

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**MANUFATURA FLEXÍVEL: COMPARATIVO ENTRE O MODELO
OTIMIZADO E O TRADICIONAL**

ADEMIR JOÃO DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: PROF. DR. ELESANDRO A. BAPTISTA

CO- ORIENTADOR: PROF. DR. NIVALDO L. COPPINI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

SÃO PAULO

2011

MANUFATURA FLEXÍVEL: COMPARATIVO ENTRE O MODELO OTIMIZADO E O TRADICIONAL

ADEMIR JOÃO DE OLIVEIRA

Dissertação de Mestrado defendida, em 1 de Março de 2011, pela Banca
Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. Elesandro Antonio Baptista, Presidente
UNINOVE

Prof. Dr. Gilberto Walter Arenas Miranda
UNITAU

Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini
UNINOVE

Dedico este trabalho: À minha esposa Solange, aos meus filhos Aryadne e Vinícius, a todas as pessoas que estiveram presentes nesta jornada comigo e especialmente a Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, professor Elesandro Antonio Baptista por compartilhar seus conhecimentos, ensinamentos e amizade.

Ao professor Nivaldo Lemos Coppini, pelo apoio, respeito e amizade.

Ao professor Milton pelo incentivo e amizade.

A todos os professores que compartilharam experiências com o grupo, nos ajudando a encontrar a direção dos nossos objetivos.

A UNINOVE que proporcionou a realização de um sonho.

A toda equipe de apoio da UNINOVE que nos deu suporte, sempre com cordialidade, simpatia e profissionalismo.

A minha esposa Solange e aos meus filhos Aryadne e Vinícius, pela compreensão, participação e incentivo para a realização deste sonho.

Aos meus pais que apesar de toda a dificuldade, sempre me incentivaram a buscar o conhecimento.

Aos colegas de turma do mestrado que ensinaram a valorizar a convivência em grupo e de amizade ao longo dos dois anos de convivência.

Ao amigo Elias Batista da Silva que participou ativamente na realização dos experimentos.

“O que vale na vida não é o ponto de partida e
sim a caminhada. Caminhando e semeando,
no fim terás o que colher.”

Cora Coralina.

OLIVEIRA, Ademir João. **Manufatura flexível: comparativo entre o modelo proposto e o tradicional**. 2011. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Nove de Julho, São Paulo.

RESUMO

Este trabalho objetiva otimizar o processo de usinagem reduzindo o tempo de setup e adequando o consumo de ferramentas de corte em um cenário de manufatura flexível, adotando um modelo otimizado, que posteriormente é confrontado com o modelo tradicional, para mostrar as vantagens de um sobre o outro. Os ensaios consistiam em realizar operação de torneamento de desbaste em um Torno CNC, utilizando três diferentes aços de baixa liga, SAE 4140, SAE 4340 e SAE 6150, nos quais a velocidade de corte foi mantida constante. O método adotado previa a troca da aresta de corte quando está atingisse o critério estabelecido de fim de vida. Os resultados não se mostraram satisfatórios quanto ao consumo e a quantidade de arestas de corte entre os modelos teórico e prático. Estes resultados desfavoráveis foram atribuídos as influências das condições dos materiais, das operações de usinagem, das variações dos tipos de aços e das geometrias envolvidas. A adoção de uma mesma ferramenta para realizar diferentes operações de usinagem mostrou-se extremamente vantajosa para o cenário de manufatura flexível, quando comparado com o modelo tradicional, obtendo-se redução do número de trocas de ferramentas, redução do tempo de setup e redução do número de ferramentas em estoque.

PALAVRAS-CHAVE: Produção Flexível, *Presettings* de Ferramentas, Vida da Aresta de Corte, Desgaste.

OLIVEIRA, Ademir João. **Flexible manufacturing: comparison between the proposed model and traditional model**. 2011. 70 f. Dissertation – Production Engineering Master's Program, Universidade Nove de Julho, São Paulo.

ABSTRACT

This work aims to optimize the machining process by reducing setup time and adjusting the consumption of cutting tools in a flexible manufacturing scenario, adopting an optimized model, which is then confronted with the traditional model, to show the advantages of one over the another. The tests consisted in making the turning operation of thinning on a CNC lathe, using three different types of low alloy steels, SAE 4140, SAE 4340 and SAE 6150, in which the cutting speed was kept constant. The method adopted provided for the exchange of the cutting edge when it reached the criteria established for end of life. The results were not satisfactory for consumption and the amount of cutting edges between the theoretical and practical models. These unfavorable results were attributed to influences of the conditions of materials, machining operations, of changes in the types of steel and the geometry involved. The adoption of a single tool to perform different machining operations proved to be extremely advantageous for the flexible manufacturing scenario, when compared with the traditional model, resulting in a reduction in the number of tool changes, reduced setup time and reducing number of tools in stock.

KEYWORDS: *Flexible Production, Presettings Tool, Life of Cutting Edge, Wear.*

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – TORNO CNC DMG - MODELO CTX 510.....	30
FIGURA 2 – OPERAÇÕES DE USINAGEM – FACEAMENTO, TORNEAMENTO EXTERNO E DE MERGULHO. .	31
FIGURA 3 – INFORMAÇÕES DO DIMENSIONAL DO PORTA-FERRAMENTA FERRAMENTA.....	31
FIGURA 4 – INFORMAÇÕES DO DIMENSIONAL DO INSERTO.....	32
FIGURA 5 - SEQUENCIAMENTO DAS ETAPAS.....	35
FIGURA 6 – PADRONIZAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE FERRAMENTA E MATERIAL.	39
FIGURA 7 – GEOMETRIA DOS LOTES “AA, AB, AC, AD, AE E AJ”	47
FIGURA 8 – GEOMETRIA DOS LOTES “ AF, AG E AH”	48
FIGURA 9 - GEOMETRIA DOS LOTES “AI”	48
FIGURA 10 - GEOMETRIA DOS LOTES “CM E CO”	50
FIGURA 11 - GEOMETRIA DOS LOTES “CN”.	50

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – DADOS FORNECIDOS PELO CATÁLOGO.....	28
QUADRO 2 – LISTA DE REFERÊNCIAS DE MATERIAIS.....	32
QUADRO 3 – DUREZAS BRINELL.	33
QUADRO 4 – DESEMPENHO DO AÇO 4140 – QUEBRA E DESGASTE DA ARESTA DE CORTE.....	443
QUADRO 5 – COMPARATIVO ENTRE OS MATERIAIS – QUEBRAS X DESGASTES.....	44
QUADRO 6 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS	44
QUADRO 7 – MÉDIA DA VIDA DAS ARESTAS DE CORTE OBTIDAS NOS ENSAIOS.....	51
QUADRO 8 – COMPARATIVO DO NÚMERO DE TROCA DAS FERRAMENTAS DE CADA MODELO.	52
QUADRO 9 – COMPARATIVO DOS TEMPOS DE TROCA DAS FERRAMENTAS DE CADA MODELO.....	52
QUADRO 10 – COMPARATIVO DA QUANTIDADE DE TROCA REALIZADA ENTRE OS MODELOS.....	53

LISTA DE EQUAÇÕES

(1) PREVISÃO DA QUANTIDADE DE PEÇAS USINADAS DE CADA LOTE..... 28

(2) PERCENTUAL DA VIDA DA ARESTA DE CORTE CONSUMIDO A CADA LOTE DE PEÇA USINADO. 25

(3) SOMATÓRIA DAS VIDAS CONSUMIDAS DAS ARESTAS DE CORTE ATÉ OCORRER O MOMENTO DA TROCA DA ARESTA..... 25

(4) CÁLCULO DA VELOCIDADE DE CORTE 440

(5) CÁLCULO DO FATOR DE CORREÇÃO “Y” 40

(6) RECÁLCULO VIDA DA ARESTA DE CORTE “T” 40

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS.....	36
TABELA 2 - FATOR DE CORREÇÃO DA VIDA DA ARESTA DE CORTE.	40
TABELA 3 – RESUMO DOS ENSAIOS DAS ARESTAS COM QUEBRAS.....	42
TABELA 4 – DADOS OBTIDOS DAS ARESTAS COM QUEBRA.....	42
TABELA 5 - RESUMO DAS ARESTAS COM DESGASTE.	45
TABELA 6 – ARESTA DE CORTE COM VIDA SUPERIOR A ESTIMADA PELO CATÁLOGO E VIDA COM DESGASTE PREMATURO.	46
TABELA 7 - VIDA SUPERIOR À PREVISTA PELO CATÁLOGO.....	47
TABELA 8 – DESGASTE PREMATURO DA ARESTA DE CORTE	49
TABELA 9 – DADOS OBTIDOS DAS ARESTAS COM DESGASTE.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	- Activity Based Costing.
Al	- Alumínio.
ap	- Profundidade de usinagem [mm].
ANOVA	- Analyse of Variance.
C	- Carbono
CBN	- Nitreto cúbico de boro.
CMC	- Coromant Material Classification.
CNC	- Computer Numeric Control.
Co	- Cobalto.
Cr	- Cromo.
d	- Diâmetro do material [mm].
DMG	- Deckel Maho Gildemeister – Fabricante de Máquinas para Usinagem.
f	- Avanço por volta [mm/volta].
HB	- Dureza na escala Brinell.
HSM	- High Speed Machine.
ISO	- International Organization for Standardization.
JIT	- Just In Time.
m/ min	- Metros por minute.
mm/ r	- Milímetro por volta.
Min	- Minuto.
Mn	- Manganês.
Mo	- Molibdênio.
MOS	- Machining Optimizer System.
n	- Rotação da peça ou da ferramenta.
Ni	- Níquel.
Nt	- Quantidade de arestas de corte consumida nos ensaios
N't	- Consumo de arestas de corte prevista pelo catálogo.
OP	- Ordem de Produção.
P	- Fósforo.
Pb	- Chumbo.
PCBN	- Nitreto cúbico de boro policristalino.
PTa	- Soma do percentual consumido da vida de cada aresta de corte utilizada.
PT'a	- Soma do percentual consumido da vida de cada aresta de corte utilizada, visando a previsão do catálogo.
PTal	- Percentual consumido da vida da aresta de corte na usinagem de cada lote.
PT'al	- Percentual consumido da vida da aresta de corte na usinagem de cada lote.
Ra	- Rugosidade
rpm	- Rotações por minuto.

S	- Enxofre.
SAE	- Society of Automotive Engineers – EUA.
Si	- Silício.
TG	- Tecnologia de grupo.
V	- Vanádio.
Vc	- Velocidade de corte.
V&V	- Verificação e Validação.
Scat	- Velocidade de corte.
Ti	- Tempo de vida da aresta de corte previsto pelo catálogo.
tci	- Tempo por peça usinada de cada lote.
tst	- Tempo de setup.
tclot	- Tempo de usinagem total de cada lote.
Zlot	- Quantidade de peças de cada lote usinadas com a mesma aresta.

SUMÁRIO

RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE QUADROS.....	IX
LISTA DE EQUAÇÕES.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. JUSTIFICATIVA	2
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1.OBJETIVO GERAL.....	3
1.2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1. SISTEMA DE MANUFATURA FLEXÍVEL	5
2.1.1.PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO	7
2.1.2.PROCESSO DE USINAGEM	11
2.1.3.OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO	14
2.1.4.TRAJETÓRIA DE USINAGEM.....	15
2.1.5.PARÂMETROS DE CORTE.....	17
2.1.6.VELOCIDADE DE CORTE	18
2.1.7.VIDA DA ÂRESTA DE CORTE	20
2.1.8.BASE TEÓRICA	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1. MATERIAIS	29
3.2. MÉTODOS	30
3.2.1.SEQUENCIAMENTO DO MÉTODO	34
3.2.2. DIRETIVAS	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5. CONCLUSÕES	59
5.1. - SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS	61
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1. INTRODUÇÃO

Com a necessidade constante de otimizar o processo e diminuir os tempos de produção, as empresas fabricantes de ferramentas de corte frequentemente oferecem ao mercado novas alternativas de otimização, sendo oferecidos produtos com maior versatilidade, capazes de realizar maior número de operações, com maior resistência ao desgaste, e novas geometrias, que visam maior rendimento, aumentando assim, a produtividade e redução de custos produtivos.

A otimização dos processos de usinagem propriamente dita não consiste unicamente na operação de usinagem. Os processos de usinagem podem ser otimizados sob dois diferentes focos segundo Baptista (2004): a redução dos tempos não produtivos, como tempo de fila, movimentação e outros tempos passivos que envolvam tarefas humanas ou a redução dos tempos produtivos, quando se analisa a própria operação de usinagem. A redução dos tempos passivos pode ser obtida, principalmente, com a implantação de ferramentas gerenciais e/ou técnicas.

A redução dos tempos produtivos pode ser obtida com a implementação de novas máquinas-ferramentas, ferramentas, dispositivos, com a redução do sobremetal, pela substituição do material por outro de melhor usinabilidade, por meio da estratégia de usinagem que define o melhor caminho a ser percorrido pela ferramenta de corte, ou ainda, com a otimização dos parâmetros de corte.


Muitas das empresas fabricantes de ferramentas montam parcerias com seus clientes, em que a área técnica desenvolve o processo diretamente na planta do cliente com apoio do planejamento do processo, onde o técnico utiliza o seu conhecimento em aplicação das ferramentas de usinagem, o planejamento utiliza o seu conhecimento do produto e do cenário produtivo onde será produzido o item, formando assim uma parceria com o objetivo de encontrar o melhor processo para um determinado produto ou cenário específico, adaptando as restrições do ambiente produtivo em questão, mantendo o foco nos resultados pretendidos sem prejudicar os indicadores determinados.

Os ensaios realizados ocorreram nesta linha de raciocínio, isto é, a partir de um cenário estabelecido de manufatura flexível, foram desenvolvidos todos os ensaios. Foram determinadas as condições de usinagem com base no catálogo do fabricante de ferramentas, adaptado as restrições do ambiente vivenciado.

A otimização ocorreu por meio da escolha do inserto, do porta-ferramenta ferramenta e dos parâmetros de corte de acordo com as restrições do cenário, dos diferentes materiais e geometrias usinadas, buscando-se melhorar os tempos passivos e reduzindo o número de ferramentas adotadas no ciclo de usinagem.

O principal parâmetro de corte definido foi a velocidade de corte (v_c), que merece especial atenção na otimização de um sistema produtivo, por possuir restrições e/ ou características que podem influenciar na escolha.

Para a definição da velocidade de corte foram observadas às restrições do cenário produtivo. O propósito da análise foi de reduzir as condições adversas no processo produtivo, tendo em vista as inúmeras variáveis existentes no ambiente, entre elas destacam-se: a variação dos aços; a variação do dimensional entre os materiais; e a variação da geometria a ser usinada.

Por meio do catálogo do fabricante foi determinada a ferramenta e inserto adequado aos materiais que seriam usinados. Segundo Isik (2007) é preciso encontrar o equilíbrio entre as variáveis para se obter os parâmetros de corte ideais ao ambiente produtivo, dentre eles podem ser citados, a velocidade de corte (v_c) e de avanço , combinado com o critério de fim de vida da ferramenta de corte.

1.1. JUSTIFICATIVA

A crescente necessidade das empresas de reduzirem os seus custos de processo é cada vez maior, sendo ainda mais desafiador num cenário de manufatura flexível. O cenário vivenciado possui uma série de variáveis que podem interferir diretamente no processo, entre elas se destacam: diferentes tipos de aços; variação dimensional dos materiais; diferentes geometrias de peças a serem usinadas; lotes com quantidades reduzidas, que gera grande

quantidade de setups ao longo da jornada de trabalho; diferentes operações de usinagem etc.

O desafio é de encontrar um modelo capaz de conciliar todas estas variáveis, otimizando o processo tanto em termos de redução de tempos de setup, quanto na redução do consumo das arestas de corte.

1.2. OBJETIVOS

Para um melhor detalhamento os objetivos foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho objetiva otimizar o processo de usinagem reduzindo o tempo de setup e o adequando o consumo de arestas de corte.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- realizar ensaios de torneamento de desbaste em chão de fábrica, utilizando o mesmo tipo de ferramenta na usinagem de diferentes materiais e geometrias;
- aplicar os parâmetros de corte selecionados do catálogo do fabricante de ferramentas em ensaios práticos realizados em chão de fábrica;
- comparar os resultados obtidos nos ensaios práticos com a previsão de consumo do catálogo;
- mostrar as vantagens/desvantagens e viabilidade do uso de uma mesma aresta de corte que realiza diferentes operações de usinagem, quando comparado ao uso de uma aresta de corte que realiza operações de usinagens específicas.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em capítulos, sendo:

- Capítulo 1 – Introdução, objetivos e estrutura do trabalho;
- Capítulo 2 – Revisão da Literatura;
- Capítulo 3 – Materiais e Métodos;
- Capítulo 4 – Resultados e Discussão;
- Capítulo 5 – Conclusões.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O sistema de manufatura flexível é composto por algumas etapas, inicia-se com o relato de quando e como surgiu o sistema no ambiente da indústria e posteriormente são abordadas quais as etapas que constituem o planejamento da produção.

O planejamento programa a produção e busca estabelecer o processo de usinagem ideal, fazendo uso de algumas ferramentas capazes de obter maior velocidade e capacidade de produção. A determinação dos parâmetros de corte ideais proporciona maior agilidade ao processo produtivo.

O planejamento da produção, programa a produção estabelecendo o processo de usinagem otimizado por meio da escolha dos parâmetros de corte (v_c , a_p , f) e do critério de fim de vida da aresta de corte da ferramenta. Concilia estes dados às variáveis do processo produtivo de uma manufatura flexível, mantendo o foco na obtenção de bons níveis de produtividade e redução de custos utilizando a base teórica fornecida pelo catálogo do fabricante de ferramentas como método, o qual é adotado na prática por muitas empresas e também pelo meio acadêmico.

2.1. SISTEMA DE MANUFATURA FLEXÍVEL

A tecnologia que aborda o sistema de manufatura flexível teve início no fim da década de 1960, segundo Jain *et al.* (2008). A complexidade deste tema influenciou alguns segmentos, como a Gestão de Ciência, a Pesquisa Operacional e a Ciência da Engenharia, com o surgimento de novos problemas relativos à concepção, planejamento e controle das atividades de um sistema, que estava acostumado a produzir em grande escala.

Um sistema de manufatura flexível pode ser definido como uma produção diferenciada, por possuir pequenos lotes de peças, em muitos casos com quantidades tendendo a uma unidade, onde varia a geometria, o dimensional e

o material de um lote para outro em uma mesma produção (GUILHERME *et al.*, 2008).

A aquisição de uma ferramenta diferenciada e específica visa aumentar a produtividade e reduzir os custos, para atender a uma necessidade diferenciada no seu sistema produtivo.

Em um sistema de manufatura flexível é importante a adoção de uma filosofia de trabalho, Coppini, Malaquias e Marcondes (1998) apontavam a vantagem da utilização da filosofia do *Just In Time* (JIT) e a Tecnologia de Grupo (TG), visando obter uma significativa redução de custos, utilizando o sistema de custeio ABC (*Activity Based Costing*) por atividade, que envolve também, o uso de um menor número de ferramentas e a realização de um menor número de trocas de ferramentas.

A Toyota pode ser citada como um exemplo de empresa pioneira que instituiu o JIT em produção de manufatura flexível, na busca da redução dos custos operacionais e aplicação das práticas da “Manufatura Enxuta” (COPPINI e BAPTISTA, 1998).

As relações entre os princípios do sistema da manufatura flexível com os princípios na manufatura enxuta convergem para o mesmo sentido, isto é, requer a otimização dos processos, voltados a reduzir ao máximo o tempo de operação com o menor fluxo de produção, objetivando obter a máxima disponibilidade dos equipamentos e reter o mínimo possível do inventário em circulação na produção, para manter sempre o melhor nível de qualidade, propiciando assim, um ambiente de alta flexibilidade (FAVARO e COPPINI, 2006).

Um conceito muito empregado no sistema de manufatura flexível é o uso da ferramenta padrão, Coppini e Baptista (1998) classificam ferramenta padrão como sendo uma mesma ferramenta que é capaz de realizar diferentes operações de usinagem em diferentes produtos, fidelizando o uso do mesmo código do inserto definido por meio do catálogo do fabricantes de ferramentas.

Outro estudo realizado por Baptista, Oliveira e Coppini (2010) abordou a aplicação da ferramenta padrão, que visava reduzir o tempo de montagem de ferramentas e a quantidade de preparações, a que chamaram de tempo de *presetting*.

A redução do número de trocas de ferramentas otimiza a preparação da máquina-ferramenta, principalmente se a programação da produção for realizada prevendo a usinagem de diferentes lotes com a mesma ferramenta, reduzindo a necessidades de novos *presettings* devido à padronização, reduzindo os tempos passivos, conseqüentemente reduzindo os custos com ferramentas e do custo final do produto.

Este método pode proporcionar um alto grau de flexibilidade na máquina ou em uma célula, auxiliando na otimização da preparação da máquina em que as ferramentas serão praticamente as mesmas, havendo a necessidade, portanto, somente de trocar a aresta, ou o inserto que estiver apresentando desgaste ou quebra, além de facilitar o gerenciamento, reduz a quantidade e variedade das ferramentas em estoque.

2.1.1. PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

Existem alguns pontos desfavoráveis no sistema de manufatura flexível. Para se estabelecer uma programação e planejamento de um sistema de manufatura flexível, é preciso que o planejador tenha total domínio do ambiente fabril, principalmente no que diz respeito aos produtos a serem processados e o ambiente que envolve as máquinas, equipamentos e sistemas disponíveis que dão suporte e auxiliam o planejamento e produção.

O profissional deve prever os custos dos produtos, Salak *et al.* (2006) abordam a dificuldade em planejar a produção e de calcular os custos dos produtos de pequeno porte, isto é, casos em que peças possuem pequenas dimensões e os lotes tendem a uma unidade. Nestes casos o tempo de preparação de máquina que não agregam valor ao produto se torna superior ao tempo da operação de usinagem, em que o valor agregado ao produto será pequeno, a dificuldade maior está em conseguir tornar o valor do produto viável ao mercado.

O caso relatado diz respeito à produção de um item, a dificuldade se torna ainda maior quando a empresa lida a todo o momento com manufatura flexível. Neste caso a produção realiza inúmeros *setups* ao longo de uma mesma jornada de trabalho.

Em investigação realizada por Salak *et al.* (2006) uma possível solução capaz de reduzir o tempo de preparação de ferramentas seria a adoção de uma ferramenta padrão, em que a mesma ferramenta pode realizar diferentes operações, otimizando o tempo de preparação e troca da ferramenta. A aplicação deste conceito deve ser adotada de forma criteriosa, onde devem ser analisadas as vantagens ou não dos custos financeiros e do tempo de produção.

Em um sistema de manufatura flexível é imprescindível a participação das áreas de suporte à produção, por ser comum o surgimento de questões previsíveis e imprevisíveis no chão de fábrica durante o processo produtivo, necessitando do dinamismo da programação e do planejamento da produção, para alterar a estratégia visando melhoria de processo.

No mercado existem alguns sistemas que auxiliam o planejador a gerenciar as diversas etapas que constituem a cadeia produtiva. Prakash *et al.* (2008) relatam a dificuldade de realizar o sequenciamento manual, por ser uma atividade que demanda bastante tempo do responsável. Os sistemas visam auxiliar o gerenciamento dos produtos em circulação na produção.

Numa produção de grande escala, existem muitos produtos em circulação devido à quantidade de peças por lote, enquanto que em um sistema de manufatura flexível ocorre o inverso, isto é, existe uma grande quantidade de lotes, onde cada lote possui uma pequena quantidade de peças, podendo conter uma peça por lote.

O planejador tem que elaborar um processo específico para cada produto, tornando-se assim, muito mais difícil planejar e programar a produção. Palomino (2004) menciona a dificuldade de administrar uma produção num cenário de produção flexível, em que se utiliza um conjunto de máquinas para

produzir diversos tipos de produtos, além de gerar uma grande diversidade de roteiros para a fabricação de cada produto.

Na visão de Sterna (2007) existem dois métodos possíveis para administrar um sistema de manufatura flexível. O primeiro, fixa a ordem das tarefas e o segundo introduz uma flexibilidade adicional, podendo a tarefa ser realizada de forma arbitrária.

Na tentativa de conciliar a fixação das tarefas e manter boa flexibilidade em um sistema de manufatura flexível, Das, Baki e Li (2009) abordou outros desafios para realizar o planejamento da produção, em que é preciso agrupar em um mesmo processo produtivo, um carregamento de máquina prevendo uma maior otimização.

A otimização deve prever o melhor momento em que o lote deve ser introduzido na produção, principalmente em um cenário de manufatura flexível, Em simulação realizada por Kumar e Sridharan (2007), foram considerados o tempo médio de fluxo, o tempo de espera na fila e o percentual de itens não entregues no prazo determinado. Os fatores citados interferem diretamente nos ciclos produtivo e não produtivos.

A simulação de um sistema que auxilia o planejamento da produção prevê uma série de tarefas que permitem melhorar o tempo produtivo e redução dos tempos improdutivos, contribuindo para que o produto fique o menor tempo possível em uma fila de espera tornando o *setup* de máquina mais eficiente.

A eficiência pode ser obtida segundo Baptista, Oliveira e Coppini (2010) quando a programação da produção agrupa os produtos e processos por similaridade, no momento de elaborar o seqüenciamento da fila de máquina, podendo ocorrer o aproveitamento parcial ou total da fixação do material anterior, das ferramentas já montadas, do programa CNC, e etc.

Na visão de Konak, Kulturel-Konak e Azizoglu (2008), um sistema de manufatura flexível deve possuir máquinas CNC que acomode o maior número de ferramentas de usinagem possíveis, e que o tempo de preparação de ferramenta esteja próximo a zero, despendendo tempo de preparação de

ferramentas somente para os casos em que houver necessidade de substituição ocasionada por desgaste ou para o *setup* do lote seguinte.

Além das máquinas capazes de realizar as operações previstas, o planejamento da produção deve ser estruturado de forma que defina a peça a ser usinada e seu processo de fabricação, o melhor grupo de máquinas, o fluxo de produção, os recursos a serem alocados, o carregamento e programação das máquinas (DAS, BAKI e LI, 2009).

Enquanto que Prakash *et al.* (2008), afirmam que a grande dificuldade está em realizar o carregamento da produção, sem que comprometa a flexibilidade nem tão pouco a eficiência produtiva.

O planejamento da produção no cenário em que envolve a programação da produção de manufatura flexível tem atraído inúmeros autores como: (COUGHLAN e COUGHLAN, 2002; DAS, BAKI e LI, 2009; KUMAR e SRIDHARAN, 2007; MAHDAVI, SHIRAZI e SOLIMANPUR, 2010; PALOMINO, 2004; PRIORE *et al.*, 2009), em função da sua potencialidade caracterizada por: flexibilidade, qualidade e alta produtividade que são vitais para credibilidade e respostas rápidas às necessidades do mercado.

As necessidades do mercado e as demandas mudam constantemente, então, a agilidade e a velocidade na tomada de decisões são muitas vezes as responsáveis pela sobrevivência ou não de uma empresa.

As especificações das necessidades são obtidas a partir da definição de alguns critérios na elaboração de um processo ou planejamento da produção. A importância deste tema motivou Mahdavi, Shirazi e Solimanpur, (2010) a desenvolverem um simulador para controle da produção.

Por meio de critérios específicos, o sistema rapidamente consegue identificar os problemas e as prováveis possibilidades de solução, a velocidade na tomada de decisão, reduz a ociosidade da produção e aumenta a utilização dos equipamentos da produção, aumentando a produtividade.

Priore *et al.* (2009) constataram a evolução do processo em diversos âmbitos, tanto na atualização dos dados contidos no sistema, quanto na capacitação da

equipe, por meio das ocorrências detectadas e vivenciadas, promovendo um maior dinamismo, melhorando de forma gradativa a produtividade e os conhecimentos da equipe participante do processo.

Em um sistema de manufatura flexível existe uma grande variação de produtos que se diferem entre si, esta variação pode interferir no tipo de fixação da peça na máquina, nas ferramentas de corte, no tipo de material a ser usinado, na geometria e no fluxo dos materiais, podendo variar ainda nas operações e nas máquinas por onde os materiais irão passar.

Nos processos em que há uma grande variação de máquinas-ferramenta nos fluxos por onde o produto irá passar, a previsão dos tempos das operações de usinagem de cada etapa se torna uma tarefa extremamente difícil, tendo em vista que esta atividade está diretamente ligada à definição de custo do produto. Para tanto Jawahir e Wang *et al.* (2007), desenvolveram uma proposta para uso de um modelo híbrido de avaliação preditiva, visando medir o desempenho da usinagem dos produtos, contribuindo assim, com a determinação dos tempos em cada ciclo de produção.

2.1.2. PROCESSO DE USINAGEM

O processo de usinagem é específico para cada empresa e para cada produto. Na elaboração de um processo de usinagem devem ser consideradas as variáveis que a compõem, observando as etapas que integram o processo.

O plano de trabalho é um método muito utilizado pelas empresas, onde o processista formula os planos de trabalho e cada etapa complementa a seguinte. O plano de trabalho objetiva detalhar cada etapa do processo, de forma clara e precisa, de forma que fique claro ao operador as etapas que devem ser executadas.

Na criação do plano de trabalho, Hamani, Dangoumau e Craye (2009) defendem o uso do conceito básico de Verificação e Validação (V&V) dos processos de usinagem. O objetivo foi eliminar os possíveis erros na elaboração do plano de trabalho, onde a etapa de verificação aprovaria a

estrutura do modelo e a etapa de validação analisaria se o modelo final correspondia a expectativa elaborada inicialmente.

Rodrigues e Souza (2010) utilizaram outras ferramentas para verificar e avaliar o processo. Empregaram alguns conceitos de confiabilidade, tais como diagrama de bloco e função de distribuição da probabilidade. Desenvolveram este método para descrever as prováveis falhas no decorrer do processo produtivo pertinente as máquinas e ferramentas que serão utilizadas.

Os processos produtivos são compostos por duas etapas. A primeira etapa consiste em preparar os recursos que antecedem a operação de usinagem, em que o planejamento ou o processista desenvolvem o processo de usinagem focado nas necessidades da produção.

De acordo com Yih-fong (2006) as principais características que devem ser consideradas para a elaboração de um processo de usinagem são: a escolha da ferramenta associado ao tipo de material; a estratégia de usinagem; a definição dos dados de corte; o uso ou não da refrigeração e; a definição da máquina que irá realizar a usinagem.

A segunda etapa consiste basicamente de realizar a operação de usinagem propriamente dita, aplicando todos os recursos previstos na primeira etapa, de preparar a máquina, material a ser usinado e de programação CNC.

A combinação entre o material a ser usinado e a trajetória de usinagem, devem ser o ponto de partida para a definição da ferramenta ideal, estas informações segundo Hua, Umbrello, Shivpuri (2006), permitem definir a aresta de corte e o perfil do inserto, aliados a profundidade de corte para a obtenção de um bom desempenho de usinagem e um formato de cavaco ideal.

Observando o desempenho e a escolha da ferramenta de corte, Wang *et al.* (2007), desenvolveram uma metodologia capaz de determinar a melhor condição para a operação de torneamento, conciliando o número de passes, a escolha dos parâmetros de corte.

Coppini e Baptista (1998) apontam a otimização dos parâmetros de corte como sendo o caminho para a obtenção da operação de usinagem ideal, que

consiste na escolha e utilização da ferramenta, com os dados de cortes atrelados ainda a capacidade da máquina.

Ferraresi (1995) já definia a operação de usinagem como sendo um processo de conformação da peça dentro das especificações conferidas a ela por meio da remoção de material sobressalente na forma de cavaco.

O desafio está nas varias etapas e possibilidades apontadas por Wang *et al.* (2007), para remover o material sobressalente, como: em definir o processo de usinagem ideal; em encontrar a melhor condição de usinagem atrelada a estratégia, seja removendo em um único passe ou em várias passadas.

Os processos de usinagem, de uma forma geral, possuem diferentes formas de serem realizados, Coppini e Malaquias (1998) vêem como uma oportunidade de melhoria voltada ao desempenho e redução dos custos, quer por meio da exploração de novas possibilidades de processo, ou por meio de evoluções tecnológicas. As empresas sempre estarão em busca de adotar novos métodos com a finalidade de incrementar cada vez mais a produção, estruturando e tratando os problemas, visando a redução do número de ocorrências de paradas de máquinas e de falhas na produção.

Outro aspecto que deve ser considerado em processo de produção é com relação aos cuidados em que as empresas devem ter ao justificarem a implementação de um novo processo, em que comparam os resultados obtidos do processo anterior com o atual.

Baptista e Coppini (2001) apontam como sendo um erro grave e irreal quando são comparados os resultados de dois processos que utilizam ferramentas com diferentes tecnologias. Antes de tudo deve-se adequar as condições de usinagem atuais com as restrições técnicas da máquina-ferramenta e posteriormente analisar o sistema produtivo, para assim definir os resultados.

Cada empresa adota seu método de trabalho, seja utilizando os recursos elaborados internamente ou adquirindo um sistema existente no mercado, que pode ser adaptado a realidade da empresa. Dentre os sistemas existentes, Zheng *et al.* (2008) desenvolveram um sistema via web, que possibilita ao

usuário a escolha das variáveis existentes no sistema produtivo, tais como: avaliar o desempenho do processo; força de corte; vibração da usinagem; potência da máquina.

O sistema possibilita a obtenção de uma melhora na qualidade do produto, o aumento do tempo de vida da ferramenta e a redução do custo da operação.

O banco de dados destes sistemas é alimentado na sua maioria com dados extraídos do catálogo do fabricante de ferramentas. Baptista e Coppini (2007) indicam que para se chegar o mais próximo da condição ótima, deve-se utilizar os recursos existentes no ambiente, deve-se adotar o catálogo do fabricante de ferramenta, para selecionar a ferramenta ideal, utilizar a experiência das pessoas envolvidas e ainda, considerar os aspectos que dependem fundamentalmente do cenário de fabricação envolvido.

2.1.3. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

A necessidade de redução nos tempos de fabricação de peças impulsiona a procura por novas maneiras de se obter resultados otimizados. Esta busca ocorre em todos os meios, tanto na usinagem de peças em larga escala, como na manufatura flexível, com um número reduzido de peças por lote.

A sequência de usinagem e os parâmetros de corte, são pontos para os quais a atenção está mais voltada por interferirem diretamente no prazo de entrega e no custo do produto, é devido a isto, que muitos dos processos que possuem alguma similaridade são replicados a processos de novos produtos de forma parcial ou total, visando à agilidade e padronização (WRUBLAK, PILATTI e PEDROSO, 2008).

Outro exemplo de otimização foi mostrada por Kumar e Sridharan (2007), que por meio de um comparativo, utilizaram um modelo que simulava três cenários de um sistema produtivo na busca da melhor condição de usinagem. Objetivava encontrar a melhor sequência de operações e selecionar a ferramenta ideal, simultaneamente, minimizando o tempo de processo produtivo, prevendo antecipadamente as necessidades da produção.

A importância da otimização do processo de usinagem é nítida para Baptista e Coppini (2006), por proporcionar a redução de custo e o aumento de produtividade, sendo ainda um tema pouco abordado no que se refere à manufatura flexível.

A obtenção dos ganhos no aumento de capacidade e no aumento da eficiência de produção depende também da escolha da melhor estratégia de usinagem, que está vinculada diretamente à utilização dos parâmetros de corte, ideais ao processo de usinagem como um todo.

2.1.4. TRAJETÓRIA DE USINAGEM

As trajetórias de usinagem são necessárias para que a operação de usinagem seja realizada. Segundo Diniz, Coppini e Marcondes (2006), as trajetórias se dividem em dois movimentos de deslocamentos distintos, sendo o primeiro conhecido como movimento de deslocamento para aproximação da ferramenta junto a peça que será usinada. O segundo movimento é o de usinagem, em que ocorre literalmente o contato da ferramenta no material, havendo remoção de material.

Os percursos em que a ferramenta vai percorrer, são classificados por Diniz, Coppini e Marcondes (2006) como movimentos produtivos e não produtivos, ou movimentos ativos e passivos. Os movimentos ativos são os que realizam a operação de usinagem removendo material (cavaco). Os movimentos não produtivos são aqueles em que a ferramenta não tem contato com material, mas que são necessários para aproximação, recuo, correção ou ajuste entre ferramenta e peça.

As diferentes trajetórias da ferramenta podem representar grande influência do processo com relação as suas variáveis, como tempo de usinagem, vida útil da ferramenta, qualidade de corte e acabamento superficial (COPPINI *et al.*, 1997).

O acabamento da superfície pode ser afetado quando ao final da usinagem a ferramenta retorna sobre a região usinada, utilizando avanço rápido da mesa sem o afastamento da ferramenta e mantendo a mesma coordenada da

usinagem para realizar reposicionamento entre ferramenta e material. O retorno da ferramenta sobre o material é chamado por Franco, Estrems e Faura (2008) de retrocesso do movimento da ferramenta sobre a peça. Tanto no fresamento quanto no torneamento podem causar marcas na superfície da peça usinada, gerando cavacos em forma de palha de aço que interfere na rugosidade da superfície da peça usinada e no desgaste da ferramenta.

Na visão de Ferraresi (1995), o material removido, leva o nome de cavaco. Em estudo realizado por Ee *et al.* (2006), foram utilizados insertos com superfícies planas e com ranhuras (quebra-cavacos), para observar quais as trajetórias que os cavacos seguem quando se desprendem do material. Observaram que os cavacos seguem diferentes direções e formas, sob as mesmas condições de corte, variando ainda a distribuição das forças nas regiões dos desgastes da aresta de corte.

Em análise de outra variável pertencente ao inserto, Kountanya, Al-Zkeri e Altan (2009) observaram que o raio de ponta do inserto não tem influência no formato do cavaco, enquanto que o cisalhamento que ocorre na aresta de corte é uma característica mais dominante que a deformação termoplástica durante a operação de torneamento.

A forma do cavaco, a espessura, o ângulo de cisalhamento, a tensão, a taxa de deformação, a amplitude de vibração da ferramenta e o esforço de corte foram analisados por Pujana, Arrazola e Villar. (2008), por meio de fotografias tiradas durante a operação de usinagem, a sequência de imagem possibilitava a visualização de algumas variáveis que não são perceptíveis a olho nu.

A aprovação de um processo ocorre durante o *tryout*, que é a execução prática de todas as etapas que estão previstas no processo elaborado. Com o objetivo de medir a força de corte triaxial independente durante o *tryout*, Totis *et al.* (2010) desenvolveram um dispositivo eletrônico, que permite a leitura dos dados por meio de pulsos elétricos, possibilitando as correções dos parâmetros de corte e da trajetória da ferramenta ainda na aprovação do processo.

2.1.5. PARÂMETROS DE CORTE

Para se obter uma usinagem mais econômica, isto é, produzir mais peças, em menor tempo, com o menor custo, é preciso encontrar os parâmetros de corte que melhor viabilizam o processo produtivo.

A v_c adotada tem influência direta nas forças de corte, como mostrou Korkut e Donertas (2007), em estudo realizado foi previsto antecipadamente as velocidades de corte em função do material utilizado. Na mesma linha, Isik (2007) pesquisou a vida da ferramenta, incluindo ainda entre as variáveis utilizadas, as condições de usinagem, a máquina e a ferramenta de corte.

A previsão da vida da ferramenta está diretamente associada à adoção dos parâmetros de corte. Já há algum tempo o mercado busca soluções que auxiliem no cálculo dos parâmetros de corte, por meio de alguns sistemas que foram desenvolvidos.

Um método muito adotado entre os pesquisadores Davim, Gaitonde e Kamik (2008), Manna e Salodka (2008), Mukherjee e Ray (2006), Pawade *et al.* (2007) é o método Taguchi, que foi desenvolvido para assegurar o bom desempenho na fase de concepção de produtos ou processos.

O método Taguchi, segundo Pawade *et al.* (2007), é um método, que basicamente agrupa todas as variáveis de resposta, as variáveis independentes, suas interações e uma matriz ortogonal para análise das características evidenciadas em um determinado processo.

Ainda fazendo uso do método Taguchi, Manna e Salodka (2008) utilizaram a função ANOVA (*Analyse of Variance*), para análise estatística de variância, em que o objetivo era investigar alguns parâmetros de corte durante os ensaios. A investigação consistia em verificar quais parâmetros de corte influenciavam no acabamento da superfície usinada, observando-se os valores de entrada que interferiam nos resultados, foi possível classificar o parâmetro ideal que determinava o custo do produto.

Outro sistema foi desenvolvido por Baptista e Coppini (2006), que realiza o cálculo dos parâmetros de corte, por meio de um sistema via *Web*, denominado

Machining Optimizer System (MOS), que calculava de forma aproximada a quantidade de arestas de corte que seriam utilizadas para usinar pequenos lotes de peças de diferentes materiais e geometrias em uma manufatura flexível.

Em muitos dos processos de torneamento, a superfície usinada deve sair acabada da máquina, indo de encontro com esta necessidade, Manna e Salodkar (2008) desenvolveram um modelo matemático, que determinava os parâmetros de corte para torneamento, necessários para definir a rugosidade adequada da peça usinada de acordo com a necessidade e aplicação. O modelo desenvolvido auxiliava a obtenção do valor da rugosidade (R_a) da usinagem variando os parâmetros de corte durante o torneamento.

A ressonância produzida durante a operação de torneamento gera um determinado nível de vibração para cada operação de usinagem em decorrência do contato da ferramenta no material. A vibração gerada durante a usinagem foi analisada por Moradi *et al.* (2010), em que buscaram definir níveis de mínima e máxima ressonâncias, variando o uso das ferramentas já desgastadas e novas, para posterior análise da frequência emitida durante a usinagem comparada aos parâmetros de corte utilizados.

2.1.6. VELOCIDADE DE CORTE

Entre os parâmetros de usinagem, a velocidade de corte e a velocidade de avanço são componentes que interferem diretamente na vida da aresta de corte, na força de corte apresentada pela máquina ou pela rugosidade na região usinada do material (DINIZ, COPPINI e MARCONDES, 2006).

More *et al.* (2006), observaram que sempre que ocorreram alterações nos valores de velocidade de corte ou de avanço, a vida da aresta de corte altera, como também as forças de corte e a rugosidade.

Na análise realizada por Nalbant, Altin e Gokkaya (2007), as forças de corte variam conforme a geometria do inserto utilizado na usinagem e da v_c adotada. Em alguns casos citados no estudo, foi observado que ao ser aumentada a v_c , a força de corte é reduzida numa proporção menor do que a

empregada na v_c , além de gerar um volume maior de cavaco (COPPINI e BAPTISTA, 1998). O inverso pode ser considerado também verdadeiro, em que se adotada uma v_c menor, o tempo de vida da aresta será maior, conseqüentemente, o tempo de usinagem por peça também irá sofrer um aumento.

A adoção de uma v_c maior se adéqua melhor a uma produção de larga escala. No entanto, para um ambiente de manufatura flexível, Coppini *et al.* (1997), citam que alguns pontos importantes devem ser considerados, tais como:

- que para haver uma alteração da v_c , é importante que ocorra após a conclusão do ciclo de usinagem;
- que deve ser estabelecido um critério de substituição da aresta de corte e;
- que a troca da aresta de corte só deve ser realizada quando o critério estabelecido for atingido.

O catálogo do fabricante de ferramentas pode ser utilizado como uma ferramenta de auxílio, para selecionar os parâmetros de corte associados ao material que será usinado. O catálogo sugere os dados de corte, mas sempre a partir da definição do material a ser usinado, fornece ainda sugestões de primeira escolha de porta-ferramenta e do inserto, já integrando o material aos parâmetros de corte.

Usinando duas diferentes ligas de aços utilizando insertos de diferentes classes, Tanaka *et al.* (2007) observaram que os insertos que possuíam classificação adequada ao aço usinado obtiveram um melhor rendimento, obtendo um menor tempo de usinagem, devido à adoção de uma maior v_c . O desgaste da aresta de corte foi menor do que nas demais classes e a vida da aresta de corte foi maior com relação a outras classes de inserto.

Segundo Coppini, Malaquias e Marcondes (1998) existem duas vertentes no cenário produtivo, uma condição é a de máxima produção e a outra é a de mínimo custo. A velocidade de máxima produção se adéqua melhor em ambientes onde existem produção seriada com grande quantidade de peças

por lote, já para ambientes onde a quantidade de peças por lote é reduzida (cenário de manufatura flexível) a estratégia que se adapta melhor é a de mínimo custo.

A redução obtida no tempo de produção do lote com velocidades próximas da velocidade de máxima produção não seria tão significativa quando comparada a uma produção de lotes com grande número de peças. Segundo Coppini, Malaquias e Marcondes (1998) sendo a vida da aresta de corte menor, a máquina trabalharia em condições extremas e os riscos de quebra da aresta seriam desnecessários, além de pode afetar qualidade da peça usinada.

2.1.7. VIDA DA ARESTA DE CORTE

Na busca por um maior rendimento na operação de usinagem, visando uma maior produtividade, em que o operador não tenha que interromper o ciclo de usinagem para realizar a troca da aresta de corte, são utilizadas cada vez mais novas tecnologias com insertos revestidos.

Kalvoda e Hwang (2010) comentam da importância das novas tecnologias na evolução das ferramentas de corte, visando aumentar a resistência da aresta de corte, diminuindo a possibilidade de falha durante o ciclo de operação. A não detecção de uma quebra da ferramenta, sem que haja a interrupção do ciclo de usinagem, pode acarretar em sérios danos ao equipamento, ao material e/ou suporte da ferramenta.

A falha mais crítica que pode ocorrer com uma ferramenta é a quebra da aresta de corte. Cheung *et al.* (2008) citam outros tipos de falhas que podem ocorrer com a aresta de corte da ferramenta, entre elas são apontadas: lascas, trincas e quebras.

Segundo Diniz, Coppini e Marcondes (2006), a lasca ocorre em arestas de corte mais frágeis ou menos reforçadas, enquanto que a trinca é provocada por variação de temperatura ou de esforço mecânico. Já as ferramentas quando são mais resistentes ao desgaste, são menos tenazes e menos resistentes ao choque, favorecendo a quebra.

Outro tipo de falha que ocorre na aresta de corte é a cratera, em que Kumar, Durai e Sornakumar (2006) compararam o desgaste da aresta de corte do inserto na operação de torneamento do aço AISI 4340, em que os materiais possuíam diferentes durezas e as velocidades de corte foram alteradas de acordo com as durezas dos materiais. Na análise da aresta de corte utilizada foi observado que houve formação de cratera na área desgastada e que a vida da aresta foi afetada, portanto, concluiu-se que a formação de cratera é um fator determinante para definir a vida útil da aresta de corte, sendo mais propícia a formação de cratera quando a velocidade de corte está mais próxima do limite recomendado pelo fabricante de ferramentas.

As avarias que ocorrem na aresta de corte, em muitos dos casos podem ser decorrentes das condições de corte empregadas. Segundo Bouzakis *et al.* (2009), em uma usinagem, onde se faz uso de insertos que possuam uma menor aplicação de substratos nas camadas que revestem as suas superfícies, as variações térmicas e de esforços mecânicos suportadas não serão elevados.

As camadas aplicadas na cobertura dos insertos, foram baseadas em novos substratos e novos revestimentos utilizados em usinagens que necessitem de altas velocidades de corte, utilizadas principalmente em matrizarias que possuem máquinas *High Speed Machines (HSM)*.

Estas máquinas *HSM* na sua maioria possuem sistemas de refrigeração duplos, isto é, sistema de refrigeração externo, similar ao sistema convencional de refrigeração de máquinas com menor tecnologia e sistema interno, que passa pelo interior da ferramenta, capaz de resfriar a ferramenta e o material de forma mais eficaz graças ao volume de fluido emitido, favorecendo ainda a expulsão do cavaco durante a usinagem (CLAUDIN e RECH, 2009).

Fang e Wu (2009) realizaram um estudo comparativo utilizando o mesmo equipamento para usinar diferentes materiais no conceito *HSM*, capaz de propiciar o entendimento dos diferentes resultados obtidos de um material para outro, facilitando na escolha da geometria da ferramenta mais adequada voltadas para as condições de corte definidas.

As respostas e explicações do desempenho desfavoráveis das operações de usinagem podem estar além das condições de usinagem. Segundo Bouzakis *et al.* (2008), o desgaste na camada que reveste o inserto, pode ser causado pela adoção de parâmetros de corte inadequados ao material usinado.

Em investigação realizada por More *et al.* (2006) em que foi usinado o aço AISI 4340, fazendo uso dos insertos de CBN-TiN e PCBN, na qual foi analisada o desgaste de flanco dos dois tipos de insertos, motivados por ações abrasivas da martensita presentes na liga do aço. No comparativo foi observado o desempenho dos insertos, a vida útil da aresta de corte e a viabilidade do torneamento com o inserto de CBN, uma vez que este possui um custo elevado.

Coelho, Ng e Elbestawi (2007) e Özel (2009), indo na mesma linha de investigação, analisaram o desgaste do inserto de PCBN com diferentes revestimentos no torneamento da liga AISI 4340, comparando os resultados com uma aresta sem revestimento.

Outra característica que deve ser considerada no momento da escolha do inserto é o raio de ponta da aresta de corte. Em análise realizada por Rech (2006), foram observados os diferentes raios de ponta. Nos ensaios realizados, buscou encontrar qual ou quais raios apresentaria(m) a maior resistência ao desgaste e o maior tempo de vida da aresta.

Para os casos em que a resistência ao corte é elevada, Wyen e Wegener (2010), utilizaram diferentes estratégias e analisaram quais as componentes atuantes das forças ativas para usinar materiais com grande resistência ao corte. Foi percebido que quando a v_c é aumentada, a temperatura também aumenta devido ao atrito entre a ferramenta e o material e como consequência a vida da aresta de corte é reduzida.

Em outra análise de resistência ao corte, Karpát e Özel (2008) analisaram a relação entre a aresta de corte utilizando geometrias arredondadas e as forças de corte. Observaram que ao variar o tamanho do raio do inserto, a resistência mecânica durante a usinagem também varia, não sendo aconselhável este tipo de geometria para pequenas remoções de materiais.

Al-Ahmari (2007) utilizou-se de alguns modelos propostos para comparar e avaliar a vida útil da aresta de corte da ferramenta, dentre as variáveis observadas, considerou a força de corte necessária para a usinagem do material e a rugosidade da superfície do material utilizado no experimento.

Davim, Gaitonde e Kamik (2008) definem a profundidade de corte como sendo o parâmetro que menos interfere na operação de usinagem e no desgaste da aresta de corte, portanto, não é o fator que tem incidência marcante sobre a redução da vida da aresta de corte mesmo em casos onde a superfície usinada possui elevada rugosidade.

Quando for observada irregularidade na superfície usinada, deve-se direcionar uma atenção maior para o ângulo de corte da ferramenta, segundo Zain, Haron e Sharif (2010), o ângulo de corte da ferramenta pode interferir diretamente no comportamento da usinagem, gerando variação da rugosidade da superfície usinada, sendo influenciada por meio das variáveis do efeito radial do ângulo de inclinação da ferramenta e dos parâmetros de corte adotados.

Existe ainda o ângulo de posição do porta-ferramenta ou do suporte que acopla o inserto. Em investigação realizada por Oliveira e Diniz (2009), demonstraram que o ângulo de posição interfere diretamente na vida da aresta, devido ao atrito ocorrido durante a usinagem, gerando fadiga mecânica e térmica por ocorrer desprendimento de algumas partículas de substrato, formando crateras na superfície do inserto.

Chen *et al.* (2006) investigaram sobre os efeitos do ângulo de cunha do inserto, como um fator que interfere diretamente na vida útil da aresta de corte, e qual a relação do ângulo de folga com o aumento da temperatura durante a operação de torneamento.

Na escolha de uma ferramenta deve ser observado, o ângulo do inserto e o ângulo do porta-ferramenta definido pelo catálogo do fabricante de ferramentas, como ângulos positivos e negativos. O inserto positivo tem ângulo de folga positivo menor que 90° e o negativo possui um ângulo de 90° .

A vida da aresta de corte esta associada as suas características e ao material a ser usinado, no tópico seguinte será apresentado a base teórica abordando as condições de usinagem, ferramentas e dados para usinagem.

2.1.8. BASE TEÓRICA

Adotando-se as mesmas bases teóricas utilizadas por Guilherme *et al.* (2008) em trabalhos anteriores, no qual o conceito de vida da aresta de corte se porta de forma diferente quando comparado com o conceito tradicional. A mesma aresta de corte será utilizada para cortar peças de diferentes materiais e geometrias. A cada peça usinada, será consumida uma percentagem da vida da aresta, conforme as condições de usinagem e do número de peças representada pela Equação (1).

$$Z_{ti} = \frac{T_i}{t_{ci}} \quad (1)$$

Onde:

Z_{ti} = previsão da quantidade de peças usinadas de cada lote i com a mesma aresta de corte;

T_i = tempo de vida da aresta de corte, previsto pelo catálogo do fabricante [min];

t_{ci} = tempo de corte de cada peça do lote i [min].

Assim, quando o número de peças usinadas for inferior ao valor de Z_{ti} , o percentual restante de vida da aresta de corte poderá ser utilizado para usinar peças de outro lote até atingir a previsão do catálogo, representada por PT_{at} , como sendo a porcentagem da sua vida da aresta consumida para usinar cada peça ou lote.

Desta forma, a mesma aresta de corte pode permanecer montado no suporte da ferramenta e cortar novas peças do mesmo lote ou de peças do lote seguinte. PT_{at} é dada pela Equação (2).

$$PT_{at} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_i}{Z_{ti}} \right) * 100 \quad (2)$$

Onde:

Z_i = é a quantidade de peça efetivamente usinada de cada lote de material.

A relação $\left(\frac{Z_i}{\sum Z_i}\right)$ é o percentual da vida da aresta de corte consumida para cortar um determinado número de peças do lote i .

Quando o critério de vida pré-definido é atingido, a mesma aresta acumula percentuais de vida por usinar peças de diferentes lotes. Então, pode-se considerar que, quando o valor PT_a , calculado como mostrado na Equação (3) está próximo ou igual a 100%, a aresta deve continuar usinando até que não apresente mais condições de uso, só devendo ser substituída por uma nova aresta, quando for realmente constatado fim de vida da aresta, com desgaste extremo. Pode ocorrer o inverso também, em que a aresta de corte necessite ser substituída com percentual inferior a 100%, mas que tenha atingido o fim de vida da aresta, conforme o critério estabelecido.

$$PT_a = \sum_i^m PT_{a/i} \approx 100\% \quad (3)$$

Onde:

PT_a atinge aproximadamente 100% de corte da vida consumida da aresta de corte por cortar m peças de i diferentes lotes [%]. Com base nos dados fornecidos pelo catálogo do fabricante de ferramentas, mais especificamente, por meio dos fundamentos teóricos desenvolvidos pela Sandvik Coromant, foi o meio utilizado para calcular a vida da aresta (AB SANDVIK COROMANT, 2008).

O catálogo permite selecionar os parâmetros de corte e prever a vida da aresta, que é aproximadamente de 15 minutos. O catálogo não especifica o critério utilizado que possibilitou determinar este valor de 15 minutos, como sendo o tempo de vida da aresta de corte.

A seguir apresenta-se uma breve descrição da influência dos principais elementos de liga adicionados aos aços utilizados nos ensaios (FERROS & AÇOS II-10, 2010):

➤ Carbono (C): Aço carbono é a composição da liga que confere ao aço o seu nível de resistência mecânica. O ferro gusa, primeira etapa de fabricação do aço, é o mesmo para todos os produtos. Na fase seguinte, quando os elementos de liga são adicionados ou suprimidos no ferro gusa, é que são determinadas as grandes famílias de aço, dos mais rígidos aos mais estampáveis. O Carbono é o principal elemento endurecedor em relação ao ferro. Outros elementos, como o manganês, o silício e o fósforo, participam igualmente do ajuste do nível de resistência do aço. A quantidade de Carbono define sua classificação: o baixo carbono possui no máximo 0,30% do elemento; o médio carbono apresenta de 0,30 a 0,60% e o alto carbono possui de 0,60 a 1,00%;

➤ Manganês (Mn): em média, para cada 1% de manganês, a resistência à tração aumenta 100 MPa. Para aços temperáveis, aumenta a dureza após o processo de têmpera;

➤ Fósforo (P): é considerado um elemento prejudicial, resultante do processo de produção. Torna o aço frágil, efeito que se acentua com o aumento do teor de carbono. Assim, os teores máximos permitidos devem ser controlados com rigor em aços para aplicações estruturais ou críticas;

➤ Enxofre (S): é, na maioria dos casos, um elemento indesejável, oriundo do processo de produção. Se combinado com o ferro na forma de sulfeto, deixa o aço quebradiço. Entretanto, se combinado com o manganês na forma do respectivo sulfeto, favorece a usinagem com a formação de cavacos que se quebram facilmente;

➤ Silício (Si): é um agente desoxidante na produção do aço. Aumenta a resistência à corrosão e a resistência à tração, mas prejudica a soldagem. O silício aumenta significativamente a resistividade elétrica do aço e, por isso, aços com silício são amplamente usados em núcleos magnéticos (motores, transformadores, etc.) devido às menores perdas com as correntes parasitas que se formam;

➤ Chumbo (Pb): não se liga ao aço mas, quando adicionado, distribui-se na estrutura em forma de partículas microscópicas, o que resulta

em maior facilidade de usinagem. Entretanto, devido ao baixo ponto de fusão (cerca de 327°C), aços com chumbo não devem ser usados em temperaturas acima de 250°C;

➤ Níquel (Ni): em média, para cada 1% de níquel, a resistência à tração aumenta 40 MPa, mas o limite de elasticidade é mais favorecido. Melhora significativamente a capacidade de têmpera, possibilitando redução da velocidade de resfriamento. O níquel altera a alotropia do ferro e teores acima de 25% fazem reter a austenita em temperaturas usuais, fazendo um aço austenítico, que não é magnético e bastante resistente à corrosão. Com 36% de Ni, o aço tem o menor coeficiente de dilatação térmica e é usado em instrumentos de medição. Em conjunto com o cromo, o aço pode ser austenítico com a combinação 18% Cr e 8% Ni;

➤ Cromo (Cr): melhora a resistência à corrosão (aço com cerca de 12% Cr resiste à ação da água e de vários ácidos), aumenta a resistência à tração (em média, 80 MPa para cada 1% de cromo), melhora a facilidade de têmpera, aumenta a resistência à alta temperatura e ao desgaste;

➤ Molibdênio (Mo): melhora a resistência a altas temperaturas, a resistência ao desgaste e a dureza após a têmpera. Para aços inoxidáveis, melhora a resistência à corrosão;

➤ Vanádio (V): refina a estrutura do aço, impedindo o crescimento dos grãos. Forma carbonetos duros e estáveis e é usado em aços ferramentas para aumentar a capacidade de corte e dureza em altas temperaturas.

Após determinar a escolha do porta-ferramenta e do inserto, o catálogo ainda define os valores de máxima v_c , profundidade de corte a_p e avanço de corte

	Mínimo	Máximo	Sugerido
V_c (m / min)	195	390	325
a_p (mm)	0,8	6	3
f (mm / r)	0,18	0,6	0,35

f. Para o inserto escolhido, a vida prevista é de 15 minutos, com uma v_c de 325 m/min, com um a_p de 3 mm e com um f de 0,35 mm/r, conforme demonstrado no Quadro 1.

QUADRO 1 – DADOS FORNECIDOS PELO CATÁLOGO.

O catálogo do fabricante de ferramentas apresenta valores de máxima e mínima para a v_c , sugerindo ainda a v_c de 325 m/min para uma vida de 15 minutos. Para o caso de adotar uma v_c diferente da sugerida pelo catalogo, a previsão de vida da aresta de corte será diferente de 15 minutos. O catálogo trás informações que auxiliam no calculo da nova v_c e da nova previsão da vida da aresta de corte de acordo com a v_c escolhida.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho é considerado uma pesquisa exploratória, segundo Gil (2007), “[...] proporciona maior familiaridade com o problema, aprimorando idéias ou a descoberta de intuições”. Sendo também uma pesquisa aplicada, de acordo com Lakatos e Marconi (2001), pois objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à resolução de problemas específicos, em que a abordagem é quantitativa, segundo Demo (2001), auxilia a ordenação e a mensuração dos dados, facilitando o entendimento dos fenômenos.

3.1. MATERIAIS

Os materiais e os processos utilizados para a realização dos ensaios faziam parte da rotina da empresa que possuía um sistema de manufatura flexível. A seguir serão descritos os materiais e máquina-ferramenta utilizados, sendo:

- torno CNC – fabricante DMG (Deckel Maho Gildemeister) – Modelo CTX 510, máquina com limitação de rotação, atingindo rotação máxima de 3000 rpm;
- aços de baixa liga, sendo SAE 4140, SAE 4340 e SAE 6150;
 - dureza aproximada de 180 HB, os materiais não foram submetidos a nenhum tratamento;
 - lotes de peças para usinagem de desbaste, com quantidades reduzidas;
 - os diâmetros dos materiais variavam de 1” ½ a 9”, e os comprimentos eram fornecidos já cortados por serras conforme dimensões solicitadas pela área de processo;
 - o diâmetro dos materiais eram em bruto e superior a 32 mm ou 1” 1/4, para garantir o diâmetro mínimo após a usinagem de 30 mm.
- porta-ferramenta padrão: ISO - C5 - DDJNL – 35060 - 15, definido com base nas operações de faceamento, torneamento externo e de mergulho, seguindo a sugestão do catálogo;

- inserto padrão de código - DNMG 15 06 12 PM 4225, definido conforme geometrias e materiais estabelecidos para a realização dos ensaios com base na sugestão do catálogo;
- catálogo do fabricante de ferramentas de usinagem da empresa Sandvik do Brasil S.A.;
- foi utilizada a mesma velocidade de corte e de avanço para todos os materiais;
- planilha para lançamento dos dados extraídos da ordem de produção (OP), ou dos ensaios realizados;
- restrições observadas;
 - diâmetro mínimo das peças usinadas deveriam ser superior a 30mm;
 - foi definido o critério de fim de vida da aresta de corte.

3.2. MÉTODOS

O modelo proposto previu a comparação entre os parâmetros selecionados pelo catálogo do fabricante de ferramentas da empresa Sandvik do Brasil S.A com os valores obtidos em ensaios realizados em uma produção que utiliza o conceito de manufatura flexível.

A operação de usinagem realizada foi de torneamento de desbaste em um torno CNC, máquina fabricada pela empresa DMG (Deckel Maho Gildemeister) – Modelo CTX 510, como mostrado na Figura 1, com rotação máxima de 3000 rpm.



FIGURA 1 – TORNO CNC DMG - MODELO CTX 510.

As peças usinadas possuíam diferentes geometrias e foram utilizados três diferentes materiais (SAE 4140, SAE 4340 e SAE 6150). Os materiais não foram submetidos a nenhum tratamento térmico, os aços possuíam dureza aproximada de 180 HB.

As peças e os processos utilizados nos ensaios faziam parte da rotina de uma empresa que possuía um sistema de manufatura flexível, em que a quantidade de peças por lote era reduzida e em muitos dos casos tendendo a uma peça por lote.

O porta-ferramenta e o inserto definidos para a realização dos ensaios obedeceram à sugestão do catálogo do fabricante de ferramentas, foi definida como “primeira escolha do catálogo” o porta-ferramenta: ISO - C5-DDJNL-35060-15, considerado ideal para as condições de usinagem e dos materiais previstos permitindo ainda, entrar no material em mergulho num ângulo de até 30° como mostra a Figura 2.

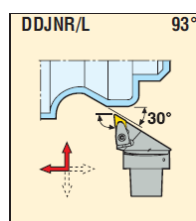


FIGURA 2 – OPERAÇÕES DE USINAGEM – FACEAMENTO, TORNEAMENTO EXTERNO E DE MERGULHO.

O porta-ferramenta apresentado na Figura 3 possui fixação do inserto por meio de um grampo, que garante a imobilização do inserto no momento do esforço de usinagem durante a usinagem, tendo ainda informações que possibilita ao processista ou ao operador adequar à ferramenta ideal para a usinagem que poderá realizar operações de torneamento externo, faceamento e mergulho.

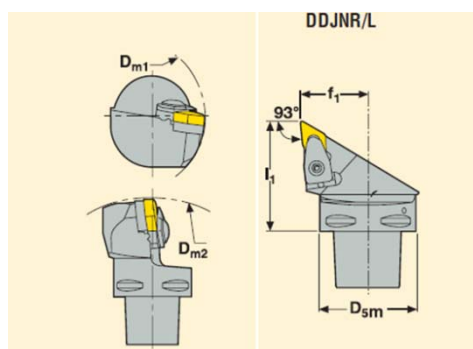


FIGURA 3 – INFORMAÇÕES DO DIMENSIONAL DO PORTA-FERRAMENTA.

Onde:

D_{m1} – largura da ferramenta, dimensão do centro da ferramenta ao raio de ponta do inserto;

l_1 – comprimento da ferramenta, dimensão da face de fixação do sistema de fixação ao inserto.

O inserto definido foi o DNMG 15 06 12-PM 4225, possui cobertura TiN, ângulo de ponta igual a 55° , conforme mostra Figura 4.

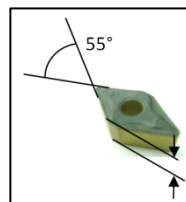


FIGURA 4 – INFORMAÇÕES DO DIMENSIONAL DO INSERTO.

O critério determinou a troca da aresta de corte quando atingisse o desgaste extremo de fim de vida. Foi considerada a mesma velocidade de corte para todas as geometrias e materiais das peças usinadas por possuírem durezas semelhantes. A velocidade de corte de 325 m/min foi extraída do catálogo em que previa a vida da aresta de corte de 15 minutos.

Como houve a necessidade de alterar a v_c para 280 m/min, motivado pela restrição da rotação máxima da máquina em 3000 RPM. Devido a esta restrição houve também a necessidade do recálculo da vida da aresta de corte que passou a ser de 29 minutos e 42 segundos, o modo em que foi realizado o recálculo será apresentado adiante.

Na lista de referências dos materiais apresentados no catálogo do fabricante de ferramentas de corte, os aços possuem uma classificação definida pelo fabricante como: *Coromant Material Classification* (CMC). No Quadro 2 os aços aparecem na coluna dos Estados Unidos (EUA), e os materiais são classificados como aços de baixa liga, com CMC de 02.1/ 02.2, possuem dureza aproximada de 180 HB.

ISO	MC	CMC	Alemanhã	Grã Bretanha	Suécia	EUA	França	Itália	Espanha	Japão
P			DIN	BS	SS	AISI/ SAE	AFNOR	UNI	UNE	JIS
Aços	P2.1.Z.AN	02.1	42CrMo4	708M40 19A	2244	4140	42CD4	42CrMo4	42CrMo4	SCM440(H)
	P2.1.Z.AN/ P2.5.Z.HT	02.1	34CrNiMo6	817M40 24	2541	4340	35NCD	35NiCrMo6(KB)	-	-
	P2.1.Z.AN/ P2.5.Z.HT	02.1	51CrV4	735A50 47	2230	6150	50CV4	50CrV4	51CrV4	SUP10

QUADRO 2 – LISTA DE REFERÊNCIAS DOS MATERIAIS.

No Quadro 3 são mostrados os fatores de ajuste da v_c recomendada pelo catálogo, no caso do material possuir uma dureza superior ou inferior a 180 HB. Para os materiais utilizados nos ensaios não houve a necessidade de recálculo, por que a dureza do material é de 180 HB e o fator é igual a 1.

			Dureza Reduzida				Dureza Aumentada				
ISO/ ANSI	CMC	HB	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	100
P	02.1	180 HB	1.44	1.25	1.11	1	0.91	0.84	0.77	0.72	0.67

QUADRO 3 – DUREZAS BRINELL.

Uma restrição observada foi com relação ao diâmetro mínimo torneado, este deve ser superior a 30 mm, para que a usinagem seja realizada com velocidade constante.

Ao se desmembrar o código do inserto foi obtido as seguintes descrições:

- *D* – formato da pastilha, com 55°;
- *N* – ângulo de folga da pastilha, com 0°;
- *M* – tolerâncias;
- *G* – tipo de pastilha, com quebra cavaco nos dois lados;
- 15 – tamanho da pastilha, refere-se ao comprimento da aresta de corte, igual a 15mm;
- 06 – espessura da pastilha, com 6,35 mm;
- 12 – raio de ponta, com raio de 1,2 mm;
- *PM* – geometria da pastilha, sendo o “P” específico para aços e o “M” para usinagem de média remoção;
- 4225 - classe da pastilha, GC 4225, adequada para usinagem de aços de baixa liga, HB 180;

E ao detalhar a descrição do código do porta-ferramenta, *C5-DDJNL-35060-15*, obtem-se:

- *C5* – definição da fixação do porta-ferramenta na torre da máquina, tamanho do acoplamento Capto;
- *D* – sistema de fixação do inserto no porta-ferramenta, por grampo;
- *D* – formato da pastilha, com 55°;
- *J* – tipo de suporte;
- *N* – ângulo de folga da pastilha, com 0°;
- *L* – versão esquerda da ferramenta;
- *35* – largura da ferramenta, distância do centro da ferramenta ao raio da ponta do inserto;
- *060* – comprimento da ferramenta, da face de apoio da fixação capto ao raio de ponta do inserto;
- *15* – tamanho da pastilha, refere-se ao comprimento da aresta de corte, igual a 15mm.

3.2.1. SEQUENCIAMENTO DO MÉTODO

O método foi sequenciado em cinco etapas como mostra a Figura 5, sendo ordenada da seguinte forma:

- lotes de peças;
- preparação de máquina;
- programa CNC;
- usinar material;

➤ coletar dados.

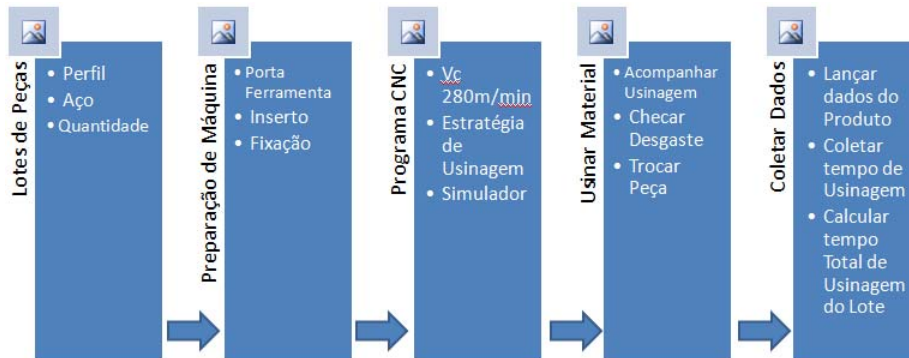


FIGURA 5 - SEQUENCIAMENTO DAS ETAPAS.

A primeira etapa foi atribuída aos lotes de peças, que eram acompanhados dos materiais e do desenho que continha a geometria a qual o material seria torneado, por meio da ordem de produção (OP) obtinha-se a liga de aço do material e a quantidade de material a ser torneada.

A segunda etapa consistiu na preparação de máquina, isto é, na montagem do inserto no porta-ferramenta e este na torre da máquina, para realização do *presetting* da ferramenta definindo o comprimento e raio do inserto e por fim, a fixação do material a ser usinado na placa, já com as castanhas montadas na placa da máquina.

Depois de cumpridas as duas etapas iniciais, na terceira foi realizada a elaboração do programa CNC diretamente no comando da máquina. A velocidade de corte utilizada foi de 280 m/min para todos os lotes e para os três materiais.

As estratégias de usinagem foram estabelecidas por meio dos programas CNCs e confirmadas graficamente na tela do comando da máquina adotando-se o procedimento de simulação do programa CNC, via garantir a eliminação de possíveis erros de trajetórias e colisões entre máquina, material e ferramenta.

A parte prática, isto é, a usinagem do material foi definida como etapa quatro. Após a usinagem de cada material era feita a checagem do desgaste da aresta de corte do inserto para observar se este havia atingido o fim de vida da aresta,

era feita também a checagem da variação dimensional e o acabamento da superfície do material torneado. No caso de ser percebido desgaste excessivo da aresta de corte ou variação dimensional e acabamento irregular na área torneada do material era realizada a troca da aresta de corte.

Ao final da usinagem de cada peça era realizada uma análise visual da aresta de corte e se esta mantivesse condições de usinagem, era mantida na máquina para usinar a peça seguinte e no caso da última peça usinada ser a última do lote, o inserto era mantido na máquina para usinar o lote seguinte, só ocorrendo a troca quando atingisse o critério de fim de vida da aresta conforme descrito anteriormente.

Foi elaborada uma planilha para inclusão dos dados retirados da OP e de outros dados obtidos no decorrer dos ensaios para cada lote produzido. A Tabela 1 apresenta a planilha na qual foram lançados os dados. As colunas 1, 2 e 3, são reservadas para dados retirados da OP. A coluna 4 se refere a v_c definida no cálculo realizado com base no catálogo do fabricante de ferramentas de corte ($v_c = 280$ m/min), as demais colunas foram destinadas a dados obtidos nos ensaios.

TABELA 1 - DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
DADOS DOS ENSAIOS PRÁTICOS								REAL			CATÁLOGO		
Código	Material	Z_{lot}	s_{cat}	T_i	t_{st}	t_{ci}	t_{clot}	PT_{ii}	PT_s	N_i	PT'_{ii}	PT'_s	N'_i
		[Pcs]	[m/min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[%]	[%]	[Unidade]	[%]	[%]	[Unidade]
		280			3,0								

As nomenclaturas utilizadas na planilha são:

- código – código do produto;
- material – liga de aço utilizado nos ensaios, definido como sendo SAE 4140, 4340 ou 6150;
- Z_{lot} - quantidade de peças existente no lote;
- s_{cat} – velocidade de corte definida por meio do catálogo [280 m/min];
- T_i – tempo de vida da aresta de corte a que a aresta de corte alcançou nos ensaios;

- t_{st} – tempo utilizado para realizar a troca e o presetting da ferramenta [3 min];
- t_{ci} – tempo de usinagem utilizado para usinar cada peça [min.], tempo obtido no simulador gráfico existente no comando da máquina;
- t_{lot} - tempo utilizado para usinar todas as peças do lote, para a obtenção deste tempo foi multiplicado \sum_{lot} por t_{ci} ;
- PT_{af} – percentual consumido da vida da aresta de corte para usinar cada lote de peças;
- PT_a – percentual total da aresta de corte até atingir o fim de vida, em que são somados os valores de PT_{af} da mesma aresta de corte até atingir 100%, o que significa que esta atingiu 100% da vida e deve ser substituída;
- N_t - quantidade de arestas de corte consumidas nos ensaios, quando o PT_a atinge 100%, significa que foi consumida uma aresta de corte;
- PT'_{af} – previsão do percentual consumido da vida da aresta de corte para usinar cada lote de peças, com base no tempo de vida do catálogo que é de 29 minutos e 42 segundos;
- PT'_a – previsão do percentual total da aresta de corte até atingir o fim de vida, baseado na vida da aresta de corte sugerida pelo catálogo do fabricante de ferramentas;
- N'_t - quantidade de arestas de corte consumidas conforme previsão do catálogo, quando PT'_a atinge aproximadamente 100% da vida da aresta de corte, o catálogo define que este é o momento em que a aresta de corte deveria ser trocada.

3.2.2. DIRETIVAS

Inicialmente foram traçadas algumas diretivas, que consistiam em pontos a serem seguidos no transcorrer dos ensaios, com a finalidade de que os resultados apresentados não fossem colocados em dúvida.

Todos os ensaios foram realizados em uma mesma máquina e pelo mesmo operador. Os procedimentos previam:

- seleção dos lotes de peças com base na geometria, obedecendo o sequenciamento definido pela área responsável;
- considerar como sendo lote de peça, um conjunto de peças que possuam a mesma geometria e o mesmo material;
- utilizar o suporte de ferramenta definido apenas para os ensaios, a fim de evitar dúvida quanto ao percentual da vida da aresta de corte consumido;
- utilizar somente o código e classe do inserto definidos no início do estudo para a realização dos ensaios;
- garantir a segurança, estabilidade e rigidez, na fixação do material e da ferramenta, para evitar danos a integridade física do operador e do equipamento ou redução da vida da aresta de corte;
- definir junto ao operador as estratégias de usinagem para cada lote a ser usinado;
- adotar somente a v_c de 280 m/min.;
- que o operador deve elaborar programa CNC com a distância de aproximação da ferramenta padronizada em relação ao material, conforme mostra a Figura 6, sendo a primeira aproximação de $Z=5$ (ferramenta afastada 5 mm do material) em “G0” (Deslocamento do eixo com avanço rápido), em seguida $Z=1$ (ferramenta afastada 1 mm do material) em “G1” (deslocamento do eixo com avanço programado),

ambos devem ser desconsiderados na somatória dos tempos produtivos.

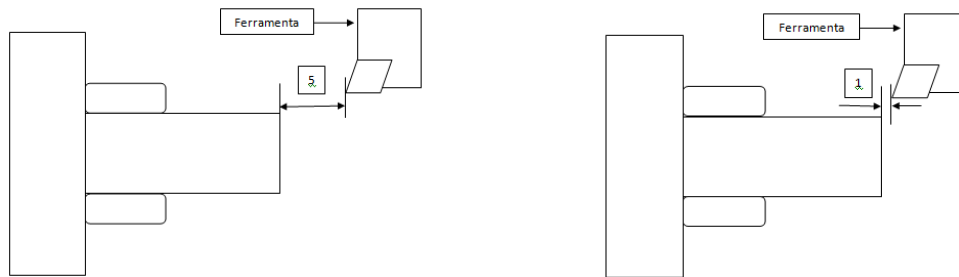


FIGURA 6 – PADRONIZAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE FERRAMENTA E MATERIAL.

- testar os programas CNC e extrair os tempos de usinagem no simulador gráfico existente no comando da máquina utilizando a opção bloco a bloco;
- a preparação da máquina e a operação de usinagem devem ser realizadas pelo operador;
- preencher os campos da planilha elaborada com os dados e informações fornecidas pela ordem de produção e dos dados obtidos nos ensaios;
- a troca da aresta de corte ocorreu somente ao final da usinagem da peça, salvo nos casos em que for percebida a ocorrência da quebra do inserto, ou em caso que coloque em risco as condições de trabalho;
- o critério de fim de vida da aresta de corte adotado envolve a questão prática e a experiência do operador, que é voltada a condição visual da aresta de corte, e/ou da superfície do material usinado, além da condição auditiva, do som produzido no momento da usinagem, pode caracterizar esforço de corte;
- excluir os tempos de elaboração do programa CNC.

O catálogo do fabricante de ferramentas sugere uma faixa de máxima e mínima v_c , sendo 390 m/min a máxima, 190 m/min a mínima e 325 m/min como a ideal para usinar os materiais previstos em que o diâmetro mínimo foi de 30 mm.

Como a máquina utilizada possuía uma rotação máxima de 3000 rpm foi necessário encontrar outra v_c dentro da faixa sugerida, para atender os critérios estabelecidos, fazendo-se o recálculo da v_c conforme a Equação (4).

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \rightarrow V_c = 280 \text{ m/min} \quad (4)$$

Para a v_c de 325 m/min o catálogo fixa a vida da aresta de corte em 15 minutos. A Tabela 2 mostra o fator de correção igual a 1.0.

TABELA 2 - FATOR DE CORREÇÃO DA VIDA DA ARESTA DE CORTE.

Tempo de Vida [min.]	10	15	20	25	30	45	60
Fator de Correção	1.10	1.0	0.95	0.90	0.87	0.80	0.75

Sendo a v_c adotada de 280 m/min, foi necessário encontrar um novo fator de correção representado por “y” na Equação (5) para determinar uma nova previsão de vida da aresta de corte.

$$y = \frac{280 \cdot 1,0}{325} \rightarrow y = 0,8615 \quad (5)$$

O fator de correção mais próximo existente na Tabela 2 é o valor de 0,87 para uma vida da aresta de corte de 30 minutos.

O próximo passo foi obter o valor de “T”, que representa a vida exata da aresta de corte para uma de v_c de 280 m/min, apresentada por meio da Equação (6).

$$T = \frac{30 \cdot 0,8615}{0,87} \rightarrow T = 29,7 \text{ min} \rightarrow T = 29 \text{ minutos e } 42 \text{ segundos} \quad (6)$$

O valor obtido previu uma vida da aresta de corte de 29 minutos e 42 segundos, quando adotada uma v_c de 280 m/min. As adequações realizadas demonstram a possibilidade e necessidade de realizar os ajustes conforme as restrições existentes no cenário vivenciado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização dos ensaios foram realizados os cálculos dos parâmetros de corte adequando-os ao cenário vivenciado, tendo, portanto, que determinar a rpm conciliada ao diâmetro do material usinado, para que fosse mantida uma velocidade constante em todas as situações previstas nos ensaios.

Com a alteração da v_c de 325 m/min para 280 m/min, se fez necessário rever a previsão de vida para a aresta de corte, passando de 15 minutos para 29 minutos e 42 segundos. Foi utilizado o valor de avanço f igual a 0,3 mm e a profundidade de corte a_p não pode ser determinada em decorrência de se tratar de uma manufatura flexível em que as geometrias usinadas variam a todo o momento, o que torna difícil o controle da profundidade de remoção a cada passada da ferramenta.

Se comparada a v_c sugerida de 325 m/min e a v_c recalculada de 280 m/min, observou-se que a v_c foi reduzida em 14%, enquanto que o tempo de vida da aresta de corte, praticamente dobrou, de 15 minutos para 29 minutos e 42 segundos. Percebeu-se que não existe uma proporcionalidade entre estes dois fatores, isto é, a proporção reduzida da v_c não está associada ao tempo de vida da aresta de corte.

No decorrer dos ensaios foi necessário separar os resultados obtidos em dois grupos em decorrência do grande número de insertos que apresentaram quebra. O primeiro grupo diz respeito aos insertos que quebraram durante a operação de usinagem, e o outro se refere aos insertos que foram substituídos quando atingiram o desgaste extremo, isto é, quando atingiu o fim de vida da aresta de corte.

Na Tabela 3, é mostrado o grupo em que as arestas de corte sofreram quebra durante o ciclo de usinagem. Neste grupo foram torneados 25 lotes, contendo um total de 58 peças, a produção destes lotes foi realizada em 100,4 minutos, tendo sido consumidas um total de 14 arestas de corte. Enquanto que pelo cálculo feito a partir de dados do catálogo a previsão de consumo seria de 3,38

arestas, dentro de um quadro de total naturalidade, para usinar as mesmas peças.

TABELA 3 – RESUMO DOS ENSAIOS DAS ARESTAS COM QUEBRAS.

Nº Lotes	Pçs Usinadas	Tempo total	Vida Média	Arestas consumidas	Previsão Catálogo
[Unidade]	[Unidade]	[Minutos]	%	[Unidade]	[Unidade]
25	58	100,4	24	14	3,38

Em virtude da ocorrência das quebras das arestas de corte no decorrer do torneamento dos materiais, os resultados práticos mostraram-se bem inferiores a previsão do catálogo. Em um cálculo pela média para este quadro, o consumo e a vida da aresta de corte atingiram apenas 24% da previsão do catálogo, isto é, 7.12 minutos, de modo que a troca da aresta ocorreu de forma prematura, ficando bem abaixo da vida estimativa de 29,7 minutos.

As irregularidades das faces dos materiais podem ser consideradas como um importante fator que contribuiu para a ocorrência das quebras das arestas, devido ao impacto sofrido pelo contato da ferramenta no material ao longo da usinagem, sendo ainda mais crítico nos materiais de diâmetros maiores.

A Tabela 4 apresenta todos os dados obtidos nos ensaios em que ocorreram quebra da aresta de corte. Ao se observar a coluna 2 referente ao material, nota-se que o aço 4140 foi o único material usinado. Em análise da geometria das peças torneadas, observa-se que em todos os casos existiam operação de faceamento.

TABELA 4 – DADOS OBTIDOS DAS ARESTAS COM QUEBRA.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS									REAL			CATÁLOGO		
Código	Material	t _{st} Atual [min]	t _{st} Anterior [min]	t _{st} Diferença [min]	Z _{dot} [Pcs]	t _{ci} [min]	t _{dot} [min]	Ti [min]	PT _{ci} [%]	PT _e [%]	N _e [Unidade]	PT _{ci} [%]	PT _e [%]	N _e [Unidade]
QA	4140	3,0	9,0	6,0	2	2,2	6,7	4,4	150%	150%	1	15%	15%	1
QB	4140	3,0	9,0	6,0	2	3,2	9,6	6,4	150%	150%	2	21%	36%	
QC	4140	3,0	6,0	3,0	4	1,1	3,3	6,5	51%	51%	3	15%	51%	
QD	4140	3,0	6,0	3,0	2	1,1	3,2	6,5	48%	99%	3	7%	58%	
QE	4140	3,0	6,0	3,0	3	1,1	3,2	4,8	66%	66%	4	11%	69%	
QF	4140	3,0	6,0	3,0	1	1,7	5,0	4,8	103%	169%	4	6%	74%	
QG	4140	3,0	9,0	6,0	3	3,5	10,5	14,8	71%	71%	5	35%	110%	
QH	4140	3,0	6,0	3,0	3	1,4	4,3	14,8	29%	100%	5	14%	14%	2
QI	4140	3,0	6,0	3,0	1	3,3	9,8	5,3	184%	184%	6	11%	25%	
QJ	4140	3,0	6,0	3,0	1	2,0	6,1	5,3	115%	299%	6	7%	32%	
QK	4140	3,0	6,0	3,0	2	2,7	8,0	8,1	99%	99%	7	18%	50%	
QL	4140	3,0	6,0	3,0	2	1,4	4,1	8,1	51%	149%	7	9%	59%	
QM	4140	3,0	9,0	6,0	2	3,1	9,4	8,3	113%	113%	8	21%	80%	
QN	4140	3,0	6,0	3,0	2	1,0	3,0	8,3	36%	149%	8	7%	87%	
QO	4140	3,0	6,0	3,0	4	1,3	4,0	10,2	39%	39%	9	18%	105%	3
QP	4140	3,0	6,0	3,0	4	1,3	3,8	10,2	37%	76%	9	17%	35%	
QQ	4140	3,0	6,0	3,0	4	2,0	6,0	8,0	75%	75%	10	27%	62%	
QR	4140	3,0	9,0	6,0	2	2,2	6,7	4,4	150%	150%	11	15%	77%	
QS	4140	3,0	6,0	3,0	4	1,1	3,3	5,5	60%	60%	12	15%	91%	
QT	4140	3,0	6,0	3,0	1	1,1	3,2	5,5	57%	117%	12	4%	95%	
QU	4140	3,0	6,0	3,0	3	1,1	3,2	4,8	66%	66%	13	11%	11%	
QV	4140	3,0	6,0	3,0	1	1,7	5,0	4,8	103%	169%	13	6%	16%	3,38
QW	4140	3,0	6,0	3,0	1	2,4	7,3	8,9	81%	81%	14	8%	24%	
QX	4140	3,0	9,0	6,0	3	2,0	6,0	8,9	67%	149%	14	20%	45%	
QY	4140	3,0	6,0	3,0	1	0,5	1,5	8,9	17%	166%	14	2%	46%	

Em análise da ocorrência das quebras das arestas de corte, em que prevaleceu a usinagem unicamente com o aço 4140, foi realizado um levantamento com a finalidade de observar qual foi o comportamento deste mesmo aço nos ensaios em que ocorreram desgastes das arestas de corte.

O Quadro 4 mostra que o aço 4140 teve uma participação bastante ativa, em que foram usinados 79 lotes, totalizando 201 peças, num tempo total de 268,7 minutos, bem superior a condição de quebra.

QUEBRAS			
	Nº Lotes	Pçs Usinadas	Tempo Total
	[Unidade]	[Unidade]	[Minutos]
4140	25	58	100,4
DESGASTES			
	Nº Lotes	Pçs Usinadas	Tempo Total
	[Unidade]	[Unidade]	[Minutos]
4140	79	201	268,7

QUADRO 4 – DESEMPENHO DO AÇO 4140 – QUEBRA E DESGASTE DA ARESTA DE CORTE

Ainda analisando o desempenho do aço 4140, uma vez que participou na condição de quebra e de desgaste. A seguir é apresentado o Quadro 5, em que mostra de forma resumida, a participação dos três aços utilizados nos ensaios, em que fica claro que o aço 4140 teve a uma participação superior aos demais, tanto no número de lotes usinados, quanto no número de peças torneadas e tempo de usinagem.

QUEBRAS			
	Nº Lotes	Pçs Usinadas	Tempo Total
	[Unidade]	[Unidade]	[Minutos]
4140	25	58	100,4
DESGASTES			
	Nº Lotes	Pçs Usinadas	Tempo Total
	[Unidade]	[Unidade]	[Minutos]
4140	79	201	268,7
4340	27	54	76,8
6150	43	254	205,3

QUADRO 5 – COMPARATIVO ENTRE OS MATERIAIS – QUEBRAS X DESGASTES

A composição química foi outro fator de análise, por meio do Quadro 6, foi observado os elementos que compõem os materiais utilizados nos ensaios e os percentuais de cada elemento, a análise consistiu em identificar os elementos químico que pudessem responder a questão das quebras das arestas de corte ocorridas somente nos casos em que envolveram o aço 4140.

SAE	C	Mn	P	S	Si	Pb	Ni	Cr	Mo	V
4140	0,38/0,43	0,75/1,00	0,035 máx	0,035 máx	0,15/0,35			0,80/1,10	0,15/0,25	
4340	0,38/0,43	0,60/0,80	0,035 máx	0,035 máx	0,15/0,35		1,65/2,00	0,70/0,90	0,20/0,30	
6150	0,48/0,53	0,70/0,90	0,035 máx	0,035 máx	0,15/0,35			0,80/1,10		0,15 min

QUADRO 6 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

(THOMPSON STEEL COMPANIES, 2010).

Pode-se perceber a existência de três elementos ligados diretamente a resistência a tração, o manganês, o níquel e o cromo. O aço 4140 possui dois destes elementos, o manganês e o cromo (FERROS & AÇOS II-10, 2010).

De forma que para cada 1% de manganês adicionado a sua composição química a resistência à tração é aumentada em 100 MPa e o cromo, para cada

1% adicionado, a sua resistência à tração é aumentada em 80 MPa (*THOMPSON STEEL COMPANIES, 2010*).

Na análise da composição química, foi evidenciado apenas que o aço 4140, possui um maior percentual dos elementos que atuam na resistência a tração, não sendo possível vincular este fator como sendo a causa das quebras das arestas de corte.

Por outro lado, foi evidenciado que a irregularidade na face dos materiais foi à principal causa que está diretamente relacionada às quebras das arestas de corte, provocada pela operação de corte interrompido, no momento em que a aresta de corte realiza o contato com a face irregular do material, o impacto ocasionado pelo contato gerou as quebras.

O outro grupo como foi mencionado anteriormente, se refere aos insertos que foram substituídos quando atingiram o desgaste extremo, isto é, atingiu o fim de vida da aresta de corte.

A Tabela 5 apresenta um resumo geral dos ensaios, em que foram usinados 149 lotes de peças, num total de 509 peças, sendo consumidas 28 arestas de corte, onde a previsão do catálogo estabelece a utilização de 18,54 arestas de corte.

TABELA 5 - RESUMO DAS ARESTAS COM DESGASTE.

RESUMO					
DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS PRÁTICOS				CATÁLOGO	MÉDIA
Quantidade de Lotes	Peças Usinadas	Tempo Total	Arestas Consumidas	Previsão de Consumo	Vida por Aresta
[Unidade]	[Unidade]	[Minutos]	[Unidade]	[Unidade]	%
149	509	550,8	28	18,54	66,2

Realizando o cálculo da média do consumo das arestas de corte nos ensaios, dividido pelo número de arestas consumidas nos ensaios (28 arestas) pelo valor previsto pelo catálogo (18,54 arestas), obtêm-se uma média de 66,2%, sendo 33,8 % inferior ao estimado pelo catálogo.

Pode-se concluir que para este cenário de manufatura flexível, também não foi possível atingir a previsão do catálogo devido às adversidades existentes no

processo, devido às irregularidades existentes nos materiais, nos quais a usinagem era iniciada em materiais em bruto, sendo ainda mais crítica pelas condições das faces dos materiais com irregularidades nas faces, onde a usinagem pode ser classificada como de corte interrompido, além do que foi utilizada a mesma ferramenta para usinar em diferentes trajetórias de usinagem.

Pela análise dos dois extremos obtidos nos resultados dos ensaios realizados, mostrados na Tabela 6 verifica-se que a aresta de número 6 ultrapassou a estimativa de vida do catálogo de 29,7 minutos, alcançando 40,1 minutos (coluna 9) de vida e o outro valor em que a aresta de corte de número 16, atingiu apenas 5,9 minutos (coluna 9) da vida da aresta de corte prevista, ficando bem inferior a estimada, conforme mostra a Tabela 6.

TABELA 6 – ARESTA DE CORTE COM VIDA SUPERIOR A ESTIMADA PELO CATÁLOGO E VIDA COM DESGASTE PREMATURO.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS									REAL		
Código	Material	t _{st} Atual [min]	t _{st} Anterior [min]	t _{st} Diferença [min]	Z _{let} [Pcs]	t _{ci} [min]	t _{clet} [min]	T _i [min]	PT _{st} [%]	PT _i [%]	N _i [Unidade]
AA	4140	3,0	6,0	3,0	2	0,9	1,7	40,1	4%	4%	6
AB	4140	3,0	6,0	3,0	2	0,9	1,7		4%	9%	
AC	4140	3,0	6,0	3,0	4	0,5	1,9		5%	13%	
AD	4140	3,0	6,0	3,0	4	1,1	4,3		11%	24%	
AE	6150	3,0	6,0	3,0	1	0,6	0,6		2%	26%	
AF	6150	3,0	6,0	3,0	2	1,4	2,7		7%	32%	
AG	6150	3,0	6,0	3,0	3	2,1	6,4		16%	48%	
AH	4140	3,0	6,0	3,0	1	1,9	1,9		5%	53%	
AI	6150	3,0	9,0	6,0	4	4,0	16,0		40%	93%	
AJ	6150	3,0	6,0	3,0	5	0,6	2,9		7%	100%	
CM	6150	3,0	6,0	3,0	2	1,8	3,7	5,9	62%	62%	16
CN	4340	3,0	6,0	3,0	4	0,3	1,0		17%	79%	
CO	4340	3,0	6,0	3,0	1	1,3	1,3		21%	100%	

A aresta 6 que obteve uma vida superior à prevista pelo catálogo, na análise realizada observou-se a geometria do material a ser usinado, a quantidade de material removido e a trajetória da ferramenta, incluindo ainda as operações de usinagem realizadas com base no desenho das peças e os programas CNC, dos lotes de materiais apresentados na Tabela 7.

TABELA 7 - VIDA SUPERIOR À PREVISTA PELO CATÁLOGO

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS									REAL		
Código	Material	t _{st} Atual [min]	t _{st} Anterior [min]	t _{st} Diferença [min]	Z _{lot} [Pcs]	t _{ci} [min]	t _{clot} [min]	T _i [min]	PT _{ai} [%]	PT _a [%]	N _i [Unidade]
AA	4140	3,0	6,0	3,0	2	0,9	1,7	40,1	4%	4%	6
AB	4140	3,0	6,0	3,0	2	0,9	1,7		4%	9%	
AC	4140	3,0	6,0	3,0	4	0,5	1,9		5%	13%	
AD	4140	3,0	6,0	3,0	4	1,1	4,3		11%	24%	
AE	6150	3,0	6,0	3,0	1	0,6	0,6		2%	26%	
AF	6150	3,0	6,0	3,0	2	1,4	2,7		7%	32%	
AG	6150	3,0	6,0	3,0	3	2,1	6,4		16%	48%	
AH	4140	3,0	6,0	3,0	1	1,9	1,9		5%	53%	
AI	6150	3,0	9,0	6,0	4	4,0	16,0		40%	93%	
AJ	6150	3,0	6,0	3,0	5	0,6	2,9		7%	100%	

Observou-se que os lotes “AA, AB, AC, AD, AE e AJ”, são produtos de mesma família, apesar de variar o tipo de aço em decorrência da aplicação do produto. Os materiais utilizados variaram de diâmetros entre 44,45 mm (1” ¾) e 50,8 (2”), necessitando de pouca remoção de material nas coordenadas “X e Y”, como demonstrado na Figura 7.

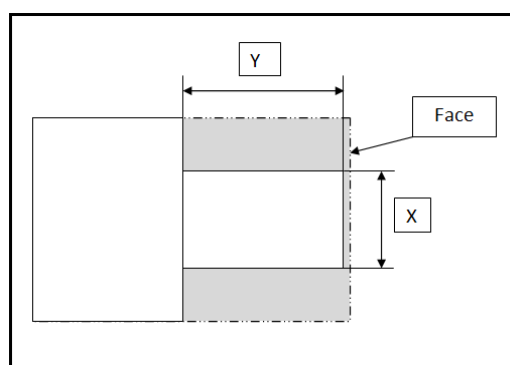


FIGURA 7 – GEOMETRIA DOS LOTES “AA, AB, AC, AD, AE E AJ”

A trajetória realizada pela ferramenta envolvia a operação de faceamento, visando remover o mínimo necessário na face do material, variando o comprimento da coordenada “Y”, enquanto que o diâmetro “X”, requeria um volume maior de remoção de material. Trata-se de operações simples, com tempos reduzidos de usinagem, como pode ser observado pelos tempos que foram apontados na Tabela 7.

Os outros lotes “AF, AG e AH”, também da aresta 6, pertenciam a outra família de produtos, em que os aços variavam. Nesta família a geometria também era bastante simples, com o mínimo de remoção na face “X”, tendo-se uma maior remoção de material nos diâmetros externos “Y”. A Figura 8 mostra que foram torneados dois diâmetros e os materiais possuíam dimensões maiores tanto no diâmetro quanto no comprimento, gerando assim, um tempo maior de usinagem.

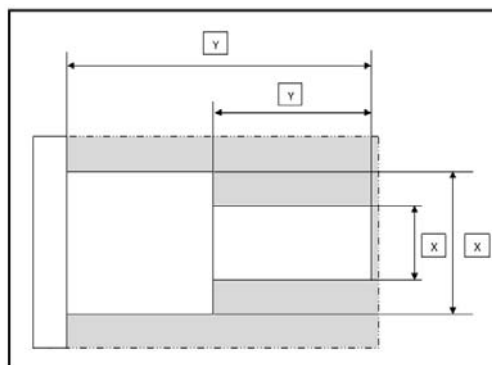


FIGURA 8 – GEOMETRIA DOS LOTES “AF, AG E AH”.

E finalmente o último lote da aresta 6, o lote “AI”, que difere das duas famílias mencionadas conforme mostra a Figura 9, sendo o que consumiu mais tempo para realizar a operação de usinagem, 4 minutos por peça, com 4 peças no lote, totalizando 16 minutos.

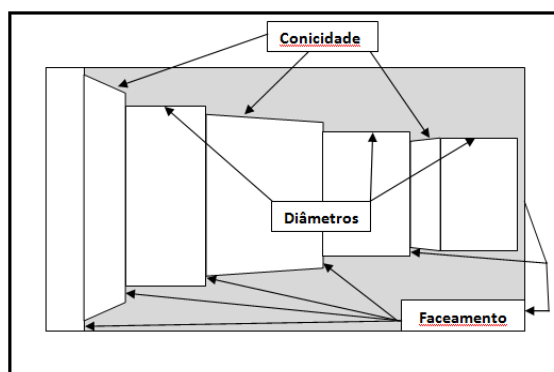


FIGURA 9 - GEOMETRIA DOS LOTES “AI”

Diferentemente dos outros lotes, este lote possui peças com uma geometria mais complexa, removendo-se pouco material na face irregular, mas sendo realizadas operações em ângulo e com algumas trajetórias que requerem pequenos faceamentos, sendo, o restante das operações de torneamento

externo. O tempo de usinagem foi bem superior aos demais em decorrência do comprimento e do diâmetro serem maiores do que das outras famílias.

Para este caso específico da aresta de número 6, em que a vida foi superior a dos demais ensaios, superando a previsão do catálogo, tem sua explicação na geometria das peças usinadas, neste caso não houve usinagens de mergulho, e pouquíssima usinagem de faceamento, com mínima remoção de material, sendo quase a totalidade das usinagens voltadas apenas para torneamento do diâmetro externo.

Foi feita a análise da aresta de corte de número 16 que atingiu a menor vida entre todos os ensaios realizados, conforme mostrado na Tabela 8, a vida da aresta de corte resistiu apenas 5,9 minutos. Na análise foram observadas as geometrias dos materiais e peças usinadas, a quantidade de material removido e a trajetória da ferramenta, incluindo-se ainda, quais operações de usinagem foram realizadas com base no desenho das peças e os programas CNC.

TABELA 8 – DESGASTE PREMATURO DA ARESTA DE CORTE

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS									REAL		
Código	Material	t _{st} Atual [min]	t _{st} Anterior [min]	t _{st} Diferença [min]	Z _{lot} [Pçs]	t _{ci} [min]	t _{clot} [min]	T _i [min]	PT _{ai} [%]	PT _a [%]	N _i [Unidade]
CM	6150	3,0	6,0	3,0	2	1,8	3,7	5,9	62%	62%	16
CN	4340	3,0	6,0	3,0	4	0,3	1,0		17%	79%	
CO	4340	3,0	6,0	3,0	1	1,3	1,3		21%	100%	

Os lotes de materiais “CM e CO” pertencem a mesma família de produtos, as geometrias requerem diferentes operações de usinagem, sendo elas: faceamento, diâmetro externo paralelo e mergulho.

A ferramenta atuou em diferentes tipos de operações de usinagem, de forma que foram necessárias operações de mergulho em dois momentos, como mostra a Figura 10, sendo esta a operação que mais exige da ferramenta, por ser uma operação que não trabalha com a condição frontal da aresta de corte e gera um esforço de corte acentuado.

A operação de faceamento foi realizada na condição de corte interrompido, motivado pela irregularidade da face do material, e finalmente usinou duas

faces com diâmetros externos paralelos, sendo esta a condição que menos exige esforço de corte da ferramenta.

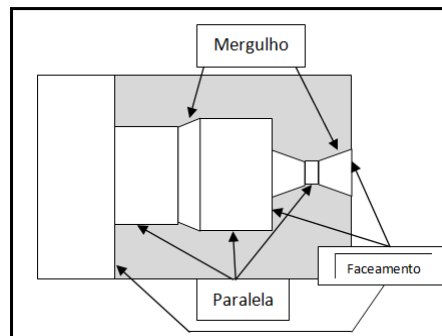


FIGURA 10 - GEOMETRIA DOS LOTES “CM E CO”

A Figura 11 apresenta a geometria do lote “CN”, em que foi necessário realizar diferentes operações de usinagem. Em comparação aos outros dois lotes, pode ser observada a exigência de um menor esforço de corte nas operações de torneamento do diâmetro externo e de mergulho, fato que pode ser constatado pelo volume de remoção de material e também pela geometria que apresenta uma menor complexidade.

Dos três tipos de operações de usinagem realizadas no lote “CN”, a operação de faceamento foi a que exigiu maior esforço de corte, por necessitar limpar toda a face do material, corrigindo as irregularidades, forçando a ferramenta a realizar operação de corte interrompido até que a face fosse totalmente normalizada.

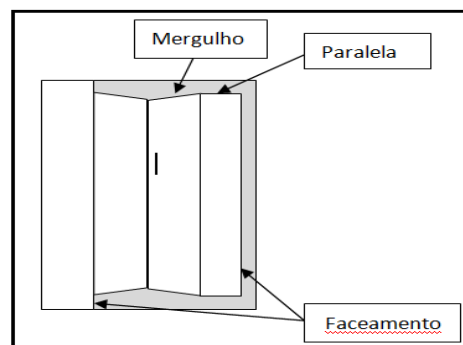


FIGURA 11 - GEOMETRIA DOS LOTES “CN”.

Ao realizar um cálculo da média de vida das 28 arestas utilizadas nos ensaios, foi obtido um valor da média geral da vida das arestas de 19,5 minutos, conforme mostrado no Quadro 7.

Arestas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Média Geral
Vida obtida nos ensaios [min.]	19,4	23,5	21,6	20,0	21,4	40,1	20,7	22,0	19,3	17,7	14,8	10,8	16,5	16,5	19.5 min.
Arestas	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
Vida obtida nos ensaios [min.]	21,9	5,9	12,8	15,0	16,5	22,5	15,4	18,3	20,2	20,2	24,6	23,8	23,8	20,9	

QUADRO 7 – MÉDIA DA VIDA DAS ARESTAS DE CORTE OBTIDAS NOS ENSAIOS.

A média geral representa a vida da aresta de corte dentro do cenário vivenciado.

Todos os ensaios foram realizados utilizando uma mesma ferramenta para tornear diferentes operações de usinagem, como comentado anteriormente. Foram realizadas operações de torneamento externo, faceamento e mergulho. No processo tradicional estas operações seriam realizadas por três ferramentas específicas para cada operação.

O modelo proposto apresenta a condição de utilizar uma mesma ferramenta em substituição das três utilizadas pelo método tradicional. O tempo de troca, preparação e *presetting* de ferramentas foram cronometrados em 3 minutos para realizar o setup de cada ferramenta.

Comparando os modelos, o Quadro 8 mostra que dos 149 lotes ensaiados, 125 lotes utilizariam duas ferramentas, se fosse adotado o método tradicional, seria preciso uma ferramenta para operação de faceamento e outra para a operação de torneamento externo ou de mergulho, e os 24 lotes restantes realizariam três tipos de operações de usinagem, necessitando portanto, de três ferramentas, como ressalva, vale dizer que todos os 149 lotes possuíam operação de faceamento.

	Modelo Proposto	Modelo Tradicional	
Trocas/Lote	1	2	3
	[Unidade]	[Unidade]	[Unidade]
Nº Lotes	149	125	24
Total de Lotes	149	149	

QUADRO 8 – COMPARATIVO DO NÚMERO DE TROCA DAS FERRAMENTAS DE CADA MODELO.

Na análise dos tempos para realizar o setup de ferramenta, numa comparação entre o modelo proposto e o método tradicional, observou-se uma redução de tempo passivo, com uma redução do número de troca de ferramentas.

O resumo apresentado no Quadro 9, mostra o modelo proposto, em que a operação de usinagem foi otimizada utilizando um mesmo suporte de ferramenta para usinar 149 lotes. A otimização foi obtida por meio da redução do número de trocas realizadas, em que o tempo foi estimado em 3 minutos, num tempo total de 447 minutos, para todos os lotes.

No método tradicional seria necessário realizar duas trocas de ferramentas para 125 lotes dos 149 ensaiados, para fazer as duas trocas foram estimados em 6 minutos para cada um dos lotes, gerando um total de 750 minutos. Os demais 24 lotes necessitariam de três trocas de ferramentas, isto é, 9 minutos para cada lote, perfazendo 216 minutos. O Quadro 9 mostra a soma dos tempos das trocas dos 149 lotes, 966 minutos para o modelo tradicional contra 447 minutos do modelo proposto, apresentando uma redução de 53,72 % entre os modelos.

	Modelo Proposto	Modelo Tradicional	
TEMPO TOTAL DAS TROCAS			
Tempo Troca	3	6	9
	[Minutos]	[Minutos]	[Minutos]
	447	750	216
Tempo Total	447	966	

QUADRO 9 – COMPARATIVO DOS TEMPOS DE TROCA DAS FERRAMENTAS DE CADA MODELO.

Outro fator analisado foi o número de trocas necessárias nos dois modelos, como mostra o Quadro 10. O modelo tradicional previu 322 trocas para a totalidade dos lotes, sendo 250 trocas para os lotes que possuíam duas operações e 72 trocas para os lotes que utilizavam três operações, o modelo proposto necessitou apenas de 149 trocas, independentes do número de operações realizadas.

	Modelo Proposto	Modelo Tradicional	
QUANTIDADE DE TROCAS REALIZADAS			
Nº Ferramentas	1	2	3
	[Unidade]	[Unidade]	[Unidade]
Nº Lotes	149	125	24
Nº de Trocas	149	250	72
Total de Trocas	149	322	

QUADRO 10 – COMPARATIVO DA QUANTIDADE DE TROCA REALIZADA ENTRE OS MODELOS.

A utilização de uma mesma ferramenta se mostrou extremamente vantajosa para o cenário de manufatura flexível em que foram usinados 149 lotes. O uso da mesma ferramenta para realizar diferentes operações de usinagem contribuiu para a redução do número de trocas de ferramentas, preparação e *presettings* realizados no *setup* de ferramentas e durante as operações de torneamento o tempo de usinagem também foi reduzido, uma vez que a mesma ferramenta realiza diferentes operações de usinagem, evitando-se a troca de ferramenta durante o ciclo de usinagem.

Os dados obtidos nos ensaios foram todos lançados na Tabela 9 que contém todas as informações na íntegra, as quais foram utilizadas para criar os quadros e tabelas ao longo do trabalho, tendo sido separada em três blocos.

O primeiro bloco vai da coluna 1 a 9, especifica as informações sobre o material utilizado pertencente a cada lote de peças, a quantidade de peças existente em cada lote, contendo também os dados obtidos nos ensaios, detalhando os tempos necessários para a realização do *setup* da ferramenta e os tempos de usinagem por peça e por lote.

O segundo bloco que abrange as colunas 10, 11 e 12, se refere aos percentuais reais obtidos nos ensaios realizados em chão de fábrica. Na coluna 10 aponta-se o percentual consumido da vida da aresta utilizado para usinar cada lote de peça. Já a coluna 11, soma os percentuais de todos os lotes que foram usinados com a mesma aresta, isso é, a somatória em percentual da vida da aresta de corte e a coluna 12 indica a quantidade de arestas que foram consumidas ao longo dos ensaios.

O terceiro bloco das colunas de 13 a 15 realizam a mesma função do segundo bloco, com a diferença de utilizar como base as informações e previsões do catálogo do fabricante de ferramentas, que estima o percentual de vida da aresta de corte, segundo o critério do catálogo.

TABELA 9 – DADOS OBTIDOS DAS ARESTAS COM DESGASTE.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS									REAL		CATÁLOGO			
Código	Material	t _{st} Atual	t _{st} Anterior	t _{st} Diferença	Z _{lot}	t _{ci}	t _c lot	T _i	PT _{ai}	PT _a	N _t	PT _{ai}	PT _a	N _t
		[min]	[min]	[min]	[Pçs]	[min]	[min]	[min]	[%]	[%]	[Unidade]	[%]	[%]	[Unidade]
A	4340	3,0	6,0	3,0	4	1,8	7,1	19,4	37%	37%	1	24%	24%	1
B	6150	3,0	6,0	3,0	46	0,3	12,3	19,4	63%	100%		41%	65%	
C	6150	3,0	9,0	6,0	1	3,1	3,1	23,5	13%	13%		10%	76%	
D	6150	3,0	9,0	6,0	3	2,0	5,9	23,5	25%	38%	2	20%	96%	2
E	6150	3,0	6,0	3,0	10	1,2	12,2	23,5	52%	90%		41%	41%	
F	6150	3,0	6,0	3,0	1	0,7	0,7	23,5	3%	93%		2%	43%	
G	6150	3,0	6,0	3,0	1	1,7	1,7	23,5	7%	100%	3	6%	49%	2
H	4140	3,0	9,0	6,0	3	3,6	10,7	21,6	50%	50%		36%	85%	
I	4140	3,0	6,0	3,0	2	0,7	1,4	21,6	6%	56%		5%	90%	
J	4340	3,0	6,0	3,0	3	2,2	6,5	21,6	30%	86%	4	22%	112%	3
K	4140	3,0	6,0	3,0	1	1,0	1,0	21,6	5%	91%		3%	3%	
L	4140	3,0	6,0	3,0	2	1,0	2,0	21,6	9%	100%		7%	10%	
M	4140	3,0	6,0	3,0	1	1,0	1,0	20,0	5%	5%	5	3%	13%	4
N	6150	3,0	9,0	6,0	2	3,1	6,2	20,0	31%	36%		21%	34%	
O	4340	3,0	6,0	3,0	1	1,7	1,7	20,0	8%	45%		6%	40%	
P	4340	3,0	6,0	3,0	2	1,5	2,9	20,0	15%	59%	6	10%	50%	4
Q	4140	3,0	6,0	3,0	3	2,7	8,2	20,0	41%	100%		28%	77%	
R	6150	3,0	6,0	3,0	3	0,5	1,4	21,4	7%	7%		5%	82%	
S	4140	3,0	6,0	3,0	3	0,8	2,3	21,4	11%	17%	7	8%	90%	4
T	6150	3,0	6,0	3,0	3	0,7	2,1	21,4	10%	27%		7%	97%	
U	4140	3,0	6,0	3,0	3	1,4	4,1	21,4	19%	46%		14%	14%	
V	4140	3,0	6,0	3,0	1	1,8	1,8	21,4	8%	54%	8	6%	20%	4
W	4340	3,0	6,0	3,0	1	1,0	1,0	21,4	5%	58%		3%	23%	
X	4340	3,0	6,0	3,0	2	0,5	1,1	21,4	5%	63%		4%	26%	
Y	4140	3,0	6,0	3,0	1	2,1	2,1	21,4	10%	73%	9	7%	34%	4
Z	6150	3,0	6,0	3,0	4	1,4	5,7	21,4	26%	100%		19%	53%	
AA	4140	3,0	6,0	3,0	2	0,9	1,7	40,1	4%	4%		6%	59%	
AB	4140	3,0	6,0	3,0	2	0,9	1,7	40,1	4%	9%	10	6%	64%	4
AC	4140	3,0	6,0	3,0	4	0,5	1,9	40,1	5%	13%		6%	71%	
AD	4140	3,0	6,0	3,0	4	1,1	4,3	40,1	11%	24%		15%	85%	

Continua

Continuação														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS									REAL			CATÁLOGO		
Código	Material	t _{st} Atual	t _{st} Anterior	t _{st} Diferença	Z _{lot}	t _{ci}	t _{clot}	T _i	PT _{ai}	PT _a	N _t	PT _{ai}	PT _a	N _t
		[min]	[min]	[min]	[Pcs]	[min]	[min]	[min]	[%]	[%]	[Unidade]	[%]	[%]	[Unidade]
AE	6150	3,0	6,0	3,0	1	0,6	0,6	40,1	2%	26%	6	2%	87%	4
AF	6150	3,0	6,0	3,0	2	1,4	2,7	40,1	7%	32%		9%	97%	
AG	6150	3,0	6,0	3,0	3	2,1	6,4	40,1	16%	48%		21%	21%	5
AH	4140	3,0	6,0	3,0	1	1,9	1,9	40,1	5%	53%		6%	28%	
AI	6150	3,0	9,0	6,0	4	4,0	16,0	40,1	40%	93%		54%	81%	
AJ	6150	3,0	6,0	3,0	5	0,6	2,9	40,1	7%	100%		10%	91%	
AK	4140	3,0	6,0	3,0	1	1,3	1,3	20,7	6%	6%	7	4%	96%	6
AL	4140	3,0	6,0	3,0	2	0,5	1,0	20,7	5%	11%		3%	99%	
AM	4140	3,0	6,0	3,0	2	0,6	1,1	20,7	5%	16%		4%	4%	
NA	4140	3,0	6,0	3,0	5	0,3	1,5	20,7	7%	24%		5%	9%	
AO	4140	3,0	6,0	3,0	2	1,9	3,9	20,7	19%	42%		13%	22%	6
AP	4140	3,0	6,0	3,0	5	0,4	1,8	20,7	9%	51%		6%	28%	
AQ	6150	3,0	6,0	3,0	1	2,6	2,6	20,7	12%	64%		9%	37%	
AR	4140	3,0	6,0	3,0	2	1,8	3,5	20,7	17%	81%		12%	49%	
AS	4140	3,0	9,0	6,0	1	4,0	4,0	20,7	19%	100%	8	13%	62%	7
AT	4140	3,0	6,0	3,0	4	1,2	4,7	22,0	21%	21%		16%	78%	
AU	4140	3,0	6,0	3,0	4	0,4	1,7	22,0	8%	29%		6%	83%	
BA	6150	3,0	6,0	3,0	4	0,8	3,3	22,0	15%	44%		11%	95%	
BB	6150	3,0	6,0	3,0	4	0,8	3,3	22,0	15%	59%		11%	11%	7
BC	4140	3,0	6,0	3,0	4	0,4	1,5	22,0	7%	66%		5%	16%	
BD	4140	3,0	6,0	3,0	4	0,2	0,9	22,0	4%	70%		3%	19%	
BE	4140	3,0	6,0	3,0	2	0,7	1,3	22,0	6%	76%		4%	24%	
BF	4140	3,0	6,0	3,0	4	1,3	5,3	22,0	24%	100%	9	18%	42%	7
BG	4140	3,0	6,0	3,0	4	1,0	4,0	19,3	21%	21%		13%	55%	
BH	4140	3,0	6,0	3,0	4	0,9	3,7	19,3	19%	40%		12%	67%	
BI	4140	3,0	6,0	3,0	4	1,0	4,0	19,3	21%	60%		13%	81%	
BJ	4140	3,0	6,0	3,0	4	1,9	7,7	19,3	40%	100%	10	26%	107%	
BK	4140	3,0	6,0	3,0	3	1,7	5,0	17,7	28%	28%		17%	17%	8
BL	4140	3,0	9,0	6,0	4	3,2	12,7	17,7	72%	100%	11	43%	59%	
BM	4140	3,0	6,0	3,0	3	1,8	5,5	14,8	37%	37%		19%	78%	
BO	4140	3,0	6,0	3,0	4	1,3	5,0	14,8	34%	71%	12	17%	95%	
BP	4140	3,0	6,0	3,0	4	1,1	4,3	14,8	29%	100%		15%	109%	9
BQ	4340	3,0	6,0	3,0	2	2,2	4,4	10,8	41%	41%	13	15%	15%	
BR	4140	3,0	9,0	6,0	2	3,2	6,4	10,8	59%	100%		21%	36%	
BS	4140	3,0	6,0	3,0	6	1,8	11,0	16,5	67%	67%	14	37%	73%	
BT	6150	3,0	6,0	3,0	3	1,8	5,5	16,5	33%	100%		19%	92%	
BU	4340	3,0	6,0	3,0	1	0,9	0,9	17,8	5%	5%	14	3%	95%	9
BV	4140	3,0	6,0	3,0	1	0,3	0,3	17,8	2%	7%		1%	96%	
BW	4340	3,0	6,0	3,0	1	0,6	0,6	17,8	3%	10%		2%	98%	

Continua

Continuação

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS									REAL			CATÁLOGO		
Código	Material	t _{st} Atual	t _{st} Anterior	t _{st} Diferença	Z _{lot}	t _{ci}	t _{clot}	T _i	PT _{ai}	PT _a	N _t	PT _{ai}	PT _a	N _t
		[min]	[min]	[min]	[Pcs]	[min]	[min]	[min]	[%]	[%]	[Unidade]	[%]	[%]	[Unidade]
BX	4140	3,0	6,0	3,0	1	1,2	1,2	17,8	7%	16%	14	4%	4%	10
BY	4140	3,0	6,0	3,0	1	0,9	0,9	17,8	5%	21%		3%	7%	
BZ	6150	3,0	9,0	6,0	1	4,0	4,0	17,8	22%	44%		13%	20%	
CA	6150	3,0	6,0	3,0	1	0,6	0,6	17,8	3%	47%		2%	22%	
CB	4140	3,0	6,0	3,0	1	1,0	1,0	17,8	6%	53%		3%	26%	
CC	6150	3,0	6,0	3,0	3	0,8	2,5	17,8	14%	67%		8%	34%	
CD	4140	3,0	6,0	3,0	3	0,8	2,5	17,8	14%	81%		8%	43%	
CE	4140	3,0	6,0	3,0	2	1,7	3,3	17,8	19%	100%		11%	54%	
CF	4140	3,0	6,0	3,0	2	1,0	1,9	21,9	9%	9%	15	6%	60%	11
CH	6150	3,0	6,0	3,0	24	0,5	12,0	21,9	55%	63%		40%	101%	
CI	6150	3,0	6,0	3,0	2	1,8	3,7	21,9	17%	80%		12%	12%	
CJ	6150	3,0	6,0	3,0	1	1,6	1,6	21,9	7%	88%		5%	18%	
CK	4340	3,0	6,0	3,0	2	0,9	1,8	21,9	8%	96%		6%	24%	
CL	4140	3,0	6,0	3,0	1	0,9	0,9	21,9	4%	100%		3%	27%	
CM	6150	3,0	6,0	3,0	2	1,8	3,7	5,9	62%	62%	16	12%	39%	
CN	4340	3,0	6,0	3,0	4	0,3	1,0	5,9	17%	79%		3%	43%	
CO	4340	3,0	6,0	3,0	1	1,3	1,3	5,9	21%	100%	17	4%	47%	12
CP	4340	3,0	9,0	6,0	2	1,8	3,5	12,8	27%	27%		12%	59%	
CQ	4340	3,0	6,0	3,0	2	1,8	3,5	12,8	27%	55%		12%	70%	
CR	4340	3,0	6,0	3,0	2	1,9	3,8	12,8	30%	85%		13%	83%	
CS	4140	3,0	6,0	3,0	1	2,0	2,0	12,8	16%	100%	18	7%	90%	13
CT	4340	3,0	6,0	3,0	2	1,1	2,2	15,0	14%	14%		7%	97%	
CV	4340	3,0	9,0	6,0	2	3,3	6,7	15,0	44%	59%		22%	22%	
CW	4140	3,0	6,0	3,0	1	0,8	0,8	15,0	5%	64%		3%	25%	
CX	4340	3,0	6,0	3,0	2	1,1	2,2	15,0	14%	78%	19	7%	32%	14
CY	4340	3,0	6,0	3,0	2	1,6	3,3	15,0	22%	100%		11%	43%	
CZ	6150	3,0	9,0	6,0	2	5,8	11,5	16,5	70%	70%		39%	82%	
DA	6150	3,0	6,0	3,0	10	0,3	2,5	16,5	15%	85%		8%	90%	
DB	6150	3,0	6,0	3,0	10	0,3	2,5	16,5	15%	100%	20	8%	99%	15
DC	4140	3,0	9,0	6,0	1	5,0	5,0	22,5	22%	22%		17%	17%	
DD	4140	3,0	9,0	6,0	1	5,0	5,0	22,5	22%	44%		17%	34%	
DE	4140	3,0	9,0	6,0	1	3,0	3,0	22,5	13%	58%		10%	44%	
DF	4140	3,0	9,0	6,0	1	3,0	3,0	22,5	13%	71%	21	10%	54%	16
DG	4340	3,0	6,0	3,0	2	0,8	1,7	22,5	7%	79%		6%	59%	
DH	4340	3,0	9,0	6,0	1	2,4	2,4	22,5	11%	89%		8%	68%	
DI	4340	3,0	9,0	6,0	1	2,4	2,4	22,5	11%	100%		8%	76%	
DJ	4140	3,0	6,0	3,0	2	0,5	1,0	15,4	6%	6%	21	3%	79%	17
DK	4140	3,0	6,0	3,0	2	0,8	1,5	15,4	10%	16%		5%	84%	
DL	4140	3,0	6,0	3,0	1	3,2	3,2	15,4	21%	37%		11%	95%	

Continua

Continuação

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS									REAL			CATÁLOGO		
Código	Material	t _{st} Atual	t _{st} Anterior	t _{st} Diferença	Z _{lot}	t _{ci}	t _{clot}	T _i	PT _{ai}	PT _a	N _t	PT _{ai}	PT _a	N _t
		[min]	[min]	[min]	[Pcs]	[min]	[min]	[min]	[%]	[%]	[Unidade]	[%]	[%]	[Unidade]
DM	4140	3,0	9,0	6,0	1	3,8	3,8	15,4	24%	61%	21	13%	13%	14
DN	4140	3,0	6,0	3,0	3	2,0	6,0	15,4	39%	100%		20%	33%	
DO	4340	3,0	6,0	3,0	2	1,8	3,5	18,3	19%	19%	22	12%	45%	
DP	4140	3,0	6,0	3,0	2	2,0	4,0	18,3	22%	19%		13%	58%	
DQ	4140	3,0	6,0	3,0	2	1,2	2,3	18,3	13%	19%		8%	66%	
DR	4140	3,0	9,0	6,0	2	4,0	8,0	18,3	44%	19%		27%	93%	
DS	4140	3,0	6,0	3,0	1	0,5	0,5	18,3	3%	19%		2%	95%	
DT	4140	3,0	6,0	3,0	1	3,3	3,3	20,2	16%	16%	23	11%	11%	15
DU	4140	3,0	6,0	3,0	1	2,0	2,0	20,2	10%	26%		7%	18%	
DV	6150	3,0	6,0	3,0	2	2,7	5,3	20,2	26%	52%		18%	36%	
DW	4140	3,0	9,0	6,0	4	2,4	9,6	20,2	48%	100%		32%	68%	
DX	4340	3,0	9,0	6,0	3	2,0	6,0	23,5	26%	26%	24	20%	88%	
DY	4340	3,0	6,0	3,0	1	0,5	0,5	23,5	2%	28%		2%	90%	16
DZ	4140	3,0	6,0	3,0	2	1,8	3,5	23,5	15%	43%		12%	102%	
EA	4140	3,0	6,0	3,0	2	1,0	2,0	23,5	9%	51%		7%	7%	
EB	4140	3,0	6,0	3,0	2	1,6	3,2	23,5	13%	65%		11%	17%	
EC	4340	3,0	6,0	3,0	2	1,2	2,3	23,5	10%	74%		8%	25%	
ED	6150	3,0	6,0	3,0	5	0,3	1,3	23,5	6%	80%	25	4%	30%	
EF	6150	3,0	6,0	3,0	18	0,3	4,7	23,5	20%	100%		16%	45%	17
EG	6150	3,0	6,0	3,0	23	0,3	7,6	24,6	31%	31%		26%	71%	
EH	6150	3,0	6,0	3,0	1	0,7	0,7	24,6	3%	34%		2%	73%	
EI	6150	3,0	6,0	3,0	1	0,8	0,8	24,6	3%	37%		3%	76%	
EJ	4140	3,0	6,0	3,0	2	1,0	1,9	24,6	8%	45%		6%	82%	
EK	4140	3,0	6,0	3,0	6	1,0	5,8	24,6	23%	68%		19%	102%	18
EL	4140	3,0	6,0	3,0	8	0,6	4,4	24,6	18%	86%		15%	15%	
EM	6150	3,0	6,0	3,0	1	1,0	1,0	24,6	4%	90%	26	3%	18%	
EM	6150	3,0	9,0	6,0	1	2,4	2,4	24,6	10%	100%		8%	26%	
EO	4340	3,0	6,0	3,0	4	0,7	2,6	23,8	11%	11%		9%	35%	
EP	4140	3,0	6,0	3,0	4	0,7	2,6	23,8	11%	22%		9%	44%	
EQ	4140	3,0	9,0	6,0	3	1,6	4,7	23,8	20%	42%	27	16%	60%	
ER	6150	3,0	6,0	3,0	10	1,4	13,8	23,8	58%	100%		46%	106%	19
ES	6150	3,0	6,0	3,0	10	1,1	11,0	23,8	46%	46%		37%	37%	
ET	6150	3,0	6,0	3,0	10	0,4	4,0	23,8	17%	63%		13%	67%	
EU	6150	3,0	6,0	3,0	10	0,9	8,8	23,8	37%	100%	28	30%	72%	
EV	6150	3,0	6,0	3,0	1	1,7	1,7	20,9	8%	8%		6%	83%	20
EW	6150	3,0	6,0	3,0	4	0,8	3,2	20,9	15%	23%		11%	98%	
EX	4140	3,0	6,0	3,0	3	1,5	4,4	20,9	21%	44%		15%	15%	0,54

Continua

Continuação

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS									REAL			CATÁLOGO		
Código	Material	$t_{st \text{ Atual}}$	$t_{st \text{ Anterior}}$	$t_{st \text{ Diferença}}$	Z_{lot}	t_{ci}	t_{clot}	T_i	PT_{ai}	PT_a	N_t	PT_{ai}	PT_a	N_t
		[min]	[min]	[min]	[Pçs]	[min]	[min]	[min]	[%]	[%]	[Unidade]	[%]	[%]	[Unidade]
EY	4140	3,0	6,0	3,0	3	0,3	1,0	20,9	5%	49%	28	3%	18%	0,54
EZ	4140	3,0	6,0	3,0	3	0,8	2,5	20,9	12%	61%		8%	26%	
FA	4140	3,0	6,0	3,0	3	1,8	5,5	20,9	26%	87%		18%	45%	
FB	4140	3,0	6,0	3,0	3	0,9	2,8	20,9	13%	100%		9%	54%	

Onde:

$t_{st \text{ Atual}}$ - tempo utilizado para troca de ferramenta no modelo proposto, em que utiliza apenas uma ferramenta;

$t_{st \text{ Anterior}}$ - tempo para a troca das ferramentas utilizado no modelo tradicional, em que se utiliza entre duas ou três ferramentas;

$t_{st \text{ Diferença}}$ - é o resultado da subtração entre os tempos consumidos dos dois modelos para realizar as trocas das ferramentas.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- foram aplicados os parâmetros de corte selecionados do catálogo, de modo que a v_c fosse adequada e dentro da faixa especificada entre máxima e mínima sugerida pelo catálogo, para tal aplicação. O valor recalculado da v_c visou obedecer a limitação da máquina que possuía velocidade máxima de 3000 rpm e usinar materiais com diâmetros acima de 30 mm, no que resultou no valor de 280 m/min;
- percebeu-se que não existe proporcionalidade entre a velocidade de corte e a vida da ferramenta, ambas definidas a partir do catálogo do fabricante. A variação da v_c de 325 m/min para 280 m/min, isto é, para uma variação percentual de 14%, obteve-se por cálculo uma variação na vida da ferramenta de 49,5 %.
- as vidas das arestas de corte utilizadas nos ensaios em que houve quebra, foram extremamente inferiores a previsão do catálogo. Isto se deve principalmente as condições irregulares encontradas nas faces dos materiais em que foram realizados os ensaios. As operações de faceamento foram realizadas na condição de corte interrompido, fazendo com que a aresta sofresse impacto durante a usinagem, ocasionando a quebra das arestas de corte. A vida prevista da aresta era de 29,7 minutos e foi obtida uma vida média de 7,12 minutos;
- foi utilizada uma mesma ferramenta para realizar o torneamento de desbaste de diferentes tipos de aços em um cenário de manufatura flexível. Os lotes foram extremamente reduzidos, unitários em muitos casos, as geometrias das peças variaram de lote para lote. A ferramenta selecionada por meio do catálogo do fabricante de ferramentas realizou diferentes operações de usinagem, como: torneamento externo, de mergulho e faceamento. Em vários momentos trabalhou-se em condições

severas de usinagem, usinando na condição de corte interrompido devido as condições irregulares da face dos materiais;

➤ a principal vantagem obtida na utilização de uma mesma aresta de corte para o cenário de manufatura flexível foi a redução do número de trocas de ferramenta, preparação e *presettings* realizados no *setup* da máquina. Nos 149 ensaios realizados, foram necessárias 149 trocas no modelo proposto, consumindo 447 minutos, contra 322 trocas que seriam necessárias no modelo tradicional, que consumiriam 966 minutos, gerando automaticamente uma redução no tempo de processo de usinagem, e aumento da produtividade;

➤ a principal desvantagem observada na utilização de uma mesma aresta de corte foi a diferença entre a vida média de 19,5 minutos e a vida estimada pelo catálogo do fabricante de ferramentas de 29,7 minutos. A diferença da vida da aresta de corte em relação à estimada pelo catálogo foi atribuída às influências sofridas pelas condições irregulares encontradas nas faces dos materiais, além da variação dos tipos de aços e das geometrias. O cenário vivenciado foi considerado verdadeiramente flexível em função da diversidade de materiais, geometrias, tamanho dos lotes e diferentes operações de usinagem;

➤ com a otimização das operações de usinagem, o número de ferramentas participantes do ciclo de usinagem foi reduzido, de 3 para 1 em alguns casos, o que possibilitou uma redução do número de ferramentas em estoque.

Pode-se concluir que os objetivos foram alcançados. Os resultados apresentados neste trabalho mostram que a utilização de uma mesma ferramenta possibilita a otimização do tempo de preparação de *setup* de máquina, além da redução do ciclo de usinagem do material, principalmente por se tratar de um cenário de manufatura flexível, em que existe a necessidade da realização de diversos *setups* ao longo da jornada de trabalho, devido ao baixo número de peças por lote, incluindo ainda, todas as diversidades já comentadas anteriormente neste cenário.

5.1. SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

Ao se utilizar uma mesma ferramenta para realizar diferentes operações de usinagem, o número de trocas de ferramentas é reduzido, como foi demonstrado neste trabalho, contudo, existem outras atividades do processo que também podem contabilizar outros ganhos, como:

- tempo de elaboração do programa CNC;
- tempo de troca da ferramenta durante o ciclo de usinagem, em função da utilização de uma única ferramenta;
- redução dos itens em estoque (ferramentas, suportes e consumíveis).

Em trabalhos futuros, o controle de tais variáveis podem se somar às vantagens já obtidas e, o modelo proposto pode apresentar ainda mais vantagens em alguns casos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB SANDVIK COROMANT, **Metalcutting Technical Guide**, Sweden, 2008.

AL-AHMARI, A. M. A. Predictive machinability models for a selected hard material in turning operations, **Journal of Materials Processing Technology**, v 190, p. 305–311, 2007.

BAPTISTA, E. A, Desenvolvimento de um sistema especialista para a otimização do processo de usinagem baseado na web. Tese de Doutorado em Engenharia da Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, 2004.

BAPTISTA, E. A.; COPPINI, N. L. Maximizando o lucro: Otimizando processos de usinagem com auxílio de sistemas especialistas, **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 2001.

BAPTISTA, E. A.; COPPINI, N. L. Otimização de processo de usinagem: uma abordagem para sistemas de fabricação flexível que foi implementada em um sistema baseado na web. In.: **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Cobef 4, 2006.

BAPTISTA, E. A.; COPPINI, N. L. Apresentando as características do MOS II – Sistema de apoio operacional aplicado na otimização de processos de usinagem, **VIII Congresso Ibero Americano de Engenharia Mecânica**, Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007.

BAPTISTA, E. A.; OLIVEIRA, A.; COPPINI, N. L. Environment of flexible machining - tests on the shop floor in order to minimize setup times, **2nd International Conference on Engineering Optimization**, Lisbon, Portugal, 2010.

BOUZAKIS, K. D.; GERARDIS, S.; KATIRTZOGLU, G. MAKRIMALLAKIS, S.; MICHAELIDIS, N; LILI, E. Increasing tool life by adjusting the milling cutting

conditions according to PVD films' properties, **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, p. 105–108, 2008.

BOUZAKIS, K. D.; GERARDIS, S.; KATIRTZOGLU, G. MAKRIMALLAKIS, S.; BOUZAKIS, A.; CREMER, R.; FUSS, H. G. Application in milling of coated tools with rounded cutting edges after the film deposition, **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, p. 61–64, 2009.

CHEN, L; EL-WARDANY, T.; NASR, M.; ELBESTAWI, M. A. Effects of Edge Preparation and Feed when Hard Turning a Hot Work Die Steel with Polycrystalline Cubic Boron Nitride Tools, **Annals of the CIRP**, v. 55, 2006.

CHEUNG, F. Y.; ZHOU, Z. F.; GEDDAM, A.; Li, K. Y. Cutting edge preparation using magnetic polishing and its influence on the performance of high-speed steel drills, **journal of materials processing technology**, v. 208, p. 196–204, 2008.

CLAUDIN, C.; RECH, J. Development of a new rapid characterization method of hob's wear resistance in gear manufacturing. Application to the evaluation of various cutting edge preparations in high speed dry gear hobbing, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 5152–5160, 2009.

COELHO, R. T.; NG, E.; ELBESTAWI, M. A. Tool wear when turning hardened AISI 4340 with coated PCBN tools using finishing cutting conditions, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v 47, p 263–272, 2007.

COPPINI, N. L.; BAPTISTA, E. A. Alternativas de otimização dos parâmetros de corte para cenários de fabricação em usinagem. In.: **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Niterói, Rio de Janeiro, v. 18, 1998.

COPPINI, N. L.; MALAQUIAS, J. C. Gerenciamento em Usinagem – Proposta para cenário de fabricação flexível. In.: **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Niterói, Rio de Janeiro, v. 18, 1998.

COPPINI, N. L.; BAPTISTA, E. A. RIBEIRO, J. R.; MIRANDA, G. W. A. Procedimento para otimização das condições de usinagem para aplicação em

chão de fábrica, In: 3rd Internacional Congress of. Industrial Engineering an ENEGEP'97 - **17th National Congress of Production Engineering**, UFRS/ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Gramado, 1997.

COPPINI, N. L.; MALAQUIAS, J. C.; MARCONDES; F. C. Otimização em usinagem – uma visão geral. **V Congresso de Engenharia Mecânica** – Norte Nordeste, UFPB, João Pessoa, p. 27-30, 1998.

COUGHLAN, P.; COGHLAN, D. Action Research for Operations Management, **International Journal of Operations & Production Management**, Dublin, v. 22, n. 2, p. 220-240, 2002.

DAVIM, J. P.; GAITONDE, V. N.; KAMIK, S. R. Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models, **journal of materials processing technology**, v. 205, p. 16–23, 2008.

DAS, K.; BAKI, M. F.; Li, X. Optimization of operation and changeover time for production planning and scheduling in a flexible manufacturing system, **Computers & Industrial Engineering**, v. 56, p. 283–293, 2009.

DEMO, P. **Pesquisa e informação qualitativa**. Campinas: Papirus. 2001. p. 17.

DINIZ, A. E.; COPPINI, N. L.; MARCONDES, F. C. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 5 ed., São Paulo: Artliber, p. 106-107, 2006.

EE, K. C.; LI, P. X.; BALAJI, A. K.; JAWAHIR, I. S.; STEVENSON, R. Performance based predictive models and optimization methods for turning operations and applications: Part 1—tool wear/tool life in turning with coated grooved tools, **Journal of Manufacturing Processes**, v. 8: n. 1, p. 54-66, 2006.

FANG, N.; WU, Q. A comparative study of the cutting forces in high speed machining of Ti–6Al–4V and Inconel 718 with a round cutting edge tool, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209: p. 4385–4389, 2009.

FAVARO, J. N.; COPPINI, N. L. O Gerenciamento da Otimização das Condições de Usinagem em Célula Flexível – Uma Ferramenta para a Manufatura Enxuta, **IV mostra Acadêmica UNIMEP**, 2006.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1995.

FERROS & AÇOS II-10. In: MSPC – Informações Técnicas. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/ciemat/aco210.shtml>>. Acesso em 30 de maio de 2010.

FRANCO, P.; ESTREMS, M.; FAURA, F. A study of back cutting surface finish from tool errors and machine tool deviations during face milling, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 48: p. 112–123, 2008.

GIL, A. C. **Como elaborar projeto de pesquisa**, 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007. P. 43-46.

GUILHERME, N.; BAPTISTA, E. A.; BUSSAB, M. A.; COPPINI, N.L. Cutting process optimization in scenery of high flexibility, **International Conference on Engineering Optimization**, 1, Rio de Janeiro, Junho 2008.

HAMANI, N.; DANGOUMAU, N.; CRAYE, E. Verification and validation of a SSM model dedicated to mode handling of flexible manufacturing systems. **Computers in Industry**, v. 60, p. 77–85, 2009.

HUA, J.; UMBRELLO, D.; SHIVPURI, R. Investigation of cutting conditions and cutting edge preparations for enhanced compressive subsurface residual stress in the hard turning of bearing steel, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 171, p. 180–187, 2006.

ISIK, Y. Investigating the machinability of tool steels in turning operations, **Materials and Design**, v. 28, p. 1417–1424, 2007.

JAIN, M.; MAHESWARI, S, BAGHEL, K.P.S. Queueing network modelling of flexible manufacturing system using mean value analysis. **Applied Mathematical Modelling**, v. 32, p. 700–711, 2008.

JAWAHIR, I. S.; WANG, X. Development of hybrid predictive models and optimization techniques for machining operations, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 185, p. 46–59, 2007.

KALVODA, T.; HWANG, Y. R. A cutter tool monitoring in machining process using Hilbert–Huang transform, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 50: p. 495–501, 2010.

KARPAT, Y.; ÖZEL, T. Mechanics of high speed cutting with curvilinear edge tools, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 48, p. 195–208, 2008.

KONAK, A, KULTUREL-KONAK, S.; AZIZOGLU, M. Minimizing the number of tool switching instants in Flexible Manufacturing Systems. **International Journal Production Economics**, v. 116, p. 298–307, 2008.

KORKUT, I.; DONERTAS, M. A. The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool–chip contact length during face milling, **Materials and Design**, v. 28, p. 308–312, 2007.

KOUNTANYA, R.; AL-ZKERI, I.; ALTAN, T. Effect of tool edge geometry and cutting conditions on experimental and simulated chip morphology in orthogonal hard turning of 100Cr6 steel, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 5068–5076, 2009.

KUMAR, A. S.; DURAI, A. R.; SORNAKUMAR, T. The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 173, p. 151–156, 2006.

KUMAR, N. S.; SRIDHARAN, R. Simulation modeling and analysis of tool sharing and part scheduling decisions in single-stage multimachine flexible manufacturing systems. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 23, p. 361–370, 2007.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 4. Ed. São Paulo: Atlas. 2001.

MAHDAVI, I.; SHIRAZI, B.; SOLIMANPUR, M. Development of a simulation-based decision support system for controlling stochastic flexible job shop manufacturing systems. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 18, p. 768–786, 2010.

MANNA, A, SALODKA, S. Optimization of machining conditions for effective turning of E0300 alloy steel, **journal of materials processing technology**, v. 203, p. 147–153, 2008.

MORADI, H.; NEJAD, F. B.; MOVAHHEDY, M. R.; AHMADIAN, M. T. Nonlinear behaviour of the regenerative chatter in turning process with a worn tool: Forced oscillation and stability analysis, **Mechanism and Machine Theory**, v. 45, p. 1050–1066, 2010.

MORE, A. S.; JIANG, W.; BROWN, W. D.; MALSHE, A. P. Tool wear and machining performance of cBN–TiN coated carbide inserts and PCBN compact inserts in turning AISI 4340 hardened steel, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 180, p. 253–262, 2006.

MUKHERJEE, I.; RAY, P. K. A review of optimization techniques in metal cutting processes. **Computer and Industrial Engineering**, v. 50, p. 15–34, 2006.

NALBANT, M.; ALTIN, A.; GOKKAYA, H. The effect of cutting speed and cutting tool geometry on machinability properties of nickel-base Inconel 718 super alloys, **Materials and Design**, v. 28: p. 1334–1338, 2007.

OLIVEIRA, A. J.; DINIZ, A. E. Tool life and tool wear in the semi-finish milling of inclined surfaces, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 5448–5455, 2009.

ÖZEL, T. Computational modelling of 3D turning: Influence of edge micro-geometry on forces, stresses, friction and tool wear in PcBN tooling, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 5167–5177, 2009.

PALOMINO, R. C. Planejamento da produção em sistemas flexíveis do tipo job shop usando redes de petri, XXIV **Encontro Nacional de Engenharia de Produção** - Florianópolis, SC, Brasil, 03 a 05 de nov de 2004.

PAWADE, R. S.; JOSHI, S. S.; BRAHMANKAR, P. K.; RAHMAN, M. An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 192–193, p. 139–146, 2007.

PRAKASH, A.; KHILWANI, N.; TIWARI, M. K.; COHEN, Y. Modified immune algorithm for job selection and operation allocation problem in flexible manufacturing systems. **Advances in Engineering Software**, v. 39, p. 219–232, 2008.

PRIORE, P.; FUENTE, D.; PUENTE, J.; PARRENÕ, J. A comparison of machine-learning algorithms for dynamic scheduling of flexible manufacturing systems. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 19, p. 247–255, 2009.

PUJANA, J.; ARRAZOLA, P. J.; VILLAR, J. A. In-process high-speed photography applied to orthogonal turning, **journal of materials processing technology**, v. 202, p. 475–485, 2008.

RECH, J. Influence of cutting edge preparation on the wear resistance in high speed dry gear hobbing, **Wear**, p. 261, p. 505–512, 2006.

RODRIGUES, C. E. P.; SOUZA, G. F. M. Reliability concepts applied to cutting tool change time, **Reliability Engineering and System Safety**, v. 95, p. 866–873, 2010.

SALAK, A.; VASILKO, K.; SELECK, M.; DANNINGER, H. New short time face turning method for testing the machinability of PM steels, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 176, p. 62–69, 2006.

SANDVIK COROMANT DO BRASIL IND. E COM., **Ferramentas para Torneamento (Catálogo)**, Editado pela Sandvik Coromant, São Paulo, 2009.

STERNA, M. Late work minimization in a small flexible manufacturing system. **Computers & Industrial Engineering**, v. 52, p. 210–228, 2007.

TANAKA, R.; YAMANE, Y.; SEKIYA, K.; NARUTAKI, N.; SHIRAGA, T. Machinability of BN free-machining steel in turning, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 47, p. 1971–1977, 2007.

THE THOMPSON STEEL COMPANIES. In: Chemical Analysis of Alloy Steels. Disponível em: <http://www.thompsonsteelco.com/page191.html>. Acesso em 25 de agosto de 2010.

TOTIS, G.; WIRTZ, G.; SORTINO, M.; VESELOVAC, D.; KULJANIC, E.; KLOCKE, F. Development of a dynamometer for measuring individual cutting edge forces in face milling. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 24, p. 1844–1857, 2010.

WANG, X., DA, Z. J.; BALAJI, A. K.; JAWAHIR, I. S. Performance-Based Predictive Models and Optimization Methods for Turning Operations and Applications: Part 3—Optimum Cutting Conditions and Selection of Cutting Tools, **Journal of Manufacturing Processes**, v. 9, n. 1, p. 2057-2059, 2007.

WRUBLAK, O.; PILATTI, L. A.; PEDROSO, B. Parâmetros e métodos de usinagem, **IV Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais**, 2008.

WYEN, C. F.; WEGENER, K. Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium, **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 59, p. 93–96, 2010.

YIH-FONG, T. Parameter design optimisation of computerised numerical control turning tool steels for high dimensional precision and accuracy, **Materials and Design**, v. 27, p. 665–675, 2006.

ZAIN, A. M.; HARON, H.; SHARIF, S. Application of GA to optimize cutting conditions for minimizing surface roughness in end milling machining process, **Expert Systems with Applications**, v. 37, p. 4650-4659, 2010.

ZHENG, L; YANG, X. M.; ZHANG, Z. H.; LIU, T. I . A web-based machining parameter selection system for life cycle cost reduction and product quality enhancement, **Computers in Industry**, v. 59, p. 254–261, 2008.