa-se esquematicamente cada um dos parâmetros abordados.

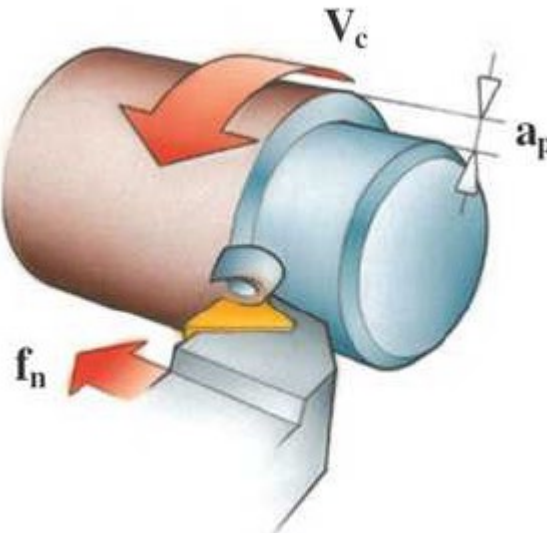


Figura 4 - Representação das variáveis principais do processo de torneamento [6].

2.2.2.1 Avanço (F)

O avanço pode ser definido como a distância que a ferramenta se movimenta a cada volta da peça [4]. A velocidade de avanço (V_f) é uma grandeza proporcional ao avanço e pode ser calculada pelo produto do avanço (F), em mm/rot, pela rotação da ferramenta (n), em RPM, conforme equação abaixo:

$$V_f = F \cdot n \text{ (mm/min)} \quad (1)$$

2.2.2.2 Velocidade de corte - (V_c)

A velocidade de corte no torneamento pode ser definida como a velocidade da ferramenta no ponto de corte no qual ela se encontra [3]. Para realizar o cálculo da velocidade de corte utiliza-se a fórmula abaixo:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ (m/min)} \quad (2)$$

2.2.2.3 Profundidade de corte - (Ap)

A profundidade de corte é a distância entre o fundo do corte e a superfície da peça, medida perpendicularmente à superfície da peça.

2.3 Usinabilidade

O termo “usinabilidade” visa identificar a facilidade ou dificuldade de se trabalhar com o material. Um material de alta usinabilidade significa que ele é um material fácil de usinar, pois tem características que favorecem o processo. Segundo Ferraresi [3] os principais fatores que influenciam na usinabilidade de um material são a composição química, microestrutura, dureza, propriedades das tensões e deformações e a rigidez da peça.

A usinabilidade é a relacionada a facilidade em se usinar o material desejado com as operações de usinagem (torneamento, fresamento, furação, etc.). A usinabilidade também tem ligação com a vida da ferramenta de corte, energia necessária para a remoção de determinado volume de material e até com o tempo que será necessário para retirar um volume de material definido [7].

2.4 Ferramentas para torneamento

2.4.1 Porta-ferramentas

O porta-ferramentas deve oferecer estabilidade ao processo desejado, facilitando a usinagem para atender aos requisitos solicitados pelo desenho técnico da peça final. O porta-ferramenta deve fixar a ferramenta garantindo o controle do processo, fluxo de cavacos e o acesso da ferramenta aos locais a serem usinados [6].

O porta ferramenta deve ser escolhido de acordo com o tipo de usinagem a ser empregado na peça. Um suporte para operações de desbaste deve resistir a grandes esforços enquanto um porta ferramenta para acabamento deve gerar a maior estabilidade possível para o processo para gerar o melhor acabamento, então os dois processos utilizarão porta-ferramentas bem distintos para cada operação. Assim, o porta-ferramentas está ligado diretamente a performance da usinagem, a escolha certa do porta-ferramentas pode definir se os requisitos serão atendidos com facilidade [6]. A figura 5 mostra ilustrações de porta ferramentas (2 para usinagem de canais e 1 para torneamento externo).



Figura 5 - Porta-ferramentas para operações de torneamento [4].

2.4.2 Insertos

O inserto é efetivamente a única parte da ferramenta que entra em contato com a peça, para isso, deve ser de material mais duro que o material a ser usinado. A escolha do inserto leva em consideração diversas variáveis, como o material a ser usinado, o material base do inserto, o revestimento aplicado no inserto, sua geometria (raio de ponta, ângulo de saída, ângulo de folga, etc.), o perfil a ser usinado, entre outros.

Pode-se verificar na figura 6 a geometria de inserto recomendadas pela Sandvik Coromant para cada tipo de perfil que pode ser trabalhado no torneamento externo.

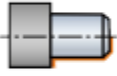
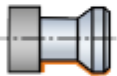









| Formato da pastilha | | Torneamento longitudinal | Perfilamento | Faceamento | Usinagem de bolsões |
|---|-----------|---|--|---|---|
| ++ = Recomendação + = Alternativa | |  |  |  |  |
|  Rômbica 80° | ++ | | | + | |
|  Rômbica 55° | + | | ++ | + | |
|  Redonda | + | | + | + | ++ |
|  Quadrado | + | | | ++ | |
|  Triangular | + | | + | + | |
|  Trigonal 80° | + | | | + | |
|  Rômbica 35° | | | + | | |

Figura 6 - Geometria recomendada para cada perfil de torneamento externo [4].

2.4.2.1 Materiais dos insertos

- Aço Rápido - os aços rápidos são aços onde o carbono combina-se com elementos de liga gerando carbonetos e alta dureza a liga. Pode gerar dureza uniforme em peças de aproximadamente 300 milímetros de diâmetro e podem atingir sua dureza máxima sofrendo o processo de têmpera e resfriando-se ao ar parado [8].
- Metal duro - os metais duros são formados por carbonetos de titânio e tântalo. São feitos através da metalurgia do pó no qual junta-se o pó destes carbonetos e são misturados com cobalto em pó, são comprimidos e levados a altas temperaturas para sofrerem o processo de sinterização [7].
- Cermet - Composto formado por um material cerâmico e um metálico. Seu principal elemento é o carboneto de titânio (TiC) e usa como ligante o níquel (Ni). Tem como objetivo ter a dureza de um material cerâmico e a ductilidade de um material metálico.
- Cerâmicos - são formados por cerâmica ou óxidos metálicos. Podem ser usados em velocidades muito altas. Este tipo de material só pode ser utilizado como ferramenta de corte em máquinas que possibilitem velocidades de corte elevadas e rigidez suficiente para resistir ao processo. [3].

Há também ferramentas de CBN (nitreto cúbico de boro) e PCD (diamante policristalino), ambos são obtidos através da sinterização, porém são usados para aplicações específicas.

2.4.2.2 Revestimentos aplicados em insertos

O revestimento aplicado em insertos tem como objetivo unir as propriedades do material do núcleo com as propriedades do material do revestimento, uma classe de inserto pode ter nenhum, um ou mais tipos de cobertura para determinada aplicação. O revestimento é dividido em dois modos segundo o seu processo de fabricação. Pode-se obter uma camada de revestimento pelo método CVD, realizado através da deposição química de vapor, onde o material de revestimento se adere ao material do núcleo através de reações químicas acima de 700°C. O outro processo é o processo PVD, que é realizado através da deposição física de vapor

que é realizado em temperaturas entre 400 e 600°C e tem como objetivo aumentar a resistência ao desgaste sem remover consideravelmente a tenacidade da aresta. [9].

As principais coberturas utilizadas são: carboneto de titânio (TiC), nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN) e óxido de alumínio (Al₂O₃). O revestimento é feito com um tipo de cobertura ou com a combinação delas.

Podemos citar o inserto da classe GC2025 (M25. P35) da Sandvik, presente no Manual Técnico de Usinagem na página A73 que possui uma combinação de camadas externas de TiN e Al₂O₃ [6].

2.4.2.3 Geometria dos insertos

Além do que foi apresentado na figura 6, aqui será abordado mais profundamente sobre a geometria do inserto e também será dito como identificar um inserto pela sua nomenclatura.

- Aresta de corte - aresta que tocará a peça e irá realizar o corte;
- Superfície de folga - é a superfície oposta à superfície de corte da ferramenta que toca a peça [3];
- Superfície de saída - é a superfície na qual o material da peça entra em contato com a ferramenta gerando o corte e a formação de cavacos [3];
- Ângulo de folga (α) - ângulo entre a superfície de corte e a superfície de folga do inserto.

A figura 7 mostra o ângulo de folga em um inserto intercambiável;

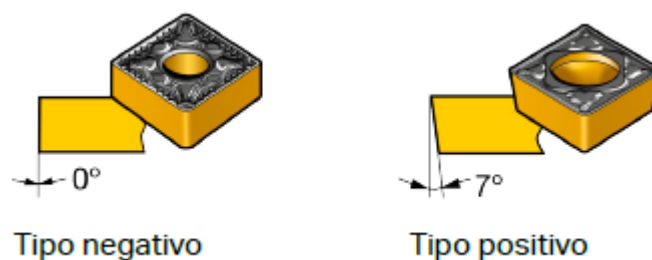


Figura 7 - Ângulo de folga [4].

- Ângulo de saída (γ) - é o ângulo formado entre a superfície da peça a ser usinada e a superfície de saída da ferramenta. Ela afeta diretamente a força de corte, a potência da máquina o acabamento final e a formação de cavacos [4];
- Ângulo de inclinação (λ) - é o ângulo no qual a ferramenta é montada no suporte, o ângulo de inclinação define qual será o ângulo de corte da ferramenta [4]. A figura 8

mostra exatamente onde se localizam o ângulo de saída e o ângulo de inclinação no torneamento;

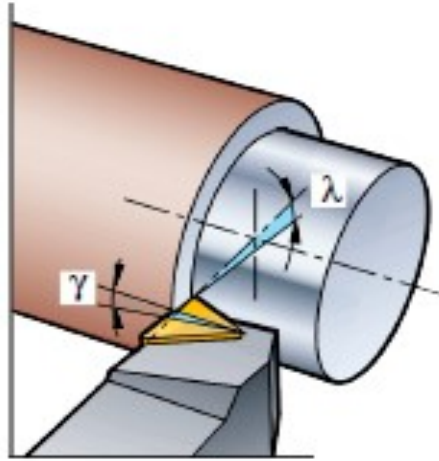


Figura 8 - Ângulos de saída e inclinação [4].

- Raio de ponta da aresta de corte (RE) - o raio de ponta afeta diretamente a qualidade da operação a ser empregada, afetando diretamente a resistência da aresta e o acabamento superficial. Os raios de ponta são encontrados entre 0,2 milímetros e 2,4 milímetros . Na figura 9 é mostrado como variar o raio de ponta da ferramenta (RE) afeta a sua operação. Raios de ponta menores diminuem a vibração e geram arestas menos resistentes, isto torna estes raios ideais para acabamento, onde procura-se ter melhor acabamento e as forças de corte são menores. Em contrapartida os raios de ponta maiores tornam a aresta do inserto mais robusta, assim podem ser usadas para maiores parâmetros de corte, ideal para operações de desbaste [4].

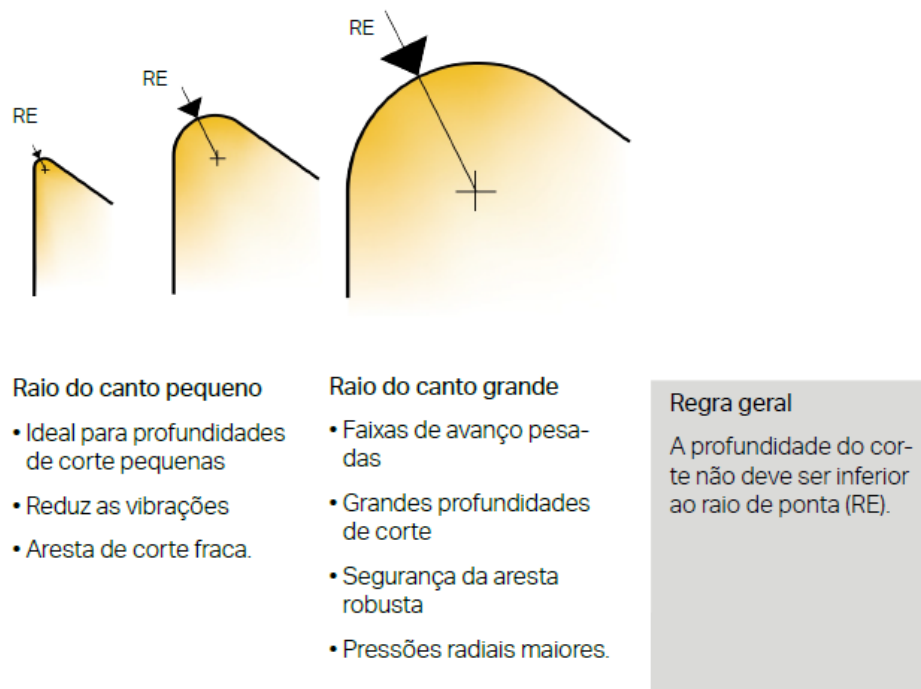


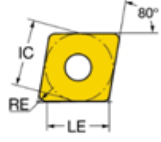


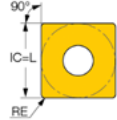

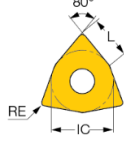
Figura 9 - Comparação entre diferentes tipos de raio de ponta da aresta cortante [4].

2.4.2.4 Nomenclatura de insertos

Os insertos para torneamento seguem uma classificação padronizada pela ISO. Composta por 12 caracteres alfanuméricos.

O primeiro caractere determina a geometria do inserto. Por exemplo, a geometria C, que é uma geometria romboidal com ângulo de ponta de 80 graus. Na tabela 1 será possível ver as geometrias mais usuais dos insertos para torneamento e seus ângulos de ponta. Lembrando que insertos com ângulos de ponta maiores dão maior resistência a aresta, fazendo os insertos com ângulos de ponta maiores ideais para desbaste. E ângulos de pontas menores diminuem a vibração, ideal para operações de acabamento [4], isto foi mostrado na figura 9.

Tabela 1 - Insetos e suas geometrias.

| Caractere | Geometria do inserto | Imagem |
|-----------|----------------------|---|
| C | Romboidal 80° |  |
| D | Romboidal 55° |  |
| R | Redondo |  |
| S | Quadrado |  |
| T | Triangular |  |
| W | Trigonal |  |

O segundo caractere corresponde ao ângulo de folga do inserto. Quanto menor o ângulo de folga do inserto, maior será a sua robustez. Entretanto, maior será a tendência a vibrações [4]. Na tabela 2 mostra alguns dos caracteres e os ângulos de folga correspondente. Para desbaste externo utiliza-se pastilhas negativas (caractere N) para maior robustez, mas no torneamento interno o ângulo de folga torna-se fator importante, visto que a superfície de folga não pode tocar a superfície da peça.

Tabela 2– Ângulos de folga [10] (adaptado).

| Caractere | Ângulo de Folga (em graus) |
|------------------|-----------------------------------|
| A | 3 |
| B | 5 |
| C | 7 |
| D | 15 |
| E | 20 |
| F | 25 |
| G | 30 |
| N | 0 |
| P | 11 |

O terceiro caractere corresponde às tolerâncias dimensionais do raio de ponta, do diâmetro do círculo inscrito e da espessura do inserto. O quarto caractere significa o modo de fixação do inserto e/ou quebra-cavaco, deve-se prestar atenção que este fator também irá aparecer na nomenclatura dos suportes e estes dois devem ser iguais, senão a montagem será incompatível.

O quinto caractere e o sexto caractere juntos indicam o comprimento da aresta de corte do inserto em milímetros. Por exemplo, no inserto CNMG 120404 PP (produzido pela Iscar) a aresta de corte tem 12 mm. Outro exemplo seria o CNMG 190616 NR (também produzido pela Iscar) que possui aresta de corte de 19 mm.

O sétimo caractere e o oitavo caractere indicam a espessura do inserto. Será possível ver na tabela 3 a espessura do inserto em função dos caractere que são mostrados no nome do inserto.

Tabela 3- Espessura dos insertos [10] (adaptado).

| Caractere | Espessura (mm) |
|------------------|-----------------------|
| T3 | 3,97 |
| 04 | 4,76 |
| 05 | 5,56 |
| 06 | 6,35 |
| 07 | 7,94 |
| 09 | 9,52 |
| 12 | 12,7 |

O nono caractere e o décimo caractere significam o tamanho do raio de ponta do inserto em décimos de milímetro. Por exemplo, no inserto CNMG 190612 RP (produzido pela Kennametal) o raio de ponta é de 1,2 mm. No inserto CNMG 120404 PP (produzido pela Iscar) o raio de ponta tem 0,4 mm. No inserto CNMG 190616 NR (produzido pela Iscar) o raio de ponta tem 1,6 mm.

Os últimos dois caractere significam qual o tipo de quebra-cavaco é utilizado naquele inserto. As letras de cada quebra-cavaco não são padronizadas, cada fabricante cria sua tecnologia em quebra-cavaco e nomeia com dois caracteres. Atualmente alguns quebra-cavacos já são nomeados com 3 caracteres, como por exemplo o inserto DNMG 150412 F3M produzido pela Iscar.

2.4.2.5 Nomenclatura de porta-ferramentas (Suporte)

Assim como nos insertos, os suportes para torneamento também seguem uma nomenclatura padronizada pela ISO. Como exemplo, temos o suporte DCLNL 2020K (produzido pela Iscar). A nomenclatura dos suportes é composta por 10 caracteres.

O primeiro caractere significa o método de fixação do suporte. Na tabela 4 será possível ver os métodos de fixação mais utilizados no torneamento.

Tabela 4 - Métodos de fixação dos porta-ferramentas [10] (adaptado).

| Caractere | Método de fixação |
|------------------|--------------------------|
| D | Dupla fixação |
| M | Fixação por cunha |
| P | Fixação por alavanca |
| S | Fixação por parafuso |
| C | Fixação por grampo |
| E | Trava excêntrica |

O segundo caractere é a geometria do inserto que pode ser utilizada no suporte. Na tabela 1 é possível ver algumas geometrias de insertos utilizadas no torneamento. Como comentado na seção de nomenclatura dos insertos, suporte e inserto devem ter o mesmo caractere para a geometria.

O terceiro caractere representa o ângulo de posição proporcionado pelo suporte. Na tabela 5 será possível ver alguns caracteres e seus respectivos ângulos de posição.

Tabela 5 - Ângulo de posição dos porta-ferramentas [10] (adaptado).

| Caractere | Ângulo de posição (em graus) |
|------------------|-------------------------------------|
| B | 75 |
| D | 45 |
| E | 60 |
| F | 90 |
| S | 45 |
| T | 60 |
| L | 95 |
| J | 93 |

O quarto caractere representa o ângulo de folga do inserto que será utilizado no suporte, mostrado na tabela 2. O quinto caractere representa o sentido de corte. R para suporte com sentido de corte direito e L para sentido de corte esquerdo.

Os próximos quatro caracteres indicam o tamanho da haste em milímetro, os dois primeiros indicando sua altura e os dois últimos indicando sua largura. No suporte citado anteriormente (DCLNL 2020K), nota-se que a haste tem um comprimento de 20 mm e largura de 20 mm.

O último caractere indica o comprimento da haste do porta-ferramenta. A tabela 6 mostra o comprimento da haste de acordo com cada caractere.

Tabela 6 - Comprimento das hastes dos porta ferramentas [10] (adaptado).

| Caractere | Comprimento da haste (mm) |
|------------------|----------------------------------|
| D | 60 |
| E | 70 |
| F | 80 |
| H | 100 |
| K | 125 |
| M | 150 |
| P | 170 |
| Q | 180 |
| R | 200 |

2.5 Desgaste do inserto

Durante a usinagem a ferramenta de corte pode ser solicitada de forma térmica, mecânica e química. Logo uma série de desgastes e avarias podem surgir na ferramenta de corte durante a sua utilização. Porém, algumas formas de desgaste são aceitáveis para o processo, e outras podem gerar riscos relacionados a qualidade final da peça usinada.

Em alguns casos o fim da vida da ferramenta pode ocorrer repentinamente através de lascamento ou quebra da aresta de corte, ou ocorre de forma progressiva ao longo da usinagem, como no desgaste de flanco. O desgaste da ferramenta de corte pode ocorrer de diversas maneiras, as quais são abordadas a seguir.

2.5.1 Deformação plástica

A deformação plástica ocorre devido à alta força de corte e alta temperatura durante o processo de usinagem, esta deformação afeta diretamente a formação de cavaco e a superfície

da peça e em altos níveis pode gerar a quebra da aresta. Para evitar este tipo de deformação deve utilizar insertos de materiais com maiores durezas e maior resistência ao calor [5]. A figura 10 ilustra o aspecto de uma deformação plástica na aresta de corte.

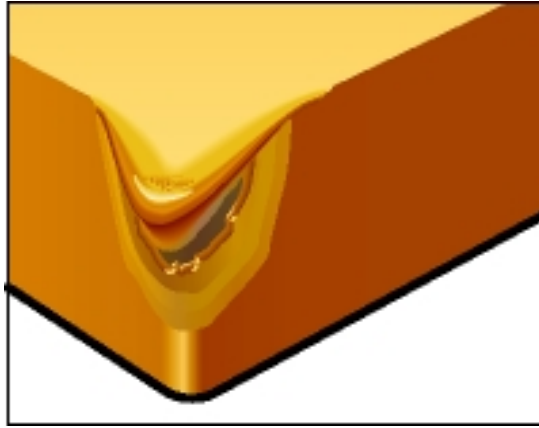


Figura 10 - Deformação plástica na aresta de corte [11].

2.5.2 Desgaste de cratera

Pode ocorrer na superfície de saída da ferramenta o desgaste de cratera, este tipo de desgaste é ocasionado pelo atrito cavaco ferramenta. Um desgaste excessivo do tipo cratera diminui a resistência do inserto podendo gerar a inutilização da aresta [4]. A formação da cratera tem ligação direta com a velocidade de corte e ao avanço utilizados. Ao utilizar a ferramenta e perceber que o desgaste de cratera está ocorrendo, pode-se abaixar os parâmetros mencionados para diminuir a formação da cratera [2]. A figura 11 mostra o desgaste de cratera em uma aresta de corte.

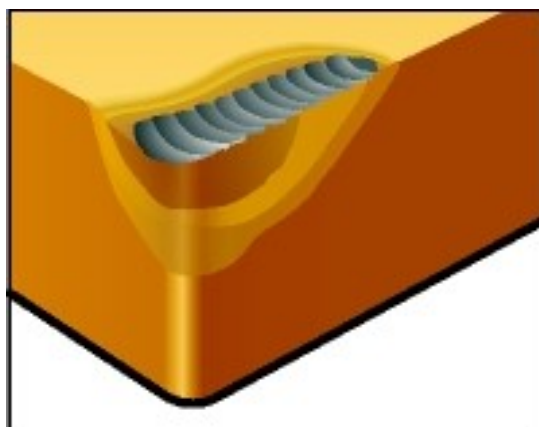


Figura 11- Desgaste de cratera na aresta de corte [11].

2.5.3 Desgaste de entalhe

Este tipo de desgaste ocorre em materiais resistentes a altas temperaturas. Com o escorregamento do cavaco na superfície, a aresta de corte sofre pequenos entalhes. A formação de entalhes enfraquece a aresta de corte diminuindo sua vida e também influencia diretamente no acabamento superficial da peça usinada [12]. Na figura 12 pode-se observar o aspecto de um desgaste de entalhe em uma aresta de corte.

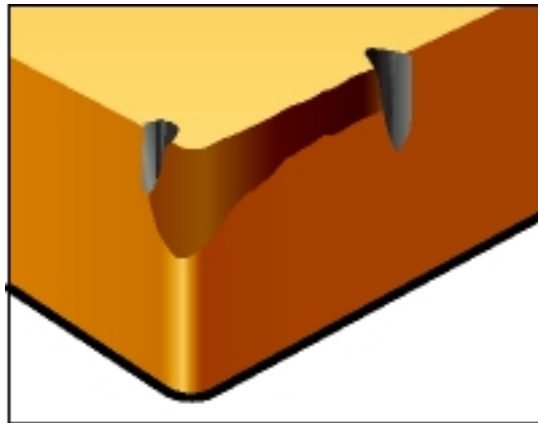


Figura 12 - Desgaste de entalhe na aresta de corte [11].

2.5.4 Desgaste de flanco

Fator mais comum que encerra a vida da ferramenta. Com o desgaste do flanco da aresta de corte, o inserto aumenta sua área de contato com a peça com a perda do seu ângulo de folga gerando maior atrito e maiores forças de corte no processo. Com isso, ao se elevar o desgaste de flanco haverá um ponto que a força de corte será tão alta que poderá gerar outros tipos de desgaste devido à alta pressão de corte. Este desgaste também afeta diretamente o acabamento superficial da peça [12]. A figura 13 mostra o desgaste de flanco em uma aresta de corte de um inserto. O desgaste de flanco é aceitável até o comprimento de 0,3mm.

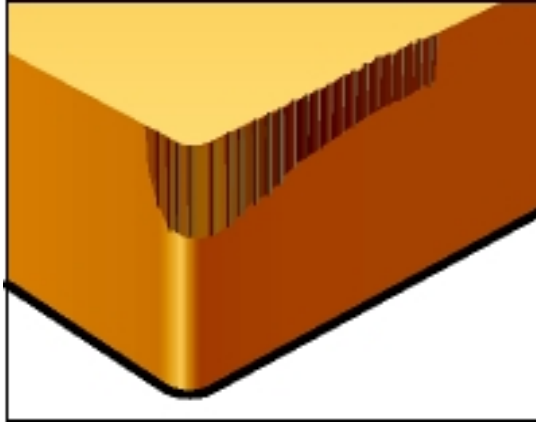


Figura 13 - Desgaste de flanco na aresta de corte [11].

2.5.5 Quebra da aresta de corte

Segundo Ferraresi [13] a ruptura da ponta ou da aresta cortante da ferramenta é originada pela ação de grandes forças de usinagem nos seguintes casos: ângulo da ponta ou ângulo de cunha pequeno, material do corte quebradiço, corte interrompido; parada instantânea do movimento de corte sem prévia retirada da ferramenta; entre outros. Esta forma de avaria é considerada a mais danosa para o processo de usinagem, pois em alguns casos pode comprometer o acabamento superficial da peça usinada ou até mesmo danificar e deslocar o porta ferramentas, assim gerando mais tempo de ciclo para o processo. A figura 14 mostra uma aresta de corte que sofreu este desgaste.

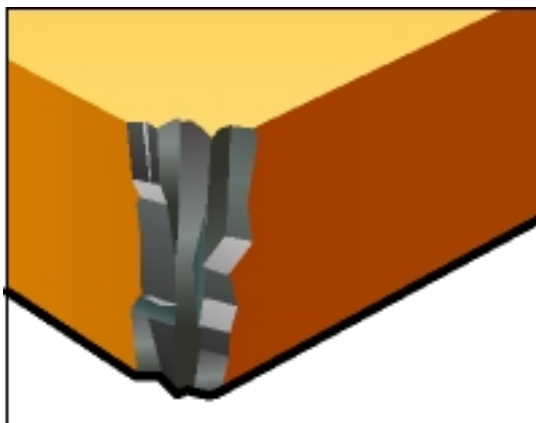


Figura 14 - Quebra da aresta de corte [11].

2.5.6 Lascamento

No lascamento uma parte da aresta de corte que não está em uso é danificada pelo martelamento de cavacos, dessa forma partículas relativamente grandes são retiradas da ferramenta (Figura 15). Acontece em ferramentas de baixa ductilidade, afeta principalmente o acabamento da peça e pode gerar a quebra da aresta de corte. Este tipo de desgaste ocorre usualmente no corte interrompido devido aos choques que a ferramenta de corte sofre [13].

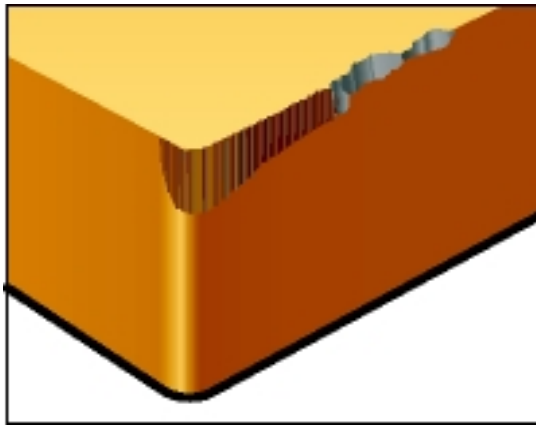


Figura 15 - Lascamento da aresta de corte [11].

2.5.7 Trincas térmicas

As trincas térmicas ocorrem quando a ferramenta está sujeita a variações repentinas de temperaturas, assim a aresta de corte (ponto da ferramenta onde é gerado o calor através da remoção de cavaco) aumenta muito sua temperatura formando a trinca. Ocorre normalmente em cortes interrompidos, pois a ferramenta é aquecida enquanto remove material da peça, e então é resfriada enquanto não está em contato com a peça, gerando rápidas variações na temperatura da aresta de corte do inserto [3]. Os esforços mecânicos causados por corte interrompido também propiciam a formação de trincas na aresta de corte. A figura 16 demonstra uma trinca térmica na aresta de corte de um inserto.

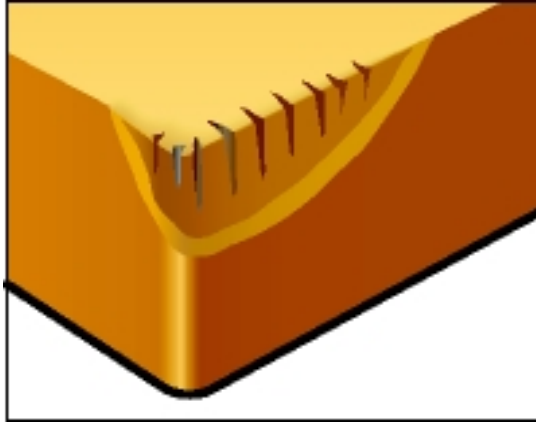


Figura 16 - Trinca térmica na aresta de corte [11].

2.6 Vida ao desgaste da ferramenta

O tempo de vida da ferramenta é o tempo no qual a ferramenta pode ser utilizada para corte até ser inutilizada, acarretando na troca da ferramenta [5]. Na norma ISO 3685 [14] são encontrados três critérios que são utilizados para determinar o fim da vida útil da ferramenta.

O primeiro é baseado no desgaste de flanco da ferramenta de corte, onde a largura máxima da marca de desgaste do flanco $VB_B \text{ máx.} = 0,6 \text{ mm}$, se a marca do desgaste não for regular na zona B (Figura 17).

O segundo critério também é baseado no desgaste de flanco da ferramenta de corte, porém neste caso é avaliada a largura média da marca do desgaste do flanco $VB_B = 0,3 \text{ mm}$, se a marca do desgaste do flanco for regular na zona B (figura 17).

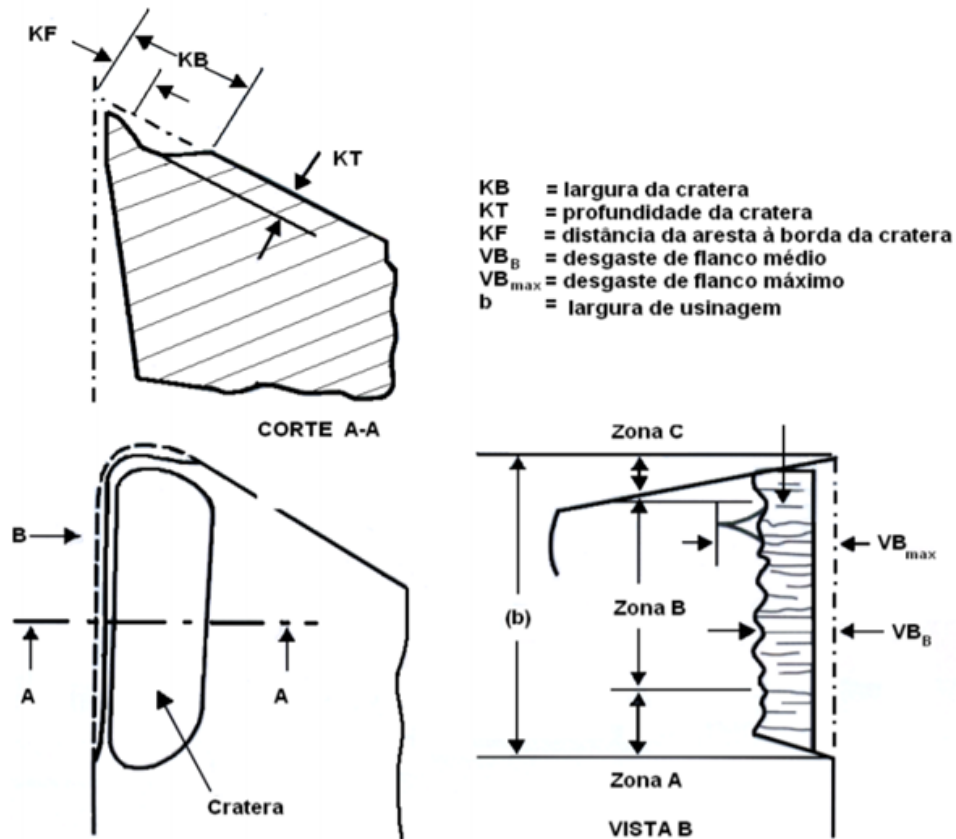


Figura 17- Desenho esquemático demonstrando o desgaste de flanco (VB_B) e a profundidade da cratera (KT) [14].

O terceiro critério é baseado na profundidade da cratera KT dada, em milímetros, da fórmula abaixo. Onde a profundidade da cratera está diretamente relacionada com o avanço da ferramenta (F).

$$KT = 0,06 + 0,3F \text{ (mm)} \quad (3)$$

Os valores citados na norma ISO 3685 são apenas sugeridos, porém cabe a cada empresa avaliar a necessidade de fabricação da peça e definir o seu próprio padrão. Por exemplo em operações de acabamento a atenção no desgaste da ferramenta é fundamental, visto que a quebra do inserto nesta etapa pode comprometer a precisão dimensional da peça e o acabamento superficial.

2.7 Geometria do cavaco

Segundo Santos e Sales [12], o mecanismo de formação do cavaco pode ser demonstrado através do deslocamento de um volume de material em direção a aresta de corte, ao se aproximar da aresta de corte este volume sofre esforços compressivos no qual o material irá sofrer deformação plástica até que sofra sua ruptura, gerando o cavaco. A figura 18 mostra um volume “klmn” se aproximando da aresta de corte no ponto “O” e sofrendo esforços compressivos, deformando-se e adquirindo a geometria “pqrs”.

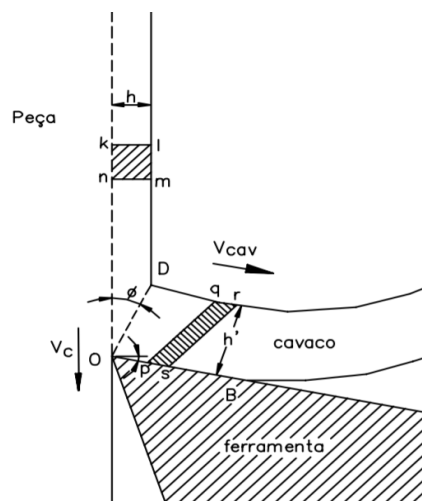


Figura 18 - Desenho esquemático do processo de formação de cavaco [12].

2.7.1 Classificação dos cavacos quanto à forma

Os cavacos são geralmente classificados como: cavaco em formato de fita, cavaco com formato helicoidal, cavaco em formato espiral e cavaco em formato de lascas ou pedaços. Porém a norma ISO oferece uma classificação mais específica dos cavacos quanto a sua geometria, como mostrado na figura 19.

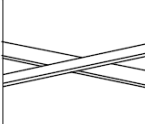
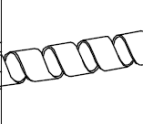


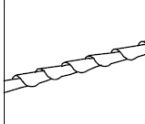



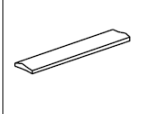
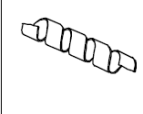


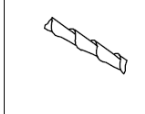





| 1- Cavaco em fita | 2- Cavaco tubular | 3- Cavaco espiral | 4- Cavaco hel. tipo arruela | 5- Cavaco hel. cônico | 6- Cavaco em arco | 7- Cavaco fragmentado | 8- Cavaco tipo agulha |
|---|---|---|---|---|--|---|---|
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1-1- Longo | 2-1- Longo | 3-1- Plano | 4-1- Longo | 5-1- Longo | 6-1- Conect. | | |
|  |  |  |  |  |  | | |
| 1-2- Curto | 2-2- Curto | 3-2- Cônico | 4-2- Curto | 5-2- Curto | 6-2- Solto | | |
|  |  | |  |  | | | |
| 1-3- Emaranhado | 2-3- Emaranhado | | 4-3- Emaranhado | 5-3- Emaranhado | | | |

Figura 19 - Classificação dos cavacos segundo a norma ISO 3685 [14].

Durante as operações de usinagem, formatos de cavaco do tipo (1), (2), (4) e (5) são indesejáveis para o processo, ocupam mais espaço que os demais formatos e podem causar problemas para o manuseio e descarte. Além de que, cavacos mais longos podem enrolar-se em torno da peça ou da ferramenta de corte, dessa forma, causam danos no acabamento superficial da peça já usinada e atrapalham o acesso do fluido de corte na interface cavaco-ferramenta.

2.8 Aço AISI 8630M

A composição química do componente selecionado como objeto de estudo neste trabalho corresponde ao aço baixa liga AISI 8630M normalizado. A principal característica deste aço é o equilíbrio entre resistência mecânica e tenacidade, após o tratamento térmico. A liga combina carbono com elementos formadores de carbonetos como cromo e molibdênio. O níquel na liga contribui com a melhora da tenacidade do material [2]. A tabela 7 mostra a composição química do AISI 8630M.

Tabela 7 - Composição química aço AISI 8630M [17].

| Elemento | Porcentagem (%) |
|-----------------|------------------------|
| Carbono [C] | 0,280 - 0,330 |
| Manganês [Mn] | 0,850 - 1,000 |
| Fósforo [P] | 0,025 máx. |
| Enxofre [S] | 0,025 máx. |
| Silício [Si] | 0,150 - 0,350 |
| Níquel [Ni] | 0,750 - 0,900 |
| Cromo [Cr] | 0,850 - 1,000 |
| Molibdênio [Mo] | 0,350 - 0,450 |

Os requisitos de propriedades mecânicas necessários para grandes peças forjadas usadas em aplicações submarinas estão ilustrados na tabela 8. Os requisitos mínimos de limite de escoamento e limite de resistência são, respectivamente, 586 e 655 MPa. Enquanto a dureza máxima permitida é de 22 HRC, segundo a norma para o uso de materiais em ambientes contendo H₂S na produção de óleo e gás [18].

Tabela 8 - Requisitos de propriedades mecânicas de peças utilizadas em aplicações submarinas [17].

| Propriedades | Dados |
|--------------------------------|--------------|
| Limite de Escoamento (Mínimo) | 586 MPa |
| Limite de Resistência (Mínimo) | 655 MPa |
| Dureza (Máximo) | 22 HRC |

3. Materiais e métodos

3.1 Materiais

No presente trabalho foi analisado o aço AISI 8630M em peças utilizadas como cabeça de poço pela indústria do óleo e gás. A geometria deste tipo de componente apresenta corpo cilíndrico com boa espessura de parede para suportar altas pressões. As medidas iniciais da matéria prima são: 424,18 milímetros de diâmetro interno, 721,36 milímetros de diâmetro externo 2242,82 milímetros de comprimento, conforme a figura 20. Foram disponibilizadas 3 peças, com as dimensões acima citadas, para a realização do experimento. O diâmetro externo final foi de 704,85 milímetros.



Figura 20 - Matéria prima forjada.

3.2 Máquina

O processo de torneamento foi realizado no parque fabril de uma empresa de grande porte, no Rio de Janeiro. Foi utilizado um Centro de Torneamento Multitarefa da marca Tacchi Giacomo, equipado com comando numérico GE Fanuc. A máquina dispõe de um motor principal com 74 kW de potência, com torque máximo de 25000 Nm, e rotação máxima da

placa de 560 rpm. A placa tem capacidade de fixar peças cilíndricas conta com um sistema de 4 castanhas independentes que podem fixar peça a partir de um diâmetro de 150mm até 1100mm.

3.3 Processo de usinagem

Primeiramente a matéria-prima forjada era fixada a placa do torno através de quatro castanhas independentes, além de uma luneta localizada mais próxima a face afastada da placa, que garantiu maior estabilidade ao processo. Em seguida a peça passava por estágios de faceamento, desbaste e acabamento interno, e posteriormente, foi submetida a passes de desbaste e acabamento no diâmetro externo, utilizando um tampão em sua extremidade para utilização do contraponto. Durante o processo de torneamento de desbaste externo foi avaliado o desempenho de vida útil da pastilha intercambiável, que foi submetida a parâmetros controlados de usinagem. Os dados avaliados durante o processo foram, o tempo de usinagem, o desgaste de cada pastilha e a geometria do cavaco gerado.

3.4 Pastilhas intercambiáveis

Foram selecionadas 3 pastilhas intercambiáveis para serem analisadas. As mesmas foram escolhidas através do catálogo das respectivas empresas fabricantes e estavam disponíveis no estoque da empresa.

- Pastilha da marca Kennametal, modelo CNMG 190612 RP - KCU25
- Pastilha da marca Kennametal, modelo CNMG 190612 MP - KC5010
- Pastilha da marca Kennametal, modelo WNMG 080412 RP – KCU25

Foi realizado um experimento comparativo para avaliar o desempenho de vida ao desgaste das pastilhas citadas acima. Cada pastilha usinou uma peça com as dimensões citadas na seção 3.1 (diâmetro inicial 721,36 milímetros, diâmetro final de 704,85 milímetros e 2242,82 milímetros de comprimento). Dessa forma foram realizadas 3 operações completas de torneamento de desbaste externo e cada uma com um inserto distinto. Nas tabelas a seguir são demonstrados os parâmetros indicados pelos fabricantes e suas dimensões.

Na primeira operação de torneamento de desbaste externo foi observado o desempenho da pastilha da marca Kennametal, modelo CNMG 190612 RP da classe KCU25 que pode ser

observada na figura 23. Ela apresenta geometria romboidal com ângulo de 80° e foi fabricada através do processo PVD (Physical Vapor Deposition) com camadas de revestimento de AlTiN, o que garante elevada resistência ao desgaste e dureza.

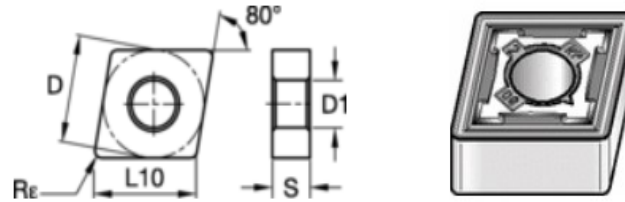


Figura 21- Inserto CNMG 190612 RP da classe KCU25 produzido pela Kennametal [19].

Tabela 9- Dimensões e parâmetros do inserto CNMG 190612 RP da classe KCU25 produzido pela Kennametal [19].

| Unidades | L10 | D | S | RE | F (min) | F (max) | Ap (min) | Ap (max) |
|------------|-------|-------|------|-----|---------|---------|----------|----------|
| Milímetros | 19,34 | 19,05 | 6,35 | 1,2 | 0,2 | 0,6 | 1,1 | 6,4 |

Os parâmetros de usinagem escolhidos para o teste do primeiro inserto foram selecionados com base na recomendação do fabricante, geometria da peça e limitações da máquina CNC. Foi utilizado um avanço de 0,381 milímetros/rotação, a profundidade de corte de 5,08 milímetros e rotação da placa de 62 RPM, assim a velocidade de corte diminuía conforme a ferramenta entrava na peça. Podemos observar que os valores encontram-se dentro da faixa especificada pela empresa desenvolvedora da pastilha, Kennametal. Na tabela 10 observa-se os dados completos aplicados nesta etapa da usinagem.

Tabela 10- Parâmetros utilizados no inserto CNMG 190612 RP da classe KCU25 produzido pela Kennametal.

| Parâmetros | Dados |
|--------------------------------|--------------|
| Rotação (n) | 62 RPM |
| Velocidade de corte média (Vc) | 138,9 m/min |
| Avanço (F) | 0,381 mm/rot |
| Profundidade de corte (Ap) | 5,08 mm |

Já a segunda pastilha analisada para operação de torneamento de desbaste externo foi a pastilha da marca Kennametal, modelo CNMG 190612 MP da classe KC5010, como mostrado

na figura 24. Esta pastilha intercambiável também apresenta geometria romboidal com um ângulo de 80° e o mesmo tipo de revestimento da primeira pastilha testada.

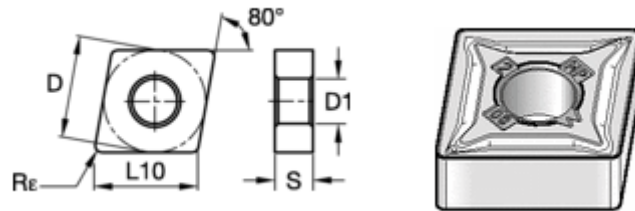


Figura 22 – Inseto CNMG 190612 MP da classe KC5010 produzido pela Kennametal [19].

Tabela 11 - Dimensões e parâmetros do inserto CNMG 190612 MP da classe KC5010 produzido pela Kennametal [19].

| Unidades | L10 | D | S | Re | F (min) | F (max) | Ap (min) | Ap (max) |
|------------|-------|-------|------|-----|---------|---------|----------|----------|
| Milímetros | 19,34 | 19,05 | 6,35 | 1,2 | 0,18 | 0,6 | 0,8 | 8,6 |

Os parâmetros utilizados nesta etapa foram, avanço de 0,457 milímetros/rotação, a profundidade de corte de 5,08 milímetros e rotação constante de 65 RPM, com isso, a velocidade de corte variou durante o processo, mas sempre dentro do especificado pelo fabricante. Os dados completos podem ser observados na tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetro utilizados no inserto CNMG 190612 MP da classe KC5010 produzido pela Kennametal.

| Parâmetros | Dados |
|--------------------------------|--------------|
| Rotação (n) | 65 RPM |
| Velocidade de corte média (Vc) | 145,6 m/min |
| Avanço (F) | 0,457 mm/rot |
| Profundidade de corte (Ap) | 5,08 mm |

A terceira pastilha avaliada foi a pastilha da marca Kennametal, modelo WNMG 080412RP da classe KCU25. Esta pastilha apresenta geometria trigonal de 80° , com camadas de revestimento de AlTiN. O diferencial desta pastilha intercambiável é justamente a sua geometria que contém 6 arestas de corte, 2 arestas a mais se comparada aos outros insertos analisados.

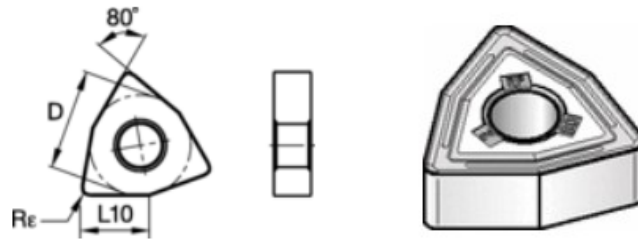


Figura 23 - Inserto WNMG 080412 RP da classe KCU25 produzido pela Kennametal [20].

Tabela 13 - Dimensões e parâmetros do inserto WNMG 080412 RP da classe KCU25 produzido pela Kennametal [20].

| Unidades | L10 | D | S | RE | F (min) | F (max) | Ap (min) | Ap (max) |
|------------|------|-------|------|-----|---------|---------|----------|----------|
| Milímetros | 8.69 | 12.07 | 6.35 | 1.2 | 0.2 | 0.6 | 1.1 | 6.4 |

Para esta etapa de usinagem foram utilizados os seguintes parâmetros, avanço de 0,305 milímetros/rotação, a profundidade de corte de 5,08 mm e rotação de 60 RPM conforme recomendado pelo fabricante. Os dados completos podem ser observados na tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetro utilizados no inserto WNMG 080412 MP da classe KCU25 produzido pela Kennametal.

| Parâmetros | Dados |
|--------------------------------|--------------|
| Rotação (n) | 60 rpm |
| Velocidade de corte média (Vc) | 134,4 m/min |
| Avanço (F) | 0,305 mm/rot |
| Profundidade de corte (Ap) | 5,08mm |

3.5 Porta ferramentas

As pastilhas intercambiáveis modelo CNMG 190612 RP e CNMG 190612 MP foram montadas em um porta ferramentas da marca Sandvik, modelo PCLNL 3232P 19 (figura 24),

que por sua vez estava fixado em uma das 12 posições disponíveis na torre traseira da máquina. Este porta ferramenta apresenta um alojamento específico, compatível apenas com insertos com geometria romboidal de 80° .

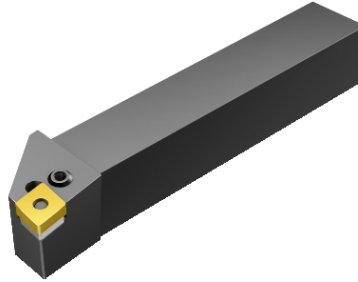


Figura 24 - Imagem ilustrativa do suporte PCLNL 3232P 19 [21].

Já para o terceiro experimento, no qual foi utilizado a pastilha modelo WNMG 080612 RP, o porta ferramentas escolhido foi o da marca Sandvik, modelo C8-DWLNR-55080-08. Este suporte é compatível com insertos que apresentam geometria trigonal 80° e dispõe de um sistema com refrigeração interna, como mostra a figura 25. Porém, durante a realização dos testes foi utilizado o sistema de refrigeração usual da máquina, pois o objetivo era testar todos os insertos sem variação na refrigeração.

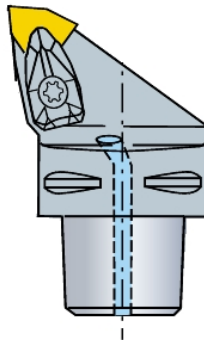


Figura 25 - Imagem ilustrativa do suporte C8-DWLNR-55080-08 [22].

3.6 Análise de falhas

3.6.1 Análise dos insertos

Após a operação torneamento externo de desbaste, cada uma das pastilhas intercambiáveis utilizadas, foi submetida a análise de falhas. Para análise de desgaste dos insertos foi utilizado o Tool Wear Analyzer, aplicativo da Sandvik Coromant (somente para iOS) para avaliar o desgaste dos insertos. Com este aplicativo é possível tirar fotos dos insertos e medir em micrômetros o desgaste do flanco do inserto e outras possíveis falhas que foram abordadas no tópico 2.4.

O aplicativo foi usado em um Iphone 5S que possui câmera de 8 megapixels e resolução de 3264x2448 pixels. Foi acoplado ao Iphone 5S uma lente de aumento da Sandvik Coromant com capacidade de ampliar até 24x. Combinando a câmera do Iphone 5S, a lente de aumento e o Tool Wear Analyzer da Sandvik Coromant, foram avaliados os desgastes nos insertos. A imagem da lente de aumento pode ser vista na figura 28.



Figura 26 - Lente de aumento da Sandvik Coromant.

3.6.2 Análise do cavaco

Para finalizar, a análise do trabalho experimental, foi realizada uma inspeção visual no cavaco gerado no processo de torneamento externo de desbaste. Esta análise é interessante, pois o perfil do cavaco formado pelo processo, pode ser um indicativo da qualidade da usinagem, do fim da vida da ferramenta ou até mesmo indicar uma condição de risco para segurança do operador da máquina.

4. Resultados e discussão

4.1 Análise dos insertos

Nesta seção serão analisados os desgastes dos insertos, aresta por aresta, observando os tipos de desgastes que ocorreram, também será feita, posteriormente, a análise do cavaco que visa identificar se a geometria do cavaco é a recomendada para o tipo de operação. Por último será avaliado o custo da usinagem com cada inserto sem levar em conta o custo da matéria prima, pois a matéria prima sofreu outros tipos de usinagem como acabamento externo, desbaste interno, acabamento interno e operação de canais. Para avaliar o custo da usinagem total da peça seria necessário avaliar o custo da matéria prima mais o custo de todas as operações feitas na peça.

4.1.1 Análise do CNMG 190612 RP da classe KCU25 (Kennametal)

Nesta seção será analisado o desgaste que ocorreu em cada aresta do inserto CNMG 190612 RP da classe KCU25 da Kennametal. Os parâmetros utilizados neste inserto e suas dimensões podem ser vistos na tabela 10.

A figura 27 mostra cada aresta do inserto. Como se trata de um inserto de geometria C (CNMG) e ângulo de folga igual a zero (CNMG), este inserto possui 4 arestas de corte.

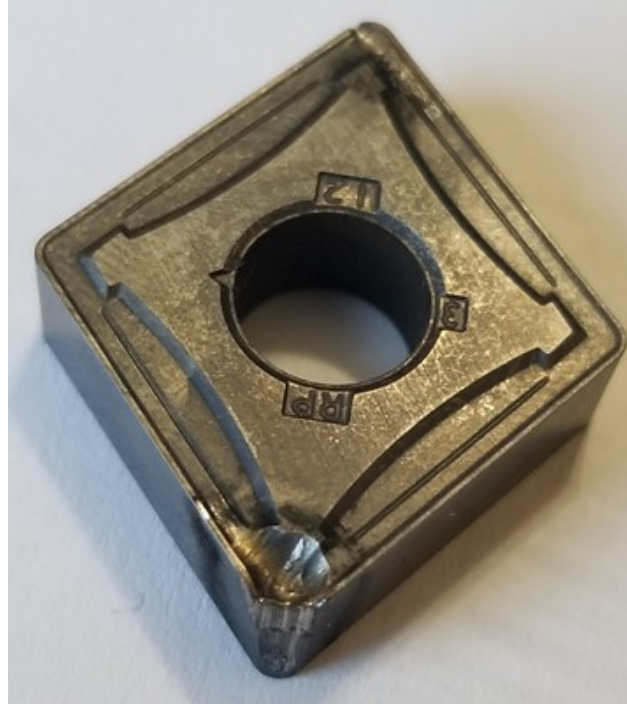


Figura 27 - Inseto da Kennametal, modelo CNMG 190612RP da classe KCU25 após teste.

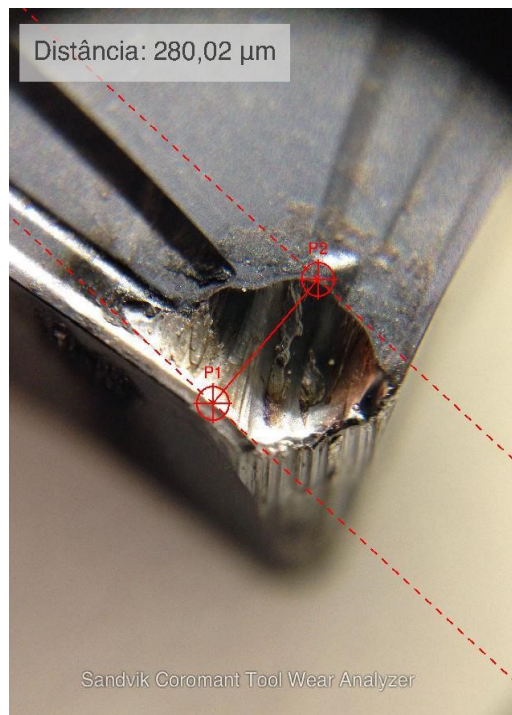


Figura 28 - Desgaste da primeira aresta do inseto CNMG 190612 RP - KCU25.

A figura 28 mostra que a primeira aresta sofreu dois defeitos simultaneamente, desgaste de cratera e quebra do flanco. Ambos defeitos inutilizam a aresta de corte, porém a quebra do flanco foi severa ao ponto de inutilizar a aresta do lado oposto. Assim, só será possível utilizar 3 arestas de corte deste inseto.

Isto é um indicativo que a velocidade de corte e o avanço adotados podem estar maiores que o adequado, pois houve a formação da cratera na aresta de corte. Com a formação da cratera e seu crescimento durante o processo de usinagem, acredita-se que isso ocasionou a fratura posteriormente a formação da cratera, visto que a formação da cratera gera o enfraquecimento da aresta de corte, tornando a aresta suscetível à fratura.

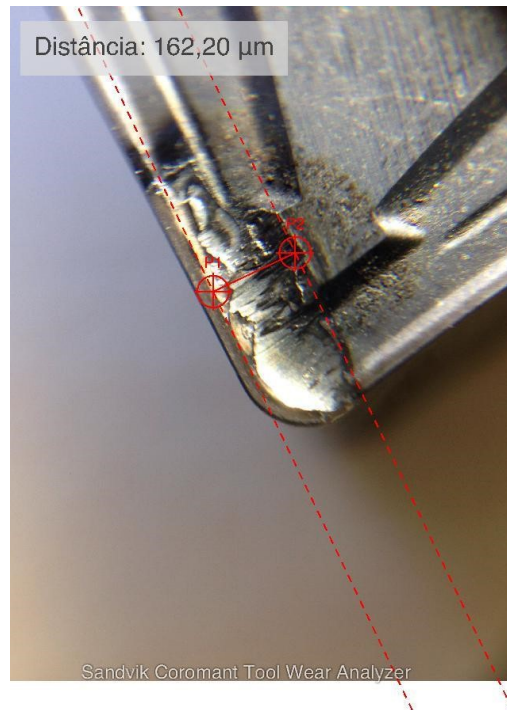


Figura 29 - Desgaste da segunda aresta do inserto CNMG 190612 RP - KCU25.

A figura 29 mostra o desgaste da segunda aresta de corte utilizada do CNMG 190612 RP da classe KCU25 da Kennametal. Esta aresta sofreu desgaste do flanco e desgaste de cratera. Pelo desgaste de flanco seria possível continuar a usinagem com esta aresta. Observe que o desgaste é menor que a cratera de 0,162 mm. Mas por apresentar craterização ela não poderá ser utilizada, pois a cratera reduz consideravelmente a resistência do inserto, podendo ocasionar na quebra da aresta de corte, como na primeira aresta. Vemos que a formação de cratera tem ocorrido com as arestas do inserto, isto reforça o suposto na primeira aresta de que os parâmetros utilizados estejam maiores que os ideais para o inserto usinar aço o AISI 8630M.

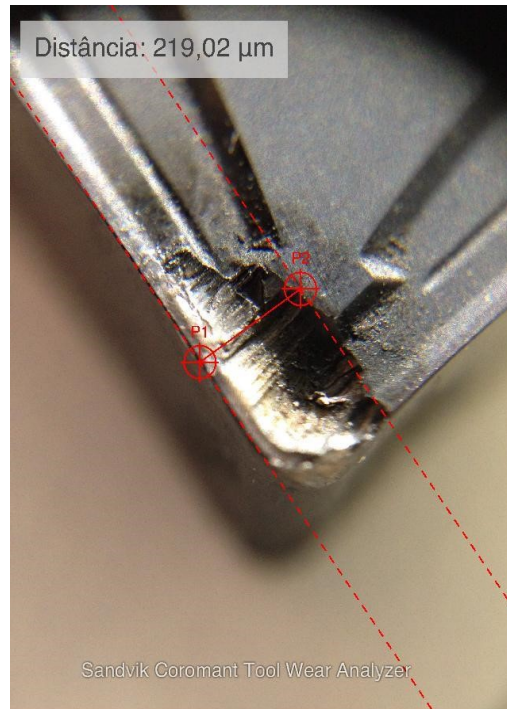


Figura 30 - Desgaste da terceira aresta do inserto CNMG 190612 RP - KCU25.

A figura 30 representa o desgaste da terceira aresta do inserto CNMG 190612 RP da classe KCU25 da Kennametal. Na figura é possível observar que a terceira aresta sofreu um desgaste de e desgaste de cratera de 0,219 mm, aproximadamente.

Com isso a premissa levantada nas duas primeiras arestas se confirma, a combinação da velocidade de corte, profundidade de corte e avanço combinadas foram excessivas para o inserto. Nota-se que para utilizar este inserto na usinagem do aço AISI 8630M necessita de redução de parâmetros. Como o desgaste que mais impactou na usinagem foi o desgaste de cratera, explicado na seção 2.4.2, os parâmetros de avanço e velocidade de corte precisam ser reduzidos.

4.1.2 Análise do CNMG 190612 MP da classe KC5010 (Kennametal)

Nesta seção será analisado o desgaste que ocorreu em cada aresta do inserto CNMG 190612 MP da classe KC da Kennametal. Os parâmetros utilizados neste inserto e suas dimensões podem ser vistos na tabela 12. Será possível notar que, em comparação ao primeiro inserto utilizado, este inserto respondeu bem aos parâmetros utilizados (maiores que o primeiro) e a vida do inserto poderia ser mais explorada, tendo em vista que nenhuma das arestas sofreu desgaste maior que 0,2 mm e o desgaste máximo para um inserto é de 0,3 mm.



Figura 31 - Inseto da Kennametal, modelo CNMG 190612 MP da classe KC5010 após a usinagem.

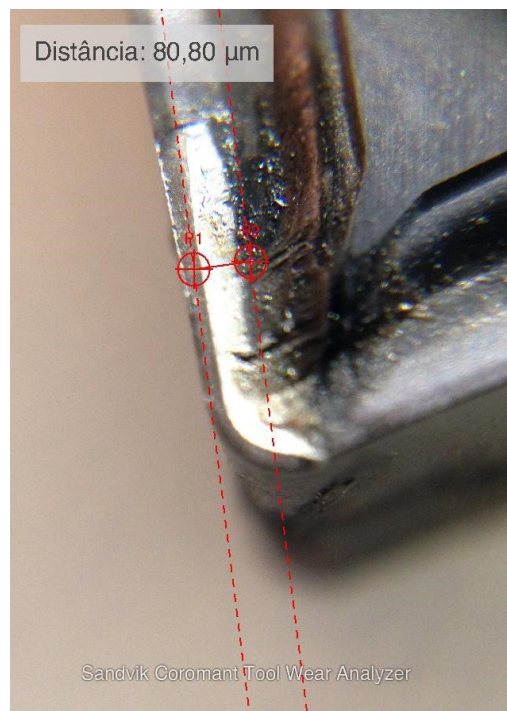


Figura 32 - Desgaste da primeira aresta do inserto CNMG 190612 MP - KC5010.

Na figura 32 é possível observar que a primeira aresta do inserto sofreu um desgaste de flanco no valor de aproximadamente 0,08 mm, muito abaixo do limite recomendado de 0,3 mm. Isto nos mostra que o material do inserto e a cobertura utilizada responderam bem a usinagem

do aço AISI 8630M com os parâmetros adotados. Com isso, pode-se pensar em duas hipóteses, aumentar os parâmetros ou utilizar a aresta por mais tempo. Veremos mais à frente que pela relação R\$/hora-máquina é muito elevado, tornando preferível aumentar os parâmetros para reduzir o tempo da usinagem. Porém, deve-se olhar os desgastes nas outras arestas para ver se a hipótese se confirma.

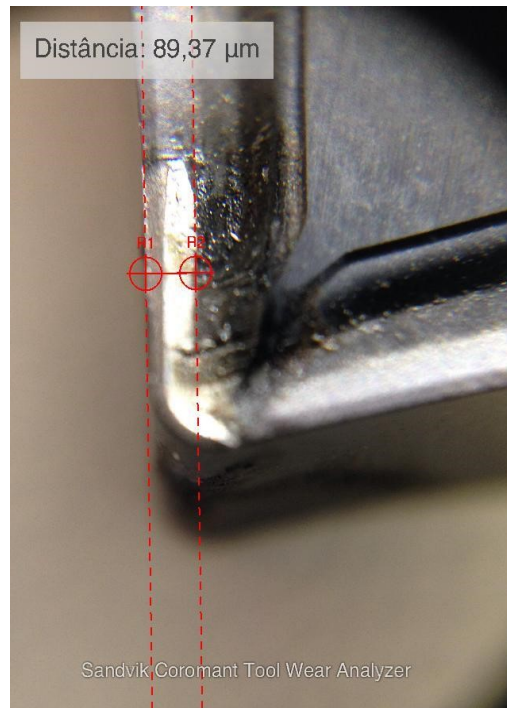


Figura 33 - Desgaste da segunda aresta do inserto CNMG 190612 MP - KC5010.

Na figura 33 observa-se que após a utilização a aresta sofreu um desgaste de flanco de 0,089 mm. Isto mostra, assim como na primeira aresta, que o inserto possui uma boa resistência ao desgaste de flanco na usinagem do material com os parâmetros adotados.

Isto é mais um indicativo de que os parâmetros utilizados na usinagem do AISI 8630M poderiam ser aumentados. Mas verifica-se no desgaste da terceira e da quarta aresta que não se pode aumentar demasiadamente, pois com os mesmo parâmetros, observou-se um desgaste aproximadamente duas vezes maior que na primeira e na segunda aresta.

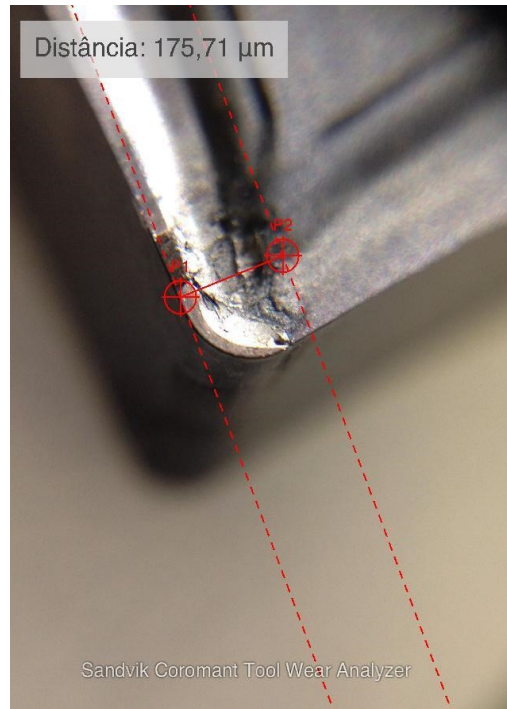


Figura 34 - Desgaste da terceira aresta do inserto CNMG 190612 MP - KC5010.

Na figura 34 vê-se que, assim como nas duas primeiras arestas, a terceira aresta sofreu desgaste de flanco em um valor abaixo do valor de 0,3 mm (desgaste sofrido de 0,175 mm) e poderia ser utilizada por mais tempo ou com parâmetros superiores.

Como a velocidade de corte (V_c) e o avanço são os principais fatores que influenciam na vida da aresta de corte, para se aumentar a produtividade seria recomendado explorar ao máximo a profundidade de corte (A_p). Isso aumentaria significativamente a taxa de remoção de material, sem alterar os principais parâmetros que influenciam na vida da ferramenta.

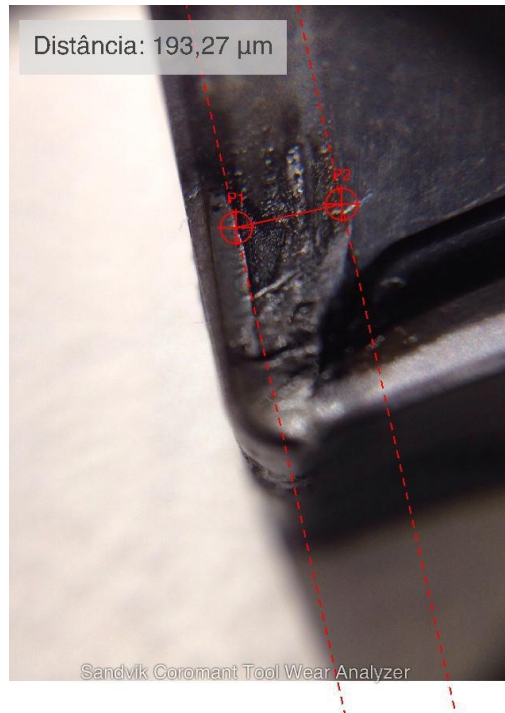


Figura 35 - Desgaste da quarta aresta do inserto CNMG 190612 MP - KC5010.

Na figura 35 percebe-se que a quarta aresta está com um desgaste do flanco de 0,193 mm. Também abaixo de 0,3 mm, como as primeiras três arestas. Assim, reforça mais uma vez a hipótese levantada no desgaste da primeira aresta.

O aumento dos parâmetros deve ser feito como citado no desgaste da terceira aresta, aumentando a profundidade de corte (A_p) e a velocidade de avanço (F) de maneira controlada, visto que a não se deve trabalhar com a ferramenta acima dos parâmetros indicados pelo fabricante.

4.1.3 Análise do WNMG 080412 RP da classe KCU25 (Kennametal)

Nesta seção será abordado o desgaste do inserto WNMG 080412 RP da classe KCU25 produzido pela Kennametal. Este inserto possui geometria W e por se tratar de um inserto negativo (com ângulo de folga igual a zero) possui 6 arestas de corte. Será mostrado adiante que uma aresta de corte sofreu quebra, o que acarretou a não utilização de uma aresta de corte. Assim, no total foram testadas 5 arestas de corte deste inserto.

A figura 38 mostra o inserto após os testes (após a figura 38 será mostrado e comentado os desgastes de cada aresta). Na figura é mostrada a segunda face utilizada do inserto. Note que o raio a direita não sofreu nenhum desgaste por usinagem, mas apresenta uma fratura na ponta.

Isto se deve ao comentado no parágrafo anterior (ocorreu uma fratura na face oposta em tal escala que inutilizou esta ponta).

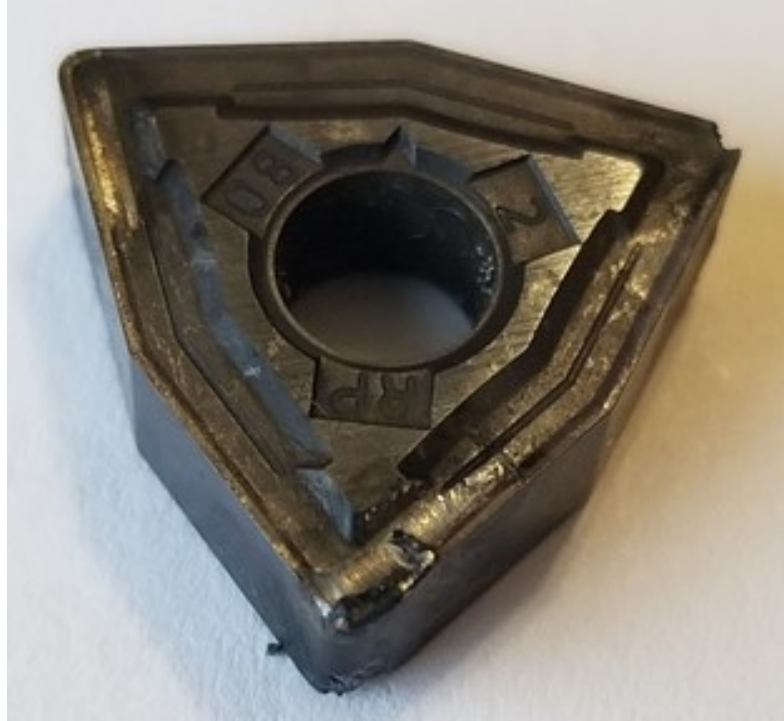


Figura 36 – Inserto Kennametal, modelo WNMG 080412 RP da classe KCU25 após usinagem.

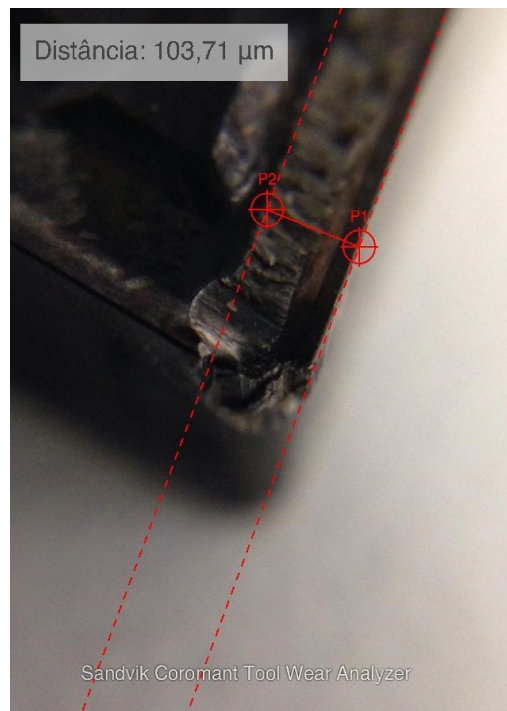


Figura 37 - Desgaste da primeira aresta do inserto WNMG 080412 RP - KCU25.

A figura 37 mostra o desgaste da primeira aresta utilizada no WNMG 080412 da classe KCU25. A figura mostra um desgaste de aproximadamente 0,103 mm. Note que a aresta começa a apresentar a formação de uma cratera próxima ao raio e uma pequena quebra no raio, com isso a aresta de corte foi trocada. Continuar a usinagem com estes desgastes encontrados poderia ocasionar na quebra da aresta do lado oposto, o que ocasionaria a não utilização da aresta.

Perceba que este inserto possui geometria diferente do primeiro inserto testado, mas possui a mesma classe e o mesmo quebra cavaco, apresenta também desgastes semelhantes, mas em escalas menores.

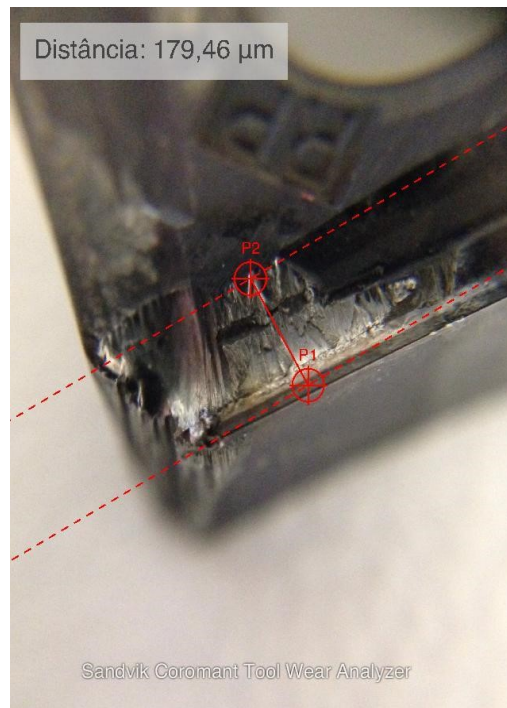


Figura 38 - Desgaste da segunda aresta do inserto WNMG 080412 RP - KCU25.

A figura 38 mostra o desgaste da segunda aresta utilizada do inserto WNMG 080412 RP da classe KCU25. Ela sofreu um desgaste de flanco de aproximadamente 0,179 mm, mas percebe-se que o raio da aresta sofreu desgaste de cratera e quebra. Como comentado no início desta seção, esta quebra foi de gravidade considerável e afetou a utilização da aresta do lado oposto, visto que danificou o raio.

Esses tipos de problemas podem ser evitados com a diminuição de parâmetros. Como dito na seção 2.4.2, o desgaste de cratera ocorre por alta velocidade de corte (V_c) e alto avanço (F). Deve-se avaliar todas as arestas para entender a gravidade da formação da cratera e com isso avaliar se os parâmetros devem ser reduzidos com pouca ou muita intensidade.

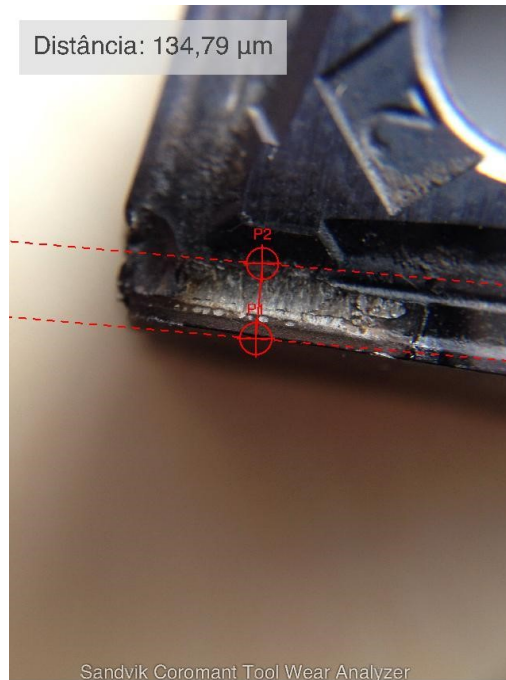


Figura 39 - Desgaste da terceira aresta do inserto WNMG 080412 RP - KCU25.

A figura 39 mostra o desgaste da terceira aresta utilizada do inserto WNMG 080412 RP da classe KCU25. Percebe-se que a terceira aresta sofreu um desgaste de flanco de 0,134 mm (dentro do aceitável conforme ISO 3685 de 0,3 mm), mas também sofreu um cratera no raio de ponta, o que inutilizou a terceira aresta.

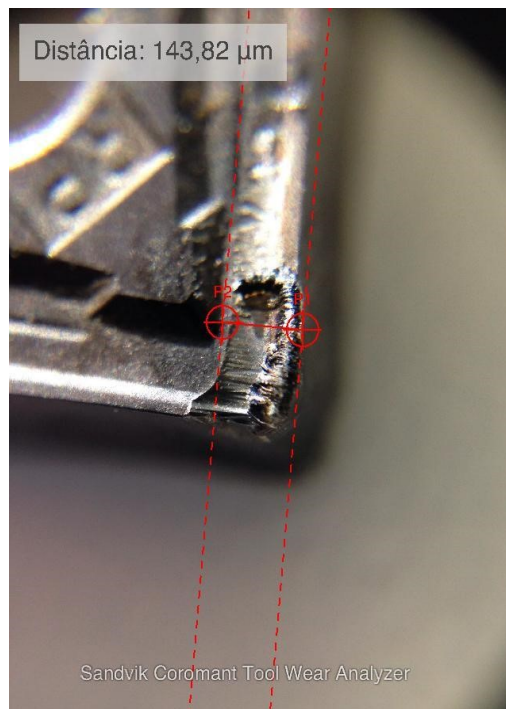


Figura 40 – Desgaste da quarta aresta do inserto WNMG 080412 RP - KCU25.

A figura 40 mostra o desgaste da quarta aresta utilizada do inserto WNMG 080412 RP da classe KCU25. Na quarta aresta foi observado que sofreu um desgaste de flanco de 0,143 mm (dentro do aceitável conforme ISO 3685 de 0,3 mm), porém iniciou a formação de uma cratera que culminou em uma deformação plástica na ponta da aresta.

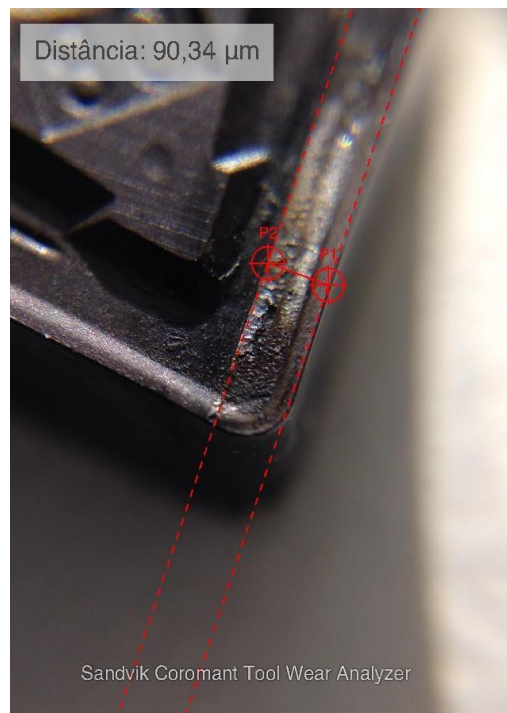


Figura 41 – Desgaste da quinta aresta do inserto WNMG 080412 RP - KCU25.

A figura 41 mostra que a quinta aresta utilizada do inserto WNMG 080412 RP da classe KCU25 sofreu um desgaste de flanco de aproximadamente 0,09 mm. Esta aresta poderia ser mais explorada, porém a usinagem da peça terminou sem que a aresta tivesse sua vida útil totalmente aproveitada.

Conclui-se, observando todas as arestas utilizadas do inserto WNMG 080412 RP da classe KCU25, que os parâmetros foram maiores que os ideais, gerando desgastes de cratera em praticamente todas as arestas. Em uma aresta foi tão severa que gerou uma ruptura que inutilizou a aresta do lado oposto. Este tipo de ruptura diminui consideravelmente a vida do inserto, pois anula a possibilidade de utilização de 2 arestas simultaneamente.

4.2 Análise dos cavacos

Os principais fatores que influenciam na formação do cavaco quanto ao seu formato, são: o material da peça, a velocidade de corte (V_c), o avanço (F), o ângulo de saída da ferramenta (γ) e a profundidade de corte (A_p). Sendo o avanço e o material da peça as variáveis mais influentes e a profundidade de corte a que menos influência na forma final dos cavacos. A seguir foi feita uma análise da geometria final dos cavacos para cada um dos insertos acima citados.

Vale ressaltar que o material de todas as peças utilizadas no presente trabalho é o aço AISI 8630M, com uma dureza abaixo de 22 HRC, então essa variável foi uma constante para este projeto. Os demais parâmetros foram alterados, e como resultado foram observadas geometrias distintas de cavacos para cada tipo de inserto.

4.2.1 Cavaco gerado com o inserto CNMG 190612 RP - KCU25

Durante a operação de torneamento externo de desbaste, com o inserto CNMG 190612 RP da classe KCU25, foi recolhida uma pequena amostra do cavaco formado pelo processo (Figura 42). Nesta etapa, os parâmetros utilizados foram: rotação constante de 62 rpm, velocidade de corte média de 138,9 m/min, avanço de 0,381 milímetros/rotação e profundidade de corte de 5,08 milímetros por passe, conforme 10.



Figura 42 - Geometria final do cavaco gerado no primeiro experimento (Pastilha CNMG 190612 RP da classe KCU25, produzido pela Kennametal).

A forma final do cavaco do primeiro experimento (figura 42), segundo a norma ABNT 3685 [14], foi classificada como uma combinação entre cavaco em arco do tipo conectado e do tipo solto (figura 19). Este formato é aceitável para o processo, tendo em vista que a maior parte dos cavacos formados apresentaram comprimento menor que 25,4 milímetros, o que facilitou o seu manuseio e descarte.

4.2.2 Cavaco gerado com inserto CNMG 190612 MP - KC5010

Durante o segundo experimento, realizado com o inserto CNMG 190612 MP - KC5010, também foi recolhida uma pequena amostra do cavaco (figura 43). Nesta etapa, os parâmetros utilizados foram: rotação constante de 65 rpm, velocidade de corte média de 145,6 m/min, avanço de 0,381 milímetros/rotação e profundidade de corte de 5,08 milímetros por passe, conforme tabela 12.



Figura 43 - Geometria final do cavaco gerado no segundo experimento (pastilha CNMG 190612 RP da classe KC5010, produzido pela Kennametal).

O formato final do cavaco do segundo experimento (figura 43), segundo a norma ABNT 3685 [14], pode ser classificado como cavaco em arco do tipo solto (figura 19). A geometria final do cavaco deste processo apresentou um comprimento inferior a 12,7 milímetros, que foi considerado um formato ideal. Comparou-se a geometria deste cavaco com a geometria do cavaco obtido no primeiro experimento, e foi constatado que o cavaco do segundo experimento apresentou um comprimento menor, o que pode ser justificado pelo aumento do avanço de 0,381 milímetros/rotação para 0,457 milímetros/rotação, que facilitou a ruptura do mesmo.

4.2.3 Cavaco gerado com inserto WNMG 080612 RP - KCU25

Para o terceiro experimento foi utilizado o inserto WNMG 108612 RP - KCU25 como já explicado no capítulo anterior, nesta etapa também foi recolhida uma pequena amostra do cavaco (figura 44) resultante do processo. Nesta etapa, os parâmetros utilizados foram: rotação constante de 60 rpm, velocidade de corte média de 134,4 m/min, avanço de 0,305 milímetros/rotação e profundidade de corte de 5,08 milímetros por passe, conforme tabela 14.



Figura 44 - Geometria final do cavaco gerado no terceiro experimento (pastilha WNMG 080412 RP da classe KCU25, produzido pela Kennametal).

Os formatos dos cavacos do terceiro experimento (figura 44), segundo a norma ABNT 3685 [14], foram classificados como cavacos em fita emaranhados e cavacos em espiral cônica (figura 19) do tipo curto. A geometria final dos cavacos desta etapa apresentou um comprimento de 50,8 a 101,6 milímetros, o que não foi considerado ideal, mas ficou dentro de um quadro aceitável. Comparou-se o cavaco gerado neste processo com os cavacos gerados nos demais processos, e foi constatado que o mesmo apresentou maior volume e comprimento, o que dificultou o manuseio e o descarte. Um fato que pode explicar o aumento no volume e comprimento é que, nesta etapa ocorreu uma redução do avanço para 0,305 milímetros/rotação o que influenciou na geometria final do cavaco.

4.3 Análise de produtividade

Atualmente, com uma competitividade cada vez mais acirrada entre as empresas, a análise de produtividade ganha um grande destaque. Dentro deste contexto, o controle da vida útil da ferramenta é fundamental para obter uma maior eficiência e consequentemente maior lucro para a empresa. A relação entre parâmetros de corte e desgaste da ferramenta ainda gera grandes questionamentos quando é feita uma análise de produtividade.

Para determinar com qual pastilha o processo foi mais produtivo, primeiramente faz-se necessário a obtenção do tempo de corte para cada pastilha. O tempo de corte foi determinado através da equação abaixo segundo Diniz [5]. Foi acrescentado à fórmula o número de passes, visto que cada inserto precisou dar 2 passes para levar a peça a medida final.

$$T_c = \frac{l_f}{F \times n} \times N^\circ \text{ de passes (min)} \quad (4)$$

T_c = Tempo de corte [minutos]

l_f = Percurso de avanço [mm]

F = Avanço [mm/rotação]

n = Rotação [rpm]

$N^\circ \text{ de passes}$ = Número de passes

Tabela 15 - Tempos de corte para cada inserto.

| Tempos de corte | | |
|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| CMMG 190612 RP - KCU25 | CNMG 190612 MP - KC5010 | WNMG 080412 RP - KCU25 |
| n = 62 rpm | n = 65 rpm | n = 60 rpm |
| f = 0,381 mm/rot | f = 0,457 mm/rot | f = 0,305 mm/rot |
| Tc = 190 min | Tc = 151 min | Tc = 245 min |

O custo de produção por peça (K_p), está ligado a diversos fatores como: o custo da mão de obra de usinagem, o custo das ferramentas e o custo da máquina. Segundo Diniz [5], o valor do custo de produção por peça (K_p) pode ser obtido através da soma dos custos de 3 constantes. Sendo C_1 uma constante referente à matéria-prima, independente da velocidade de corte em R\$/peça; C_2 é a soma das despesas com mão de obra e com máquina em R\$/hora e C_3 é a constante de custo relativo à ferramenta. A equação pode ser vista abaixo.

$$Kp = C_1 + \frac{T_c}{60} \times C_2 + \frac{T_c}{T} \times C_3 \text{ (R\$)} \quad (5)$$

Kp = Custo de produção por peça [reais]

C_1 = Constante referente ao valor da matéria-prima, independente da velocidade de corte em R\$/peça;

C_2 = Constante referente a soma das despesas com mão-de-obra e com máquina em R\$/hora

C_3 = Constante referente ao custo relativo à ferramenta.

T = Vida útil da ferramenta [min]

No presente trabalho o objetivo é o cálculo do custo da produção para operação de torneamento externo de desbaste por peça. A constante C_1 não foi considerada, pois o preço referente a matéria-prima é um dado que não pôde ser divulgado. Porém, este valor não interferiu no resultado final desta análise, tendo em vista que, todos os experimentos foram realizados com o mesmo tipo de peça. Logo, caso fosse considerado o valor da matéria-prima, a diferença seria a mesma para todos os experimentos. Já a variável C_2 , foi estipulada com base em valores aproximados, de despesas referentes a mão-de-obra e máquina em R\$/hora, em empresas do setor do óleo e gás.

Segundo Diniz [5], a variável T da equação acima é referente ao tempo de vida da ferramenta, em minutos. Como neste trabalho, para cada operação completa de torneamento externo de desbaste foi necessária uma pastilha (todas as arestas desgastadas). Então, neste cálculo foi considerado que o tempo de vida (T) de cada pastilha foi igual ao tempo de corte (T_c) da mesma.

$$Kp_{\text{CNMG 190612 RP}} = \frac{190}{60} \times 400 + \frac{190}{190} \times 69,21$$

$$Kp_{\text{CNMG 190612 MP}} = \frac{151}{60} \times 400 + \frac{151}{151} \times 65,40$$

$$Kp_{\text{WNMG 080612 RP}} = \frac{245}{60} \times 400 + \frac{245}{245} \times 37,76$$

Na figura 45 é demonstrado o custo de produção para cada ferramenta. A pastilha da CNMG 190612 RP - KCU25 apresentou um desempenho melhor, principalmente devido aos parâmetros atingidos pela mesma, com avanço e rotação superiores às demais pastilhas, além de ter demonstrado um ótimo comportamento em relação ao desgaste, como já citado no tópico 4.1.2.

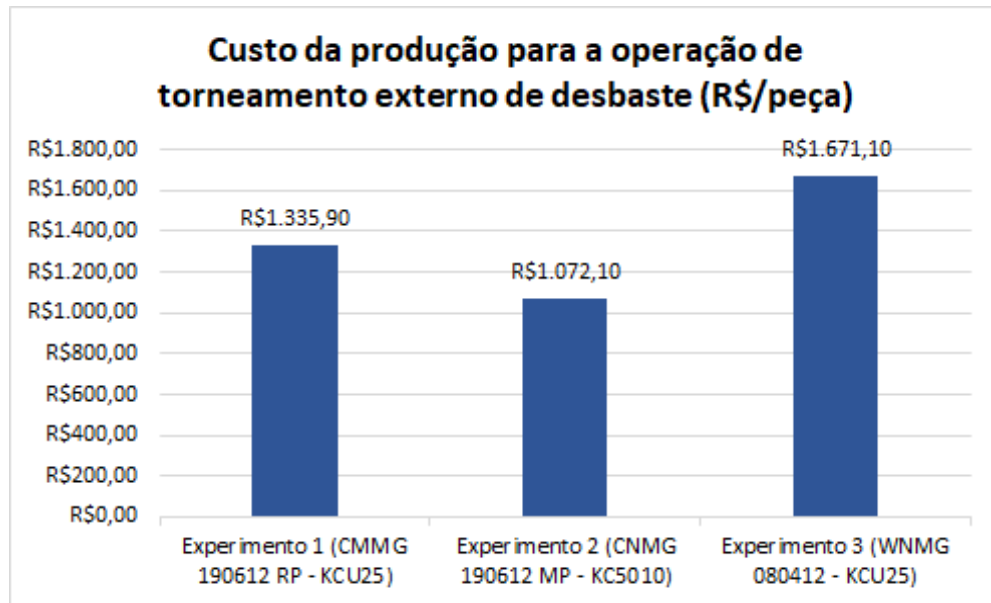


Figura 45 – Gráfico de custo da operação com cada inserto.

A seguir, na figura 46 foi estimado o custo de produção para um lote de 50 peças e feito um comparativo entre a pastilha que é normalmente utilizada nesta operação (CNMG 190612 RP - KCU25) e a pastilha que foi mais produtiva nos testes (CNMG 190612 MP - KC5010). Observa-se que o custo de produção com a pastilha CNMG 190612 MP - KC5010 obteve um resultado de 20% de economia, além de reduzir em 21% o tempo de produção do lote. O valor da economia pode ser visto na figura 46 e a redução no tempo de produção pode ser visto na figura 47.

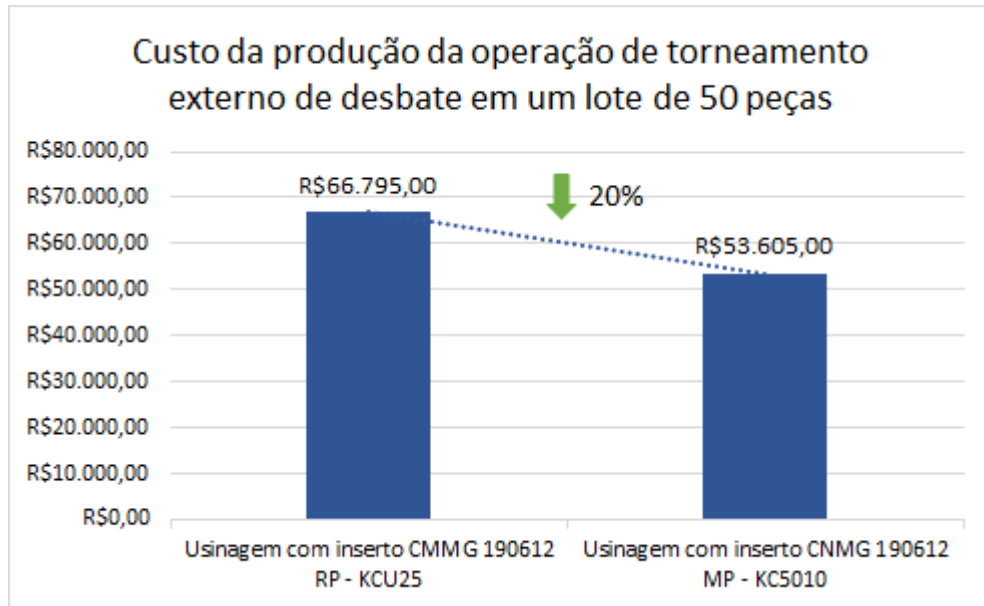


Figura 46 – Redução de custo da operação para 50 peças.

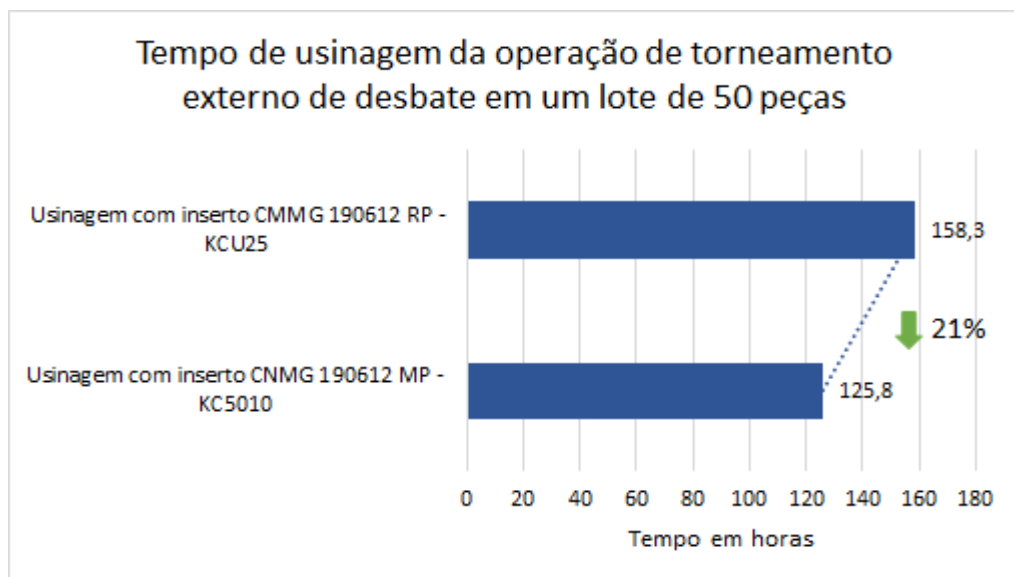


Figura 47 – Redução de tempo de usinagem da operação para 50 peças.

5. Conclusão

Com base nas análises feitas no capítulo anterior, pode-se afirmar que o inserto CNMG 190612 MP da classe KC5010 é o inserto mais produtivo, gerando o menor tempo de corte e, conseqüentemente, o menor custo de produção no torneamento externo de desbaste, economizando R\$263,80 somente nesta operação. Ele também apresentou cavaco com a geometria adequada, o que faz-se necessário para melhor qualidade na usinagem. A geometria obtida possui tamanho menor que 12,7 milímetros, o que reduz consideravelmente o volume de cavaco gerado.

Com os resultados também foi possível observar que para uma produção de 50 peças será possível economizar R\$13.190,00 somente na operação de torneamento de desbaste externo, o que é uma redução significativa. Tornar este inserto padrão para o torneamento externo de desbaste na fábrica no material AISI 8630M ajudará a aumentar a quantia economizada, visto que diversas outras peças com geometrias diferentes são usinadas com este material.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

- Análise de insertos com geometrias diferentes das utilizadas neste trabalho;
- Análise da variação de parâmetros com os insertos utilizados;
- Testes com insertos de outros fabricantes;
- Teste com insertos de outras classes;
- Teste com outras geometrias de quebra-cavaco;
- Teste em um material diferente.

6. Bibliografia

- [1] TN PETRÓLEO. Árvore de Natal Submarina da FMC Technologies recebe certificado de conteúdo local, 2014. Disponível em <<http://tnpetroleo.com.br/noticia/arvore-de-natal-submarina-da-fmc-technologies-brasil-recebe-certificado-de-conteudo-local>>. Acesso em: 26 de out. 2018.
- [2] GRAZA, E. I. S. Mechanical Properties and Microstructure of Large Steel Forgings for Applications in the Energy Sector. Dissertação de doutorado - Department of Materials Science and Engineering, University of Sheffield, 2017.
- [3] FERRARESI, D. 1977, “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, Editora Edgard Blücher Ltda, Vol 1, São Paulo, Brasil, 751 pgs.
- [4] SANDVIK COROMANT. Manual de Treinamento: Tecnologia em Usinagem. C-2920:40 pt-BR. AB Sandvik Coromant: Sandviken, Suécia, 2017.
- [5] DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.. Tecnologia da usinagem dos materiais. MM Editora, 1999.
- [6] SANDVIK COROMANT. Manual Técnico de Usinagem. C-2900:3 POR/01. AB Sandvik Coromant: Sandviken, Suécia, 2005.
- [7] CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedade das Ligas Metálicas Volume I. 2ª Ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [8] SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. Aços e Ligas Especiais. 2ª Ed. São Paulo: Eletrometal S.A Metais Especiais, 1988.
- [9] GAMARRA, J. R. Estratégias de Usinagem no Torneamento de Aço Inoxidável Super Duplex (UNS S32750). 120 f. Dissertação de Mestrado - Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2017.

[10] MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION. Tooling Technology Level 1, versão em português. 1ª Ed. Tamboré: RR Donnelley Moore, 2007

[11] SANDVIK COROMANT. Desgaste da ferramenta. Disponível em < https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear/pages/default.aspx >. Acesso em: 30 de set. 2018.

[12] SANTOS, S. C.; Sales, W. F. Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais. 1ª Ed. São Paulo: Artliber, 2007.

[13] FERRARESI, D. Fundamento da Usinagem dos Metais. 17ª reimpressão. São Paulo: Blucher, 2017.

[14] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas; ABNT NBRISO 3685, Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento, 2017

[15] DRILLING CONTRACTOR. Production kicks off from Perdido, world's deepest offshore drilling and production facility, 2010. Disponível em < <http://www.drillingcontractor.org/production-kicks-off-from-perdido-world%E2%80%99s-deepest-offshore-drilling-and-production-facility-5022> >. Acesso em: 09 de out. 2018.

[16] SHELL. Deep water. Disponível em < <https://www.shell.com/energy-and-innovation/deep-water.html> <http://www.drillingcontractor.org/production-kicks-off-from-perdido-world%E2%80%99s-deepest-offshore-drilling-and-production-facility-5022> >. Acesso em: 18 de out. 2018.

[17] ENERGY ALLOYS. 8630M. Disponível em < <https://www.ealloys.com/pages/8630m> >. Acesso em: 29 de out. 2018.

[18] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 15156-1, Petroleum and natural gas industries - Materials for use in H₂S-containing Environments in oil and gas, 2001.

[19] KENNAMETAL. ISO Carbide inserts. Disponível em < <https://www.kennametal.com/en/products/20478624/47535256/63745063/63745065/63840303/63840318/55735598/100002324.html?orderNumber=4050468> >. Acesso em: 10 de out. 2018.

[20] KENNAMETAL. ISO Carbide inserts. Disponível em < <https://www.kennametal.com/en/products/20478624/47535256/63745063/63745065/63840303/63840318/55831832/100001839.html?orderNumber=4121726> >. Acesso em: 10 de out. 2018.

[21] SANDVIK COROMANT. PCLNR 3232P 19, Ferramenta convencional T-Max P para torneamento. Disponível em < <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/productdetails.aspx?c=pclnl%203232p%2019> >. Acesso em: 11 de out. 2018.

[22] SANDVIK COROMANT. C8-DWLNR-55080-08, Unidade de corte T-Max P para torneamento. Disponível em < <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/Pages/productdetails.aspx?c=C8-DWLNR-55080-08> >. Acesso em: 11 de out. 2018.