

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO – UNINOVE
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

GILBERTO DE ALMEIDA CORRÊA JUNIOR

**OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS NA INDÚSTRIA DE MANUFATURA: USO DA
KRIGAGEM PARA A REDUÇÃO DO NÚMERO DE ENSAIOS EM
EXPERIMENTOS DE USINAGEM**

**São Paulo
2013**

GILBERTO DE ALMEIDA CORRÊA JUNIOR

**OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS NA INDÚSTRIA DE MANUFATURA: USO DA
KRIGAGEM PARA A REDUÇÃO DO NÚMERO DE ENSAIOS EM
EXPERIMENTOS DE USINAGEM**

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

Prof. Fabio Henrique Pereira, Dr. – Orientador

São Paulo

2013

Corrêa Junior, Gilberto de Almeida.

Otimização de processos na indústria de manufatura: uso da krigagem para a redução do número de ensaios em experimentos de usinagem./
Gilberto de Almeida Corrêa Junior. 2013.

75 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE,
São Paulo, 2013.

Orientador (a): Prof. Dr. Fabio Henrique Pereira.

1. Vida de ferramenta. 2. Taylor. 3. Krigagem, Kriging. 4.
Interpolação.

I. Pereira, Fabio Henrique.

II. Titulo

CDU 658.5

A

Todos aqueles optaram por fazer de suas vidas uma busca constante pelo conhecimento e por respostas diante de questões intrigantes apresentadas pela realidade.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Fabio H. Pereira pela orientação, compreensão e incentivo dispensado ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Dr. Elesandro A. Baptista pelo incentivo, pelo grande apoio durante as disciplinas, e pela amizade.

Aos colegas Ivone Sato, Marcio Romero, João David Cabral, Edson Mello e Adriano Arrivabene pelo companheirismo e amizade durante esta jornada.

Ao Kleber, pela paciência, e ao amigo Claudimar, sempre presente com uma palavra de apoio.

Ao Prof. Dr. Marcos A. Bussab, pela compreensão e apoio.

À UNINOVE, pela bolsa de estudos concedida.

"Pesquisar é ver o que outros viram, e pensar o que nenhum outro pensou."

Albert Szent-Gyorgyi

(1893-1986)

Fisiologista húngaro.

RESUMO

A análise dos aspectos econômicos inerentes aos processos produtivos e o posicionamento das indústrias quanto a sua eficiência torna perceptível a importância de aumentar a produtividade e aperfeiçoar a utilização dos recursos. Nas indústrias de produção mecânica, em particular, aumentar a eficiência dos processos de usinagem é muito importante. Nesse contexto, somente ser capaz de selecionar ferramentas para um determinado componente não é suficiente para satisfazer as necessidades econômicas; a ferramenta ideal selecionada deve ser a mais eficiente de todas as disponíveis em um ambiente real. A influência do fenômeno de corte sobre o processo de usinagem é tradicionalmente o foco das pesquisas que relacionam os parâmetros de corte, porém, o estudo da vida de ferramentas de corte é alvo de pesquisas desde o início dos processos produtivos. Algumas das principais dificuldades relacionadas às pesquisas de estudo de vida de ferramentas de corte se relacionam ao custo com material e ao tempo envolvidos na obtenção dos dados experimentais. O uso do método tradicional apresentado por Kuljanic (1980) para a obtenção da equação de Taylor para vida de ferramenta consome muito tempo e recursos. Como uma alternativa à abordagem da experimental tradicional, a Krigagem, que é um método de interpolação linear desenvolvido na década de 1950, tem apresentado resultados promissores no tratamento de dados experimentais (GUNES, 2008). Este trabalho tem como objetivo a investigação do comportamento desta técnica de interpolação na obtenção da curva de vida da ferramenta de corte em função dos parâmetros de usinagem: a velocidade de corte, o avanço por rotação, e a profundidade de corte. São utilizados dados obtidos por simulação a partir de uma função de vida de ferramenta conhecida (acrescida de uma perturbação aleatória), com vistas a avaliar o comportamento da técnica de interpolação e investigar sua utilização para reduzir o número de experimentos necessários para obtenção da curva de vida de ferramenta. Os resultados deste trabalho mostram que é possível reduzir-se o número de ensaios sem que a perda de significância seja relevante.

Palavras-chave: Vida de Ferramenta, Taylor, Krigagem, Kriging, Interpolação.

ABSTRACT

The analysis of the economic aspects inherent to the production processes and the positioning of the industries regarding their efficiency makes apparent the importance of increasing their productivity and improve resource utilization. In the mechanical manufacturing industries, in particular, increase the efficiency of machining processes is very important. In this context, only be able to select tools for a particular component is not sufficient to meet the economic needs, the ideal tool selected should be the most efficient of all available in a real environment. The influence of this phenomenon on the cutting machining process is traditionally the focus of research linking the cutting parameters; however, the study of the life of cutting tools is the subject of research since the beginning of production processes. Some of the main difficulties related to the research study of the life of cutting tools relate to material cost and time involved in obtaining the experimental data. The use of the method presented by traditional Kuljanic (1980) for obtaining the equation to Taylor tool life consumes much time and resources. As an alternative to the traditional experimental approach, the Kriging, which is a linear interpolation method developed in the 1950's, has shown promising results in the treatment of experimental data (GUNES, 2008). This study aims to investigate the behavior of this interpolation technique to obtain the curve of life of the cutting tool in terms of machining parameters: cutting speed, feed per rotation, and depth of cut. We use data obtained by simulation from a function known tool life (plus a random disturbance), in order to evaluate the results of interpolation technique and investigate its use to reduce the number of experiments necessary to obtain the curve tool life. These results show that it is possible to reduce the number of tests without loss of significance is relevant.

Keywords: Tool Life, Taylor, Kriging, Interpolation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1: Parâmetros de corte no torneamento..... | 19 |
| Gráfico 1: Incertezas geradas aleatoriamente para cada um dos 27 pontos..... | 36 |
| Gráfico 2: Incertezas em valores absolutos e a média igual a 0,15..... | 36 |
| Gráfico 3: Vida após perturbação aleatória..... | 42 |
| Gráfico 4: Dados perturbados..... | 43 |
| Gráfico 5: Resultado do processo de suavização..... | 43 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|--|----|
| Equação 1: Vida de ferramenta de corte de Taylor..... | 20 |
| Equação 2: Relação entre a variável dependente e as independentes..... | 23 |
| Equação 3: Estimador..... | 23 |
| Equação 4: Somatório dos quadrados dos desvios..... | 23 |
| Equação 5: Vetor Y..... | 24 |
| Equação 6: Matriz X..... | 24 |
| Equação 7: Vetor B..... | 24 |
| Equação 8: Estimador, forma matricial..... | 24 |
| Equação 9: Somatório dos quadrados dos desvios..... | 24 |
| Equação 10: Solução do vetor B..... | 24 |
| Equação 11: Interpolação Linear..... | 27 |
| Equação 12: Condição de ausência de tendência..... | 28 |
| Equação 13: Condição de variância mínima..... | 28 |
| Equação 14: Função Covariância..... | 28 |
| Equação 15: Modelo de covariância..... | 28 |
| Equação 16: Variância..... | 29 |
| Equação 17: Desenvolvimento..... | 29 |
| Equação 18: Derivada parcial da variância..... | 29 |
| Equação 19: Sistema da Krigagem Simples..... | 29 |
| Equação 20: Esperança da estimativa e valor experimental..... | 30 |
| Equação 21: Desenvolvimento da equação 20..... | 30 |
| Equação 22: Desenvolvimento da equação 21..... | 30 |
| Equação 23: Conclusões acerca dos pesos da interpolação linear..... | 30 |
| Equação 24: Estimador de f | 30 |
| Equação 25: Função de Lagrange..... | 30 |
| Equação 26: Sistema matricial da Krigagem Ordinária..... | 30 |
| Equação 27: Componente global local e aleatória..... | 31 |
| Equação 28: Componente global..... | 31 |
| Equação 29: Retirada da Tendência..... | 31 |
| Equação 30: Recomposição da Estimativa..... | 32 |
| Equação 31: Equação de vida de ferramenta..... | 34 |
| Equação 32: Equação para profundidade de corte constante..... | 34 |

| | |
|---|----|
| Equação 33: Função tendência..... | 39 |
| Equação 34: Equação obtida pelo método tradicional..... | 47 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Dados experimentais obtidos por simulação | 38 |
| Tabela 2: Retirada da tendência..... | 40 |
| Tabela 3: Resultado da suavização..... | 41 |
| Tabela 4: Conjunto reduzido de dados..... | 45 |
| Tabela 5: Conjunto com 27 dados obtidos a partir do conjunto reduzido..... | 46 |
| Tabela 6. Equação original, e as equações obtidas através dos dados gerados..... | 48 |
| Tabela 7. Desvio das funções obtidas por regressão em relação à função original. | 49 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA..... | 15 |
| 1.2 RELEVÂNCIA DO TEMA..... | 15 |
| 1.3 OBJETIVOS..... | 16 |
| 1.3.1 Objetivo Geral..... | 16 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos..... | 16 |
| 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO CIENTÍFICO..... | 16 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA..... | 18 |
| 2.1 PARÂMETROS DE CORTE..... | 18 |
| 2.2 MÉTODO TRADICIONAL..... | 19 |
| 2.2.1 Questões a respeito da obtenção da equação de vida de ferramenta..... | 21 |
| 2.2.2 A questão do pequeno número de ensaios..... | 22 |
| 2.2.3 Regressão linear..... | 23 |
| 2.3 KRIGAGEM..... | 25 |
| 2.3.1 Definição..... | 26 |
| 2.3.2 Origem da técnica..... | 26 |
| 2.3.3 Desenvolvimento do modelo matemático..... | 27 |
| 2.3.3.1 Função Covariância..... | 28 |
| 2.3.3.2 Krigagem Simples..... | 29 |
| 2.3.3.3 Krigagem Ordinária..... | 29 |
| 2.3.3.4 Krigagem com tendência..... | 31 |
| 3 METODOLOGIA..... | 33 |
| 3.1 CLASSIFICAÇÃO..... | 33 |
| 3.2 FASES DA PESQUISA..... | 33 |
| 3.3 OBTENÇÃO DOS DADOS..... | 34 |
| 3.3.1 Variação dos parâmetros de entrada..... | 35 |
| 3.3.2 Cálculo da vida a partir da equação de taylor..... | 35 |
| 3.3.3 Simulação da incerteza..... | 35 |
| 3.3.4 Perturbação dos dados:..... | 37 |
| 3.4 DESENVOLVIMENTO..... | 38 |
| 3.4.1 Teste com a Krigagem no tratamento dos dados..... | 39 |
| 3.4.1.1 Retirada da tendência..... | 39 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.4.1.2 | Suavização dos dados experimentais..... | 40 |
| 3.4.2 | Obtenção da equação de vida de ferramenta..... | 44 |
| 3.4.2.1 | Conjuntos reduzidos de dados | 45 |
| 3.4.2.2 | Recomposição dos dados..... | 45 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 47 |
| 4.1 | METODO TRADICIONAL DE OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO DE VIDA DE FERRAMENTA POR REGRESSÃO..... | 47 |
| 4.2 | COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS..... | 47 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 50 |
| 5.1 | SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS..... | 50 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 52 |
| | APÊNDICE A – Recessão utilizando Scilab 5.3.2..... | 58 |
| | APÊNDICE B – Artigos publicados nos Anais do CONEM 2012 e COBEF 2013..... | 62 |

1 INTRODUÇÃO

A análise dos vários aspectos dos processos produtivos e o atual cenário da indústria, bem como a grande evolução tecnológica que apresentam (com o desenvolvimento de novos materiais e geometrias para ferramentas e máquinas), torna perceptível a necessidade de aumentar a eficiência dos processos e aperfeiçoar a utilização destes novos recursos.

Segundo Baptista & Coppini (2001), a otimização dos processos dentro das indústrias de manufatura constitui uma busca permanente, com vistas a explorar todos os caminhos que levem ao aumento da eficiência e, consequentemente, maior produtividade. A redução dos tempos não produtivos (movimentação, e outros tempo relacionados a atividades humanas), e os tempos produtivos (diretamente associados ao processo produtivo) são formas de aumentar a produtividade (BAPTISTA, 2004).

Tratando especificamente da usinagem, Souza (2001) coloca que um dos critérios de avaliação da produtividade de um processo é o tempo gasto em fila somado ao tempo associado ao processamento por unidade produzida. O tempo de produção está grandemente associado à vida útil da ferramenta, seja na definição dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço da ferramenta e profundidade de corte), ou na definição do número de troca de ferramentas por lote de unidades fabricadas.

O estudo da vida de ferramentas de corte é alvo de pesquisas desde o início do processo de industrialização, como as desenvolvidas por Taylor no início do século XX, porém, os avanços tecnológicos atuais aumentam a relevância das investigações científicas nessa área (BAPTISTA, 2004).

De acordo com Ju (1998), do ponto de vista econômico, somente ser capaz de selecionar ferramentas para um determinado componente não é suficiente para satisfazer as necessidades econômicas na indústria de manufatura. Em geral, ferramenta ideal selecionada deve ser a mais econômica entre todas as ferramentas possíveis em um ambiente real.

A influência do fenômeno de corte sobre o acabamento da peça no processo de usinagem é tradicionalmente o foco das pesquisas que relacionam os parâmetros de

corte, como foi abordado, por exemplo, por Boujelbene (2007) e também por Meng (2000). Porém o conhecimento do relacionamento preciso entre estes parâmetros é muito importante para aumentar a vida útil da ferramenta.

Para que isto seja possível, é necessário conhecer a equação de vida de ferramenta de Taylor, que relaciona a vida de ferramenta com a velocidade de corte, o avanço da ferramenta em relação à peça, e a profundidade de corte. A relação entre a vida de ferramenta e os parâmetros de corte é uma relação inversa, ou seja, quando se aumenta o valor dos parâmetros, reduz-se a vida útil da ferramenta e piora o acabamento superficial da peça usinada (FONTE).

Para que a equação de vida de ferramenta obtida experimentalmente possa ser aplicada a situações práticas de uso, é importante que o experimento seja planejado dentro da faixa de valores dos parâmetros (velocidade de corte, avanço da ferramenta e profundidade de corte) utilizados durante os processos de fabricação. Desta forma, o valor estimado da vida de ferramenta poderá ser utilizado para planejar o processo de produção.

Duas características importantes no experimento para obtenção da equação de vida de ferramenta são: a necessidade de redução do número de ensaios (pois isso reduz os custos e o tempo associados ao experimento), e a garantia da representatividade dos resultados obtidos a partir dos dados experimentais.

O processo mais conhecido (método tradicional) para se encontrar os coeficientes desta equação consiste num planejamento experimental com vinte e sete pontos, obtidos variando-se cada parâmetro em três níveis diferentes (KULJANIC, 1980). Isto significa que em cada experimento são necessários vinte e sete ensaios, que consomem material até que a ferramenta se desgaste. Segundo Moriwaki (2005), esse processo experimental consome muito tempo e recursos e representa uma das principais dificuldades relacionadas às pesquisas sobre a vida de ferramentas de corte, em especial no que diz respeito à validação dos aspectos teóricos investigados.

Outra forma de reduzir tempo e custos associados ao experimento para obtenção de vida de ferramenta é utilizar valores para os parâmetros de corte que reduzam o tempo e a quantidade de material consumido durante os ensaios. Porém, nem sempre os parâmetros de corte usados nos ensaios estão próximos dos observados

regularmente nos processos industriais, o que pode comprometer a representabilidade.(MENG, 2000).

Como uma alternativa à abordagem tradicional, este trabalho aponta a utilização de um método de interpolação linear tradicionalmente utilizado pela Geoestatística denominado Krigagem para tratamento dos dados, como sendo um método promissor (LI, 2010) na tentativa de reduzir o número de ensaios sem perder a representatividade dos resultados do experimento (KHODAPARAST, 2010).

Uma investigação do comportamento do método perante dados obtidos a partir de uma equação conhecida e a análise dos resultados obtidos pode trazer muito subsídios para futuras aplicações da Krigagem na otimização de processos produtivos na indústria de manufatura em ensaios mecânicos.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Diante das dificuldades apresentadas na realização de experimentos para a obtenção da equação de vida de ferramenta, como e até que ponto é possível reduzir o número de ensaios definidos no planejamento, reduzindo assim seu custo e seu tempo de execução, sem que com isso perca-se a representatividade dos resultados?

1.2 RELEVÂNCIA DO TEMA

A questão da definição dos parâmetros de corte nos processos de usinagem, tradicionalmente tratado em função apenas do acabamento e especificações do produto final, tem recebido especial atenção do ponto de vista econômico. A escolha de uma determinada ferramenta e o cálculo dos parâmetros de corte estão em foco quando se trata de aumentar a eficiência de um processo, reduzindo custos e tempo de usinagem (JU, 1998).

A determinação dos parâmetros de corte para um processo de usinagem específico demanda uma análise bem detalhada. O conhecimento da vida da ferramenta é

necessário para que se possa equacionar o problema e determinar os parâmetros de corte, como a velocidade de corte, de forma eficiente (COPPINI e BAPTISTA, 1998).

Porém, segundo Moriwaki (2005), o processo experimental tradicionalmente utilizado para a obtenção da equação de vida de ferramenta consome muito tempo e recursos, e uma busca por novas técnicas de obtenção da vida de ferramenta constitui um campo importante de pesquisa.

1.3 OBJETIVOS

Para que haja maior clareza quanto aos objetivos deste trabalho, estes foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho objetivou estudar o uso da Krigagem para a redução do número de ensaios em experimento de usinagem, especificamente na obtenção da equação de vida da ferramenta em função dos parâmetros de corte, sem perda de significância.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Verificar a aplicabilidade da Krigagem ao problema de levantamento experimental da equação de vida de ferramenta.
- Avaliar a influência do número de ensaios nos resultados de interpolação pela Krigagem.
- Investigar a capacidade da Krigagem na reamostragem de dados do processo de usinagem a partir de um pequeno número de ensaios experimentais.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em sete capítulos, sendo estes:

- Capítulo 1 – Introdução, relevância do tema, objetivos e estrutura do trabalho;

- Capítulo 2 – Revisão da literatura: apresenta uma revisão bibliográfica dos temas relacionados tanto à obtenção da equação de vida de ferramenta pelo método tradicional, bem como à apresentação da Krigagem e sua formulação matemática.
- Capítulo 3 – Método: apresenta a metodologia de pesquisa adotada, a obtenção dos dados, tratamento e obtenção da equação de vida de ferramenta.
- Capítulo 4 – Verificação, resultados e discussões sobre os resultados obtidos.
- Capítulo 5 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta inicialmente o método tradicional para a obtenção dos coeficientes da Equação de Taylor para a vida de ferramenta. Como opção para redução do número de ensaios apresenta-se a Krigagem, suas origens, e sua formulação.

2.1 PARÂMETROS DE CORTE

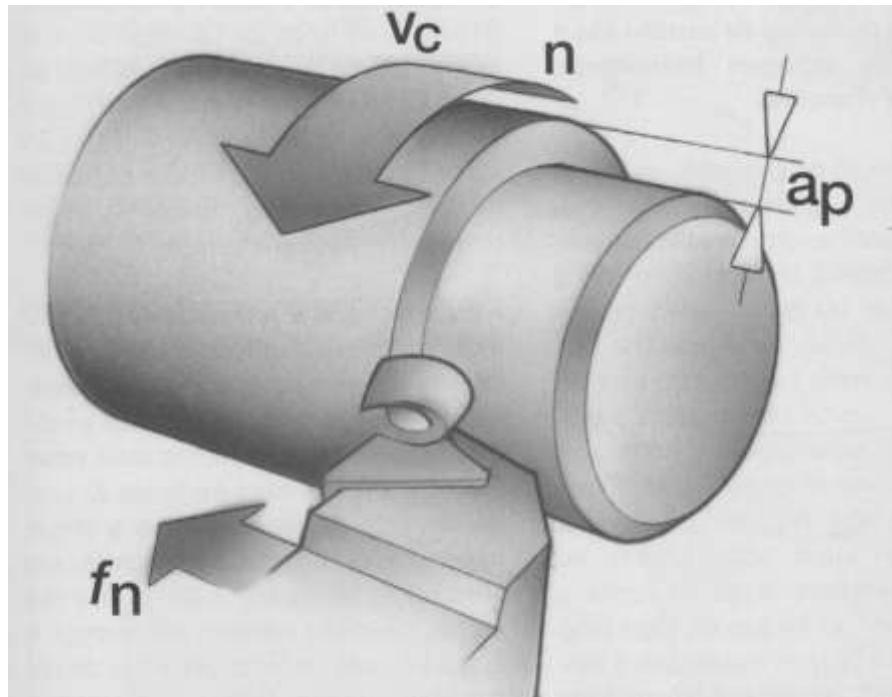
Os parâmetros de corte que influenciam na vida útil da ferramenta são a velocidade de corte, o avanço da ferramenta por rotação e a profundidade de corte (KULJANIC, 1980). A Figura 1 ilustra como identificar estes parâmetros (v_c : velocidade de corte, f_n : avanço da ferramenta, a_p : profundidade de corte) tomando o torneamento como exemplo.

A velocidade de corte expressa a razão na qual a superfície ainda não usinada passa pela aresta de corte (AMORIM, 2002). No caso do torneamento, esta pode ser obtida multiplicando-se a rotação da peça por π vezes o seu diâmetro. A rotação normalmente é expressa em rotações por minuto (rpm), e a velocidade de corte em metros por minuto (m/min).

O avanço é a distância percorrida pela ferramenta a cada revolução (AMORIM, 2002) e normalmente é expressa em milímetros.

A profundidade de corte é a diferença entre de cota entre a superfície usinada e a superfície a ser usinada (SANDIVIK COROMANT, 2005), ou seja, é a espessura na qual a ferramenta penetra a peça (AMORIM, 2002).

Figura 1: Parâmetros de corte no torneamento.
(fonte: Sandvik Coromant, 2005.)



2.2 MÉTODO TRADICIONAL DE OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO DE VIDA DE FERRAMENTA

O método tradicional para a obtenção da curva de vida de ferramenta, baseado em vinte e sete ensaios (KULJANIC, 1980) consiste em obter os coeficientes da curva de vida variando-se os parâmetros de corte envolvidos.

Considera-se a equação de vida de ferramenta de Taylor, mostrada na Equação 1:

$$T = K * v_c^{k_v} * f_n^{k_f} * a_p^{k_a} \quad (1)$$

na qual:

- K : constante de proporcionalidade;
- v_c : velocidade de corte [m/min];
- k_v : coeficiente da velocidade de corte;
- f_n : avanço [mm/rotação];
- k_f : coeficiente do avanço;

- a_p : profundidade de corte [mm];
- k_a : coeficiente da profundidade de corte.

Realiza-se ensaios variando-se a velocidade de corte (v_c), o avanço (f_n) e a profundidade de corte (a_p), cada uma em três patamares. Realizando todas as combinações possíveis ($3^3 = 27$), obtém-se então um total de vinte e sete ensaios. Após a realização do experimento, os parâmetros da equação de vida de ferramenta são obtidos por regressão.

Kuljanic (1980) apresentou uma metodologia para reduzir a quantidade de ensaios em um experimento selecionando aleatoriamente apenas alguns destes ensaios. Segundo Kuljanic (1980), para obtenção da equação de vida de ferramenta consiste em reduzir o número de ensaios necessários para a regressão por meio de seleção aleatória de nove ensaios entre os 27 que tradicionalmente seriam necessários para obtenção da curva. O trabalho afirma que é possível utilizar números menores de ensaios, tendo um mínimo sugerido de cinco ensaios, porém recomenda utilizar entre oito ou nove. Tal seleção aleatória tem como objetivo evitar possíveis combinações entre as leituras onde haja uma correlação entre os parâmetros de corte, pois, conforme observado experimentalmente pelo autor, esta correlação influencia o resultado final. Ao se verificar os resultados apresentados pelo autor, é possível perceber sua fidelidade satisfatória, embora tenha sido utilizado apenas um número inferior de ensaios que o número tradicionalmente usado. Isso se deve à seleção de um conjunto de observações eficiente.

Uma leitura detalhada do método permite perceber que, embora o autor tenha deixado claro que a presença de correlação entre os parâmetros de usinagem influencie muito o resultado final, o processo de escolha aleatória reduz a ocorrência de correlação entre os parâmetros de corte nos conjuntos de condições de corte selecionados, mas não impede totalmente que isto aconteça. Portanto é muito importante eliminar as combinações que trazem uma correlação significativa entre os parâmetros antes de se fazer a seleção aleatória. (CORRÊA JR., 2012).

2.2.1 Questões a respeito da obtenção da equação de vida de ferramenta

Duas questões relevantes à determinação do planejamento de um experimento para a determinação da vida da ferramenta são o número de ensaios e a definição da faixa de variação dos parâmetros de corte.

A utilização de um grande número de ensaios no experimento, embora aumente a precisão dos resultados, muitas vezes torna o experimento caro e demorado.

Quanto à definição da faixa de variação dos parâmetros de corte, é possível aumentar os valores para acelerar o ensaio, porém não se garante a representatividade dos resultados obtidos como consequência da utilização de parâmetros de corte muito diferentes daqueles utilizados nos processos industriais.

Estas considerações ressaltam dois dilemas de grande relevância que tornam evidente a necessidade de buscar novas abordagens para a realização dos experimentos para a obtenção da equação de vida de ferramenta.

O primeiro dilema, e talvez o mais importante, refere-se ao número de ensaios necessário para a realização do experimento de forma tradicional. Embora, do ponto de vista do planejamento experimental, vinte e sete ensaios (KULJANIC, 1980) seja um número relativamente pequeno de resultados, do ponto de vista da viabilidade do experimento, este número é extremamente grande, e isso se deve às seguintes restrições: a quantidade de material que deve ser usinado, o tempo de utilização das máquinas, e em terceiro um ponto de menor importância que seria o número de ferramentas utilizadas, como é enfatizado por Ojha (2005). Destes, os dois primeiros têm maior relevância. Uma quantidade de ensaios da magnitude solicitada pelo método tradicional inviabiliza a pesquisa em relação aos custos de material e de utilização de máquinas.

O segundo dilema refere-se à definição de parâmetros de corte mais próximos dos usuais, o que também aumenta o tempo de usinagem e a quantidade de material usinado. Realizar o experimento em condições de corte mais próximas das recomendadas pelos fabricantes da ferramenta aumenta a representatividade dos resultados, porém, utilizar parâmetros mais próximos dos valores críticos definidos pelo fabricante, acelera o desgaste da ferramenta, com consequente diminuição da vida útil da ferramenta e redução do material consumido e do tempo do experimento.

2.2.2 A questão do pequeno número de ensaios.

A questão da pequena quantidade de resultados experimentais tem sido abordada amplamente, e diversas técnicas têm sido aplicadas para dirimir este problema (PRADO et al., 2013; PANCHAL et al, 2011; KAVIANI et al., 2008; RICK, 1999).

Assim como o caso da obtenção da vida de ferramenta, problemas de otimização nos quais não há uma representação analítica explícita da função a ser otimizada apresentam com frequência limitações, relacionadas aos custos, computacionais e financeiros, para realização dos experimentos, resultando em uma pequena quantidade de dados experimentais. Como exemplo, cita-se as abordagens experimentais baseadas em planejamento fatorial, nas quais um determinado número de experimentos resulta em um conjunto de dados que relacionam valores das variáveis de entrada às saídas correspondentes do sistema em questão. Nesses casos, os experimentos podem ter sido realizados diretamente no processo produtivo, ou utilizando-se de simulações com um protótipo em laboratório (experimento físico), ou ainda por meio de simulação computacional, para posterior construção de metamodelos de otimização (LEBAAL, 2011; LI et al., 2008; LEBENSZTAJN, 2004; MARRETO, 2004) ou modelos de previsão (PRADO et al., 2013; WAN et al., 2010; WANG, 2007; CURRY e MORGAN, 2006; CHEN e CHEN, 2005). Uma questão importante, diretamente associada a esses problemas, é que a base de dados obtida com as simulações ou experimentos é, na maioria dos casos, relativamente pequena. Exemplos disso podem ser observados nas simulações computacionais via Método dos Elementos Finitos, cujo custo computacional é muito elevado, bem como nos experimentos reais em linha de produção, nos quais o número de ensaios é limitado por questões de tempo, matéria prima e mão-de-obra.

Uma possibilidade bastante difundida nesses casos nos quais os dados são obtidos experimentalmente ou por simulação é a utilização de interpolação por redes neurais artificiais (XING et al., 2009; PRASZKIEWICZ, 2008). No entanto, a utilização das redes neurais artificiais também é limitada pelo tamanho do conjunto de dados experimentais, uma vez que é realizada usando uma divisão dos dados disponíveis em conjuntos de treinamento, de seleção e de testes (PANCHAL et al, 2011; KAVIANI et al., 2008; CURRY e MORGAN, 2006).

Uma alternativa para contornar essa dificuldade é a utilização de técnicas de reamostragem como, por exemplo, o método de *bootstrap* que se baseia em uma imitação de um processo probabilístico e nas informações fornecidas por um dado conjunto pequeno de amostras obtidas experimentalmente (PRADO et al., 2013). Porém, apesar de apresentar bons resultados na estimação de parâmetros, esta técnica tem sido muito questionada por diversos pesquisadores, em especial, por não aumentar o conhecimento do fenômeno envolvido para além dos dados obtidos (YU, 2003).

A Krigagem, como método de interpolação linear, pode ser aplicada neste contexto de reamostragem, como demonstrado por Gunes (2010) com resultados interessantes na recomposição de dados.

2.2.3 Regressão Linear

De acordo com Veiga (2000), o estudo de regressão ocupa-se dos casos nos quais pretende-se estabelecer uma relação entre uma variável y considerada dependente de outra(s) n variáveis $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$ considerada(s) independente(s), usualmente representada como se vê na Equação 2:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n) . \quad (2)$$

Seja dado um conjunto de dados obtidos experimentalmente ao quais associam para cada valor de y , os valores correspondentes de $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$; é possível obter um estimador \hat{y} (VEIGA, 2000) dado pela função apresentada na Equação 3:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_nx_n. \quad (3)$$

Os coeficientes b_i podem ser obtidos através do método dos mínimos quadrados, que consiste em minimizar os desvios entre os valores de y obtidos experimentalmente e a estimativa \hat{y} , ou seja:

$$\sum(y - \hat{y})^2 = \sum(y - b_0 - b_1x_1 - b_2x_2 - b_3x_3 - \dots - b_nx_n). \quad (4)$$

Os coeficientes b_i são obtidos por meio das derivadas da soma dos quadrados dos desvios em relação aos coeficientes b_i , tornando difícil a obtenção destes coeficientes de forma algébrica. No entanto, ao utilizar a notação matricial, o

problema se torna simples (HOFFMMAN, 1982). Representando-se matricialmente os k pontos obtidos experimentalmente tem-se o vetor presente na Equação 5, e a matriz apresentada na Equação 6:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ 1 & x_{31} & x_{32} & \dots & x_{3k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

O vetor B da Equação 7 representa os coeficientes da Equação 3:

$$B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Então a Equação 3 pode ser reescrita como a Equação 8:

$$\hat{Y} = BX. \quad (8)$$

Desta forma, o método dos mínimos quadrados procura minimizar a soma dos quadrados dos desvios conforme a Equação 9:

$$(Y - \hat{Y})'(Y - \hat{Y}), \quad (9)$$

na qual $(Y - \hat{Y})'$ é a transposta de $(Y - \hat{Y})$.

De acordo com Draper (1981), a solução do vetor B é dada pela Equação (10):

$$B = (X'X)^{-1}(X'Y), \quad (10)$$

onde X' é a matriz transposta de X , e $(X'X)^{-1}$ é a inversa de $(X'X)$.

O procedimento acima realizado com auxílio do Scilab 5.3.2 está exemplificado no Apêndice A.

2.3 MÉTODO DA KRIGAGEM

A busca de novas alternativas dentro das técnicas matemáticas para tratamento dos dados obtidos em experimentos voltados para a obtenção da equação de vida de ferramenta sugere a Krigagem, amplamente utilizada pela Geologia (XIE, 2011; BADEL, 2011), como uma possibilidade.

A Krigagem tem sido usada em problemas computacionais e de engenharia, como apresentado por Bui (2011) para análise de vibrações. Usando-se a Krigagem foi possível obter imagens tridimensionais dos modos de vibração de placas com formatos simples (retangular e circular), bem como de placas com recortes irregulares, apresentando bons resultados.

Chen (2011) utilizou a Krigagem no tratamento de problemas envolvendo transferência de calor, conseguindo bons resultados para problemas onde há fluxo de calor em mais de uma direção.

No seu trabalho envolvendo transmissão de radiofrequência, Dall'Anese (2011) utilizou filtros de sinal baseados na Krigagem, em alternativa aos filtros de sinais tradicionalmente utilizados.

A Krigagem foi utilizada Tolosana-Delgado (2011) no processo de modelagem numérica de ondas não estacionárias obtendo resultados de forma viável e mais rapidamente.

Lebaal (2011) utilizou a Krigagem na otimização da usinagem de ligas de titânio, conseguindo bons resultados na otimização dos processos.

Lebesztajn et al., (2004) utilizaram modelos de Krigagem na otimização dispositivo eletromagnético, comparando os modelos com algumas redes neurais. Em seu trabalho, Nabeta et al., (2008) aplicaram a Krigagem na optimização de certos parâmetros geométricos do rotor com auxílio de simulações de elementos finitos para avaliar os pontos de aproximação para o modelo Krigagem.

Dada a larga aplicação da Krigagem no tratamento de dados e a grande eficiência da técnica apresentada nestes trabalhos, torna-se bastante promissora a investigação desta técnica aplicada ao problema de levantamento da equação de vida de ferramenta, tendo em vista a redução do número de ensaios necessários

para a realização do experimento de forma a manter a representatividade dos resultados.

Complementarmente, é importante ressaltar que a análise do comportamento da Krigagem aplicada ao problema de determinação da equação de vida de ferramenta acena com possíveis aplicações em outras áreas nas quais a quantidade pequena de ensaios seja uma questão relevante.

2.3.1 Definição

Em relação à técnica, a Krigagem consiste em uma regressão linear generalizada, que procura minimizar uma variância da estimativa (ou seja, a diminuição da diferença entre as estimativas e os valores experimentais), em relação ao modelo de covariância definido a partir dos dados originais (IMAI, 2003); modelo este que aproxima a variação espacial da propriedade observada. O método pressupõe que pontos espacialmente mais próximos tendem a ter propriedades mais parecidas do que pontos mais distantes. Portanto, a variabilidade dos dados deve depender da distância. Segundo Isaaks e Srivastava (1989), muitas vezes esta variabilidade sofre também influência da direção.

2.3.2 Origem da técnica

O processo de Krigagem, oriundo das pesquisas de Daniel G. Krige na área da geofísica, e formalizado pelo matemático francês Georges Matheron na década de 1960 (LARGUECHE, 2006), é uma proposta que busca interpolar dados (XAVIER, 2010) baseando-se na hipótese que diz que as propriedades físico-químicas do solo variam continuamente e que a variação destas propriedades entre dois pontos distintos diminui com a proximidade entre eles.

A Krigagem é amplamente utilizada na análise de resultados de pesquisas geológicas (KARL, 2010), e é bastante presente no tratamento estatístico de pesquisas voltadas tanto à agronomia, como a contaminação do solo, bem como às questões relacionadas à geologia e à mineração (ADHIKARY, 2011). Aplica-se bem aos conjuntos de dados esparsos, apresentando resultados satisfatórios. No

entanto, há exemplo de investigação das possíveis aplicações da Krigagem no tratamento de dados obtidos em experimentos de outras naturezas como, por exemplo, oriundos de problemas das engenharias (CHEN, 2011). Para isso é muito importante verificar o comportamento da Krigagem quando aplicada a problemas de natureza diferente daqueles tradicionalmente abordados nas áreas das geociências.

Em seu trabalho na área de matemática aplicada, Gunes (2008) utilizou a Krigagem em uma função conhecida para analisar o comportamento da técnica para recompor dados perdidos, suavizar e filtrar um sinal e também para otimização, apresentando resultados muito satisfatórios em todas as abordagens, o que sugere muitas possibilidades de aplicação da técnica para análise de dados estatísticos. Uma função de duas variáveis ($Z(x,y)$) conhecida foi utilizada como ponto de partida, dando origem a um conjunto de pontos. Inicialmente aplicou-se uma perturbação aleatória a estes dados e a Krigagem foi utilizada para suavização, sendo comparado com outros processos de filtragem, com resultados muito bons. No próximo teste, os dados foram reduzidos de maneira uniforme, e então a Krigagem foi utilizada para substituir os dados retirados. Num último teste, a técnica recompôs uma região de dados retiradas do conjunto original. Em todos os casos a Krigagem aproximou-se satisfatoriamente dos dados originais.

2.3.3 Desenvolvimento do modelo matemático

A partir de um conjunto de n pontos, sendo que em cada um se observa a magnitude de uma determinada propriedade f , é possível obter um estimador desta propriedade em um ponto não observado realizando-se uma interpolação linear (IMAI, 2003), como definido na Equação 11:

$$\hat{f}(x_p) = w_0 + \sum_{i=1}^n w_i \cdot f(x_i), \quad (11)$$

na qual, $\hat{f}(x_p)$ é uma estimativa da propriedade f num ponto x_p , $f(x_i)$ é o valor da propriedade f no ponto x_i , e w_i é o peso da interpolação linear correspondente ao ponto x_i .

Existem duas condições que o estimador $\hat{f}(x_p)$ deve satisfazer para que a estimativa seja ótima (MARRETO, 2004):

- Ausência de tendência, ou seja, a média da diferença entre o valor estimado e o valor real deve ser nula, conforme a Equação 12:

$$E[\hat{f}(x_p) - f(x_p)] = 0. \quad (12)$$

- Variância mínima, que indica que os desvios entre os valores estimados e os medidos devem ser mínimos, de acordo com a Equação 13:

$$\min\{Var[(\hat{f}(x_p) - f(x_p)]\} = \min\{E[\hat{f}(x_p) - f(x_p)]^2\}. \quad (13)$$

2.3.3.1 Função Covariância

A função Covariância $Cov(x_i, x_j)$ relaciona a variação da propriedade f entre dois pontos x_i e x_j , ou seja, a variação espacial da propriedade f em função de um vetor com origem o ponto x_i e final no ponto x_j , expressando desta forma a variação da propriedade f como uma função da distância entre dois pontos (MELO, 2006). Dados dois pontos x_i e $x_j = x_i + \vec{h}$, então:

$$Cov(x_i, x_j) = Cov(x_i, x_i + \vec{h}) = Cov(\vec{h}) \quad (14)$$

A partir da variação da propriedade f para cada par de pontos, é possível ajustar uma função através de regressão linear que relate a variação da propriedade f em função de \vec{h} .

Existem vários modelos de funções de covariância no âmbito da Krigagem (MARRETO, 2004). Entre os modelos sugeridos, adotou-se o modelo exponencial, conforme a equação 15 (CAMARGO, 1998):

$$Cov(|\vec{h}|) = c|\vec{h}|^e \quad (15)$$

2.3.3.2 Krigagem Simples

O sistema da Krigagem Simples (MARRETO, 2004) é construído aplicando-se a Equação 2 na condição de variância mínima da Equação 4. A variância de $\hat{f}(x_p)$ é definida pela Equação 16:

$$\sigma^2[\hat{f}(x_p)] = E[\hat{f}(x_p) - f(x_p)]^2 = E[\hat{f}(x_p)^2 + f(x_p)^2 - 2\hat{f}(x_p)f(x_p)], \quad (16)$$

a partir do desenvolvimento dos termos da Equação 16, conforme Liu (2001), e Shyu (2011) conclui-se que:

$$\sigma^2[\hat{f}(x_p)] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \text{Cov}(x_i, x_j) + \text{Cov}(0) - 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i \text{Cov}(x_i, x_p) \quad (17)$$

sendo $\text{Cov}(x_i, x_j)$ a função covariância da propriedade f nos pontos x_i e x_j .

Para que a variância seja mínima em relação aos pesos w_i , a derivada da variância deve ser nula como na Equação 12, resultando na Equação 18:

$$\frac{\partial \sigma^2[\hat{f}(x_p)]}{\partial w_i} = 2 \sum_{j=1}^n w_j \text{Cov}(x_i, x_j) - 2 \text{Cov}(x_i, x_p) = 0 \quad (18)$$

Da Equação 18 resulta o sistema matricial dado pela Equação 19, que caracteriza a Krigagem Simples, e desta forma calculam-se os pesos w_i da interpolação linear:

$$\begin{bmatrix} \text{Cov}(x_1, x_1) & \text{Cov}(x_1, x_2) & \dots & \text{Cov}(x_1, x_n) \\ \text{Cov}(x_2, x_1) & \text{Cov}(x_2, x_2) & \dots & \text{Cov}(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(x_n, x_1) & \text{Cov}(x_n, x_2) & \dots & \text{Cov}(x_n, x_n) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cov}(x_1, x_p) \\ \text{Cov}(x_2, x_p) \\ \vdots \\ \text{Cov}(x_n, x_p) \end{bmatrix} \quad (19)$$

2.3.3.3 Krigagem Ordinária

Na Krigagem Ordinária (também traduzida como Krigagem Comum) o sistema para obtenção dos pesos é obtido a partir da condição de ausência de tendência (BERVEGLIERI, 2012; MARRETO, 2004): A partir das Equações 11 e 12, pode-se

chegar às Equações 20, 21 e 22. A Equação 12 (condição de ausência de tendência) dá origem à Equação 20:

$$E[f(x_p)] = E[\hat{f}(x_p)] \quad (20)$$

Substituindo-se a Equação 11 na Equação 20, tem-se a Equação 21:

$$E[f(x_p)] = E[w_0 + \sum_{i=1}^n w_i \cdot f(x_i)] \quad (21)$$

Que resulta na Equação 22:

$$\mu = w_0 + \sum_{i=1}^n w_i \cdot \mu \quad (22)$$

Para que a Equação 22 tenha solução independente do valor da média μ , é necessário satisfazer as condições apresentadas na Equação 23:

$$w_0 = 0 \text{ e } \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad (23)$$

que são as hipóteses da Krigagem Ordinária. Portanto (MARQUES, 2012) a estimativa da propriedade f no ponto x_p é dada pela Equação 24:

$$\hat{f}(x_p) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot f(x_i). \quad (24)$$

A partir da Equação 17 constrói-se uma função de Lagrange L apresentada na Equação 25:

$$L(w_1, \dots, w_n, \lambda) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \text{Cov}(x_i, x_j) + \text{Cov}(0) - 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i \text{Cov}(x_i, x_p) + 2\lambda \sum_{i=1}^n (w_i - 1) \quad (25)$$

A Equação 25 dá origem ao sistema definido na Equação 26, que tem como variáveis os pesos w_i da interpolação e o multiplicador de Lagrange λ (MARRETO, 2004),

$$\begin{bmatrix} \text{Cov}(x_1, x_1) & \text{Cov}(x_1, x_2) & \dots & \text{Cov}(x_1, x_n) & 1 \\ \text{Cov}(x_2, x_1) & \text{Cov}(x_2, x_2) & \dots & \text{Cov}(x_2, x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \text{Cov}(x_n, x_1) & \text{Cov}(x_n, x_2) & \dots & \text{Cov}(x_n, x_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cov}(x_1, x_p) \\ \text{Cov}(x_2, x_p) \\ \vdots \\ \text{Cov}(x_n, x_p) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

2.3.3.4 Krigagem com tendência

Para aplicação da Krigagem ordinária, é necessário que os dados sejam estacionários (PEI, 2010), ou seja, que apresentem apenas componentes de variação local e aleatórias, mas sem que haja uma tendência global de crescimento ou decrescimento dos dados (MARRETO, 2004).

Caso haja tendência global, aplica-se a Krigagem com tendência, também conhecida como Krigagem Residual, que consiste em retirar a tendência global dos dados. Outra possibilidade seria a Krigagem Universal, porém este método apresenta uma resolução mais trabalhosa (LANDIN, 2002).

Segundo Landin (2002), a variação de um valor em relação à sua posição pode ser expressa pela soma de três componentes: a tendência, ou variação global; uma variação local; e um ruído aleatório ou erro residual. As duas primeiras são relacionadas à posição, e a terceira não. Se x_p representa um ponto correspondente a valores determinados de velocidade de corte e de avanço, então o valor da variável T , correspondente à vida da ferramenta no ponto x_p , é dada pela Equação 27:

$$T(x_i) = t(x_i) + s(x_i) + \varepsilon, \quad (25)$$

onde $t(x_p)$ é a componente de tendência global, $s(x_p)$ é a componente local, e ε é a componente aleatória (CAMARGO, 1998).

Após a retirada da tendência global, o conjunto de dados passa a ser estacionário, ou seja, sem tendência de crescimento e com média nula, possibilitando a aplicação da Krigagem ordinária.

Uma das formas de se retirar a tendência de um conjunto de dados é encontrar um curva de tendência que se ajuste aos dados por regressão (MORETIN, TOLOI, 2006), demonstrado na Equação 28,

$$t(x_i) = Ax_{ip} + B \quad (28)$$

e subtraí-la de T para cada valor de x_i , criando uma propriedade Y que possui apenas componentes locais e aleatórias, conforme a Equação 29:

$$Y(x_i) = T(x_i) - t(x_i) = s(x_i) + \varepsilon \quad (29)$$

Como Y não possui tendência, é possível estimá-la utilizando-se a Krigagem ordinária, e então acrescenta-se a tendência a Y para obter-se os estimados de T , de acordo com a Equação 28

$$\hat{T}(x_i) = \hat{Y}(x_i) + t(x_i) \quad (28)$$

3 MATERIAIS E MÉTODO

Este capítulo caracteriza a pesquisa presente neste trabalho.

3.1 CLASSIFICAÇÃO

De acordo com Severino (2001), pelas suas características, esta pesquisa é do tipo **Quantitativo**, e pode se classificada como **Experimental**, pois trata de elementos concretos, em condições de observação e manipulação experimental.

O método utilizado pode ser designado por **Método Indutivo** (MARCONI; LAKATOS, 2000), ou seja, baseando-se em premissas particulares, busca-se levar a uma conclusão mais abrangente e geral. Este trabalho procura reduzir o número de ensaios necessários para a obtenção experimental da equação de Taylor para a vida de ferramenta; para tanto, sugere analisar o comportamento da técnica de Krigagem aplicada ao problema através de casos particulares, e finalmente procura generalizar os resultados obtidos.

3.2 FASES DA PESQUISA

As fases da pesquisa do presente trabalho foram elaboradas com base na proposta de Marconi & Lakatos (2000) como concepção atual do método de pesquisa.

— Descobrimento do problema:

- A obtenção da equação de vida de ferramenta de Taylor pelo método tradicional é muitas vezes inviável devido ao grande número de ensaios necessários para a obtenção de seus coeficientes.

— Colocação precisa do problema:

- Busca de novas maneiras de reduzir o número de ensaios necessários para a obtenção da equação da vida de ferramenta.

— Procura de conhecimentos ou instrumentos relevantes ao problema:

- Detalhamento do método experimental tradicionalmente utilizado.
- Estudo e apresentação da Krigagem como método promissor para análise dos resultados de ensaios mecânicos, e em particular nos ensaios de vida de ferramenta.
- Tentativa de solução do problema com auxílio dos meios identificados:
 - Obtenção dos dados experimentais através de simulação numérica.
 - Aplicação da Krigagem aos dados e observação de seu comportamento.
- Comprovação da solução:
 - Verificação dos resultados obtidos para os coeficientes da equação de vida de ferramenta reduzindo-se o número de ensaios.

3.3 OBTENÇÃO DOS DADOS

O conjunto de dados utilizados neste trabalho foi obtido por meio da função de vida de ferramenta obtida experimentalmente por Kuljanic (1980), apresentada na Equação 31:

$$T = 220,3 * 10^5 * v_c^{-2,8} * f_n^{-0,47} * a_p^{-0,8} \quad (31)$$

Em trabalhos futuros, há planejamento para a utilização dos resultados deste trabalho em ensaios de furação, que apresenta apenas possibilidade de variar a velocidade de corte e o avanço, visto que para a mesma ferramenta a profundidade de corte é constante. Assim, a profundidade de corte foi mantida fixa em 0,1mm. Desta forma, a equação em função apenas da velocidade de corte e avanço resulta na Equação 32:

$$T = 10^{8,143} * v_c^{-2,8} * f_n^{-0,47} \quad (32)$$

Os valores da vida de ferramenta foram obtidos variando-se a velocidade e o avanço dentro dos intervalos estabelecidos a seguir.

3.3.1 Variação dos parâmetros de entrada

Os dados foram obtidos variando-se de forma constante a velocidade de corte de 210 a 290 m/min em nove níveis, com variação de 10 m/min; e variando-se o avanço em três níveis (0,1; 0,3 e 0,5 mm/rotação). Os limites inferiores e superiores foram estabelecidos arbitrariamente, dentro da faixa de valores sugeridos pelo Manual Técnico de Usinagem da Sandvik (2005).

3.3.2 Cálculo da vida a partir da equação de Taylor

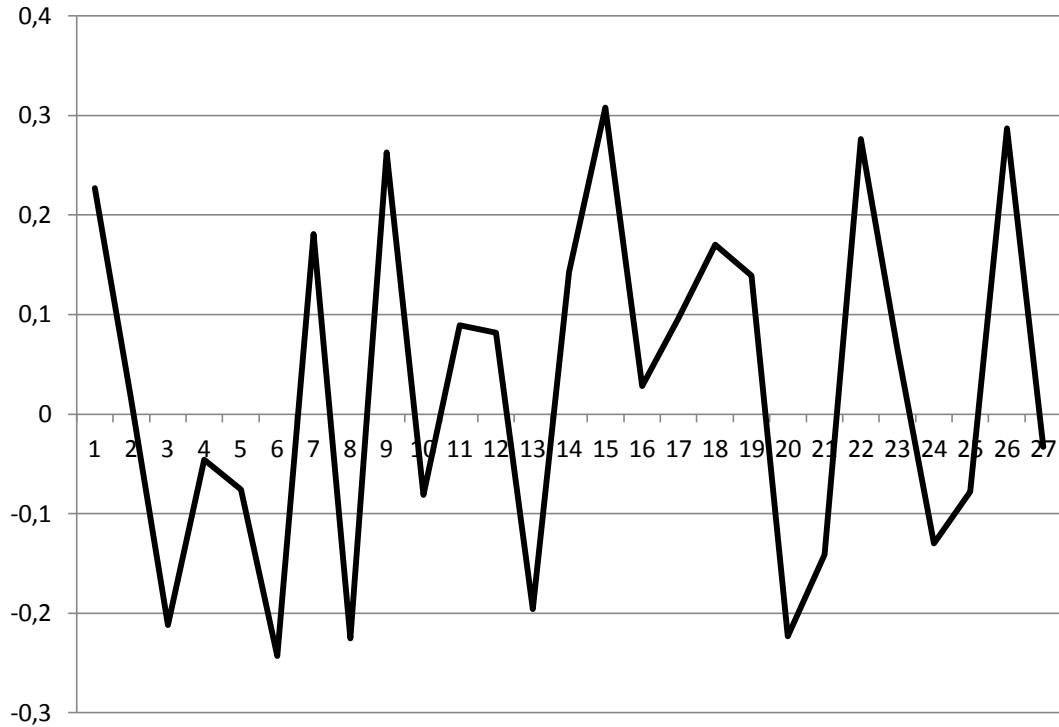
Para que o experimento possa ser comparado ao método tradicional de obtenção da equação de vida de ferramenta, foram obtidos vinte e sete pontos. Como os limites da velocidade de corte definem uma grande amplitude, permitindo uma maior variação, combinaram-se nove valores de velocidade com os três níveis de avanço (0,1; 0,3 e 0,5 mm/rotação). Associou-se um valor de vida para cada um dos pares de velocidade de corte e avanço por rotação, utilizando-se a Equação 30. Desta maneira, foram obtidos os vinte e sete pontos que compõem o conjunto apresentado na Tabela 1.

3.3.3 Simulação da incerteza

Para simular a incerteza de resultados experimentais para a vida de ferramenta, adotou-se como referência o resultado de Axinte et al. (2001). No trabalho citado, observaram-se os resultados de ensaios para vida de ferramenta com uso de diversos fluidos de resfriamento, e a incerteza observada para um número de observações maior que nove foi de 15%, em termos absolutos, ou seja, há uma incerteza média de 15% para mais ou para menos.

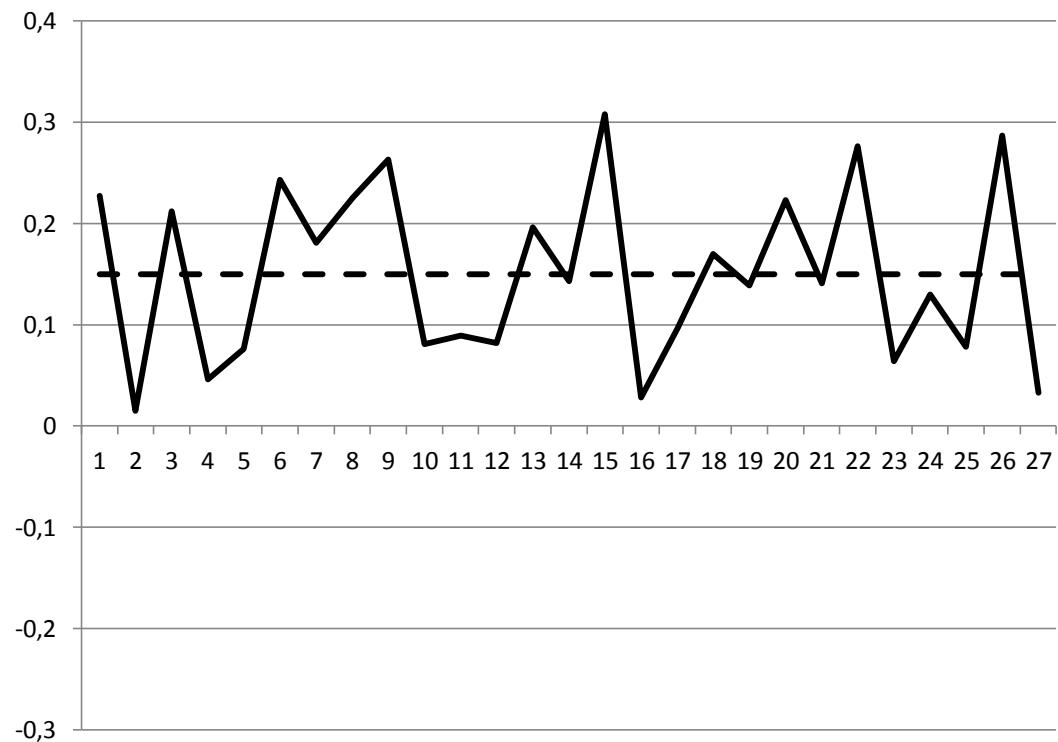
Como não há informações sobre qual o aspecto da função densidade de probabilidade, usou-se uma distribuição uniforme para a perturbação aleatória (ou seja, a função densidade de probabilidade é constante), com média de 15% em termos absolutos. O Gráfico 1 apresenta as incertezas para cada um dos 27 pontos.

Gráfico 1: Incertezas geradas aleatoriamente para cada um dos 27 pontos.



O Gráfico 2 apresenta as incertezas em valores absolutos e explicitando a média igual a 0,15.

Gráfico 2: Incertezas em valores absolutos e a média igual a 0,15.



Os valores foram obtidos pelo gerador de números randômicos do MSExcel, e são apresentados na Tabela 1.

3.3.4 Perturbação dos dados

Após obtidos os valores relativos das perturbações aleatórias para cada ponto, o valor da vida da ferramenta após a perturbação é obtido multiplicando-se a vida calculada pela soma da perturbação aleatória mais um, desta forma a vida terá um acréscimo ou decréscimo, de acordo com a perturbação.

O resultado final é apresentado na Tabela 1, juntamente com os valores dos parâmetros de corte, a vida que foi calculada a partir da Equação 29, e a perturbação aleatória obtida pelo gerador de números randômicos.

Tabela 1: Dados experimentais obtidos por simulação

| Velocidade v_c (m/min) | Avanço f_n (mm/rotação) | Vida da ferramenta calculada T (min) | Perturbação Aleatória (relativa) | Resultado final: Vida após perturbação aleatória (min) |
|-----------------------------|------------------------------|---|--|---|
| 210 | 0,1 | 129,06 | 0,227 | 158,38 |
| 220 | 0,1 | 113,3 | 0,015 | 114,98 |
| 230 | 0,1 | 100,04 | -0,212 | 78,86 |
| 240 | 0,1 | 88,8 | -0,046 | 84,73 |
| 250 | 0,1 | 79,21 | -0,076 | 73,18 |
| 260 | 0,1 | 70,97 | -0,243 | 53,72 |
| 270 | 0,1 | 63,86 | 0,181 | 75,4 |
| 280 | 0,1 | 57,67 | -0,225 | 44,7 |
| 290 | 0,1 | 52,28 | 0,263 | 66,02 |
| 210 | 0,3 | 77,01 | -0,081 | 70,8 |
| 220 | 0,3 | 67,61 | 0,089 | 73,61 |
| 230 | 0,3 | 59,69 | 0,082 | 64,58 |
| 240 | 0,3 | 52,99 | -0,196 | 42,59 |
| 250 | 0,3 | 47,26 | 0,143 | 53,99 |
| 260 | 0,3 | 42,35 | 0,308 | 55,4 |
| 270 | 0,3 | 38,1 | 0,028 | 39,16 |
| 280 | 0,3 | 34,41 | 0,096 | 37,72 |
| 290 | 0,3 | 31,19 | 0,170 | 36,5 |
| 210 | 0,5 | 60,57 | 0,139 | 68,99 |
| 220 | 0,5 | 53,18 | -0,223 | 41,3 |
| 230 | 0,5 | 46,95 | -0,141 | 40,35 |
| 240 | 0,5 | 41,68 | 0,276 | 53,2 |
| 250 | 0,5 | 37,18 | 0,064 | 39,54 |
| 260 | 0,5 | 33,31 | -0,130 | 28,99 |
| 270 | 0,5 | 29,97 | -0,078 | 27,64 |
| 280 | 0,5 | 27,07 | 0,287 | 34,85 |
| 290 | 0,5 | 24,53 | -0,033 | 23,72 |

3.4 DESENVOLVIMENTO

A Krigagem foi aplicada aos dados em duas etapas. Num primeiro momento, foram realizados testes com os dados e a aplicação do método para avaliar os resultados.

Em seguida aplicou-se a Krigagem a conjuntos de dados reduzidos, com apenas 9 pontos, para verificar a eficiência da técnica e o erro inerente ao processo.

3.4.1 Teste com a Krigagem no tratamento dos dados

Segundo Gunes (2008), em fenômenos modelados por funções monótonas (que apresentam tendência de crescimento ou decrescimento apenas) como a equação de vida de ferramenta a Krigagem se comporta bem. Para verificar o comportamento da Krigagem perante os dados obtidos na Tabela 1, aplicou-se a técnica com o objetivo de suavizar os dados originais.

Porém, como os dados apresentam tendência de decréscimo a medida que os parâmetros aumentam, iniciou-se o processo com a retirada da tendência, conforme rege a Krigagem com tendência (CAMARGO, 1998).

3.4.1.1 Retirada da tendência

Como, no caso estudado, os valores da vida diminuem a medida que os parâmetros de corte aumentam, existe uma tendência de decrescimento nos dados. Então é necessário utilizar a Krigagem com tendência. Antes de começar a interpolação linear é preciso retirar a tendência dos dados, e para isso encontra-se uma função linear por regressão linear.

Para que a tendência seja retirada dos dados, é necessário que ajuste-se uma função linear de v_c (velocidade de corte) e f_n (avanço por rotação) aos dados originais por regressão linear. Neste trabalho a regressão foi feita no Scilab 5.3.2 (Apêndice A) para encontrar os coeficientes da função linear.

A função encontrada é apresentada na Equação 33:

$$t(v_c, f_n) = 285,15612 - 0,7708903v_c - 92,365306f_n \quad (33)$$

A Tabela 2 mostra os valores da vida e da tendência calculada para a velocidade e o avanço em cada ponto. A última coluna apresenta o resíduo utilizado na interpolação, obtido a partir da subtração da tendência (quarta coluna) dos valores de vida (terceira coluna).

Tabela 2: Retirada da tendência

| Velocidade v_c (m/min) | Avanço F_n (mm/rotação) | Vida após perturbação aleatória (min) | Tendência (min) | Dados sem tendência (min) |
|-----------------------------|------------------------------|---|-----------------|---------------------------------|
| 210 | 0,1 | 158,38 | 114,03 | 44,35 |
| 220 | 0,1 | 114,98 | 104,74 | 10,24 |
| 230 | 0,1 | 78,86 | 98,61 | -19,75 |
| 240 | 0,1 | 84,73 | 90,91 | -6,18 |
| 250 | 0,1 | 73,18 | 83,20 | -10,02 |
| 260 | 0,1 | 53,72 | 75,49 | -21,77 |
| 270 | 0,1 | 75,4 | 67,70 | 7,70 |
| 280 | 0,1 | 44,7 | 60,07 | -15,37 |
| 290 | 0,1 | 66,02 | 52,36 | 13,66 |
| 210 | 0,3 | 70,8 | 95,56 | -24,76 |
| 220 | 0,3 | 73,61 | 87,85 | -14,24 |
| 230 | 0,3 | 64,58 | 78,78 | -14,20 |
| 240 | 0,3 | 42,59 | 72,43 | -29,84 |
| 250 | 0,3 | 53,99 | 64,72 | -10,73 |
| 260 | 0,3 | 55,4 | 57,02 | -1,62 |
| 270 | 0,3 | 39,16 | 49,31 | -10,15 |
| 280 | 0,3 | 37,72 | 41,74 | -4,02 |
| 290 | 0,3 | 36,5 | 33,89 | 2,61 |
| 210 | 0,5 | 68,99 | 77,09 | -8,10 |
| 220 | 0,5 | 41,3 | 69,38 | -28,08 |
| 230 | 0,5 | 40,35 | 61,67 | -21,32 |
| 240 | 0,5 | 53,2 | 52,82 | 0,38 |
| 250 | 0,5 | 39,54 | 46,25 | -6,71 |
| 260 | 0,5 | 28,99 | 38,54 | -9,55 |
| 270 | 0,5 | 27,64 | 30,83 | -3,19 |
| 280 | 0,5 | 34,85 | 23,12 | 11,73 |
| 290 | 0,5 | 23,72 | 15,42 | 8,30 |

3.4.1.2 Suavização dos dados experimentais

Segundo Gunes (2008), a Krigagem pode ser usada para suavizar os dados, ou seja, como um filtro dos dados.

Para suavizar os dados originais, encontrou-se um conjunto suavizado com 24 pontos, com 8 velocidades variando de 215 a 285m/min, e avanços de 0,1mm, 0,3mm, e 0,5mm. Para encontrar estes valores aplicou-se a Krigagem ordinária. A Tabela 3 apresenta os resultados.

Tabela 3: Resultado da suavização dos dados originais

| Velocidade v_c (m/min) | Avanço f_n (mm/rotação) | Resultado da Krigagem Ordinária (min) | Tendência (min) | Resultado da Krigagem com tendência (min) | Vida calculada com a equação (21) (min) |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------------------|-----------------|---|---|
| 215 | 0,1 | 20,22 | 110,18 | 130,4 | 120,83 |
| 225 | 0,1 | -0,53 | 102,47 | 101,94 | 106,39 |
| 235 | 0,1 | -8,90 | 94,76 | 85,86 | 94,19 |
| 245 | 0,1 | -8,42 | 87,05 | 78,63 | 83,82 |
| 255 | 0,1 | -11,59 | 79,34 | 67,75 | 74,94 |
| 265 | 0,1 | -6,57 | 71,63 | 65,06 | 67,29 |
| 275 | 0,1 | -3,30 | 63,92 | 60,62 | 60,66 |
| 285 | 0,1 | 0,08 | 56,22 | 56,3 | 54,88 |
| 215 | 0,3 | -19,48 | 91,71 | 72,23 | 72,1 |
| 225 | 0,3 | -15,80 | 84,00 | 68,2 | 63,48 |
| 235 | 0,3 | -21,71 | 76,29 | 54,58 | 56,21 |
| 245 | 0,3 | -19,23 | 68,58 | 49,35 | 50,02 |
| 255 | 0,3 | -7,27 | 60,87 | 53,6 | 44,72 |
| 265 | 0,3 | -6,14 | 53,16 | 47,02 | 40,15 |
| 275 | 0,3 | -6,50 | 45,45 | 38,95 | 36,19 |
| 285 | 0,3 | -1,06 | 37,74 | 36,68 | 32,75 |
| 215 | 0,5 | -22,98 | 73,23 | 50,25 | 56,71 |
| 225 | 0,5 | -11,73 | 65,52 | 53,79 | 49,93 |
| 235 | 0,5 | -5,20 | 57,81 | 52,61 | 44,21 |
| 245 | 0,5 | -7,51 | 50,11 | 42,6 | 39,34 |
| 255 | 0,5 | -5,39 | 42,40 | 37,01 | 35,17 |
| 265 | 0,5 | 3,40 | 34,69 | 38,09 | 31,58 |
| 275 | 0,5 | 8,25 | 26,98 | 35,23 | 28,47 |
| 285 | 0,5 | 4,00 | 19,27 | 23,27 | 25,76 |

Os Gráficos de 3 a 5 ilustram de forma comparativa os resultados obtidos nesta etapa. Os três Gráficos foram construídos em curvas de nível, ou seja, para três valores do avanço (em mm/rotação), os gráficos apresentam os valores de vida em

função da velocidade. Os Gráficos 3 e 4 apresentam respectivamente os valores calculados a partir da Equação 30, e os valores após a perturbação aleatória, presentes na tabela e em comparação com os dados perturbados, ambos apresentados na Tabela 1. O Gráfico 5 apresenta o resultado da suavização, apresentado na Tabela 3.

Uma comparação visual dos três Gráficos permite perceber que uma grande diferença entre a Gráfico 3 e o Gráfico 4 em consequência da perturbação aleatória.

Após o processo de suavização, obtém-se o Gráfico 5, que se aproxima bastante do Gráfico 1: as curvas de nível presentes no Gráfico 5 aproximam-se mais daquelas vistas no gráfico do Gráfico 3. Isso mostra que a Krigagem agiu como filtro nos dados perturbados, suavizando-os. Este resultado é consonante com o obtido por Gunes (2008), após suavizar uma função conhecida acrescida de uma perturbação aleatória. Como a aplicação da Krigagem para suavização em dados referentes à vida de ferramenta em função de parâmetros de corte (v_c : velocidade de corte, e f_n : avanço da ferramenta) respondeu da forma esperada, essa constatação fornece bons indícios de que a técnica pode ser aplicada ao problema de obtenção da equação de vida de ferramenta de forma satisfatória.

Gráfico 3: Vida calculada (Tabela 1)

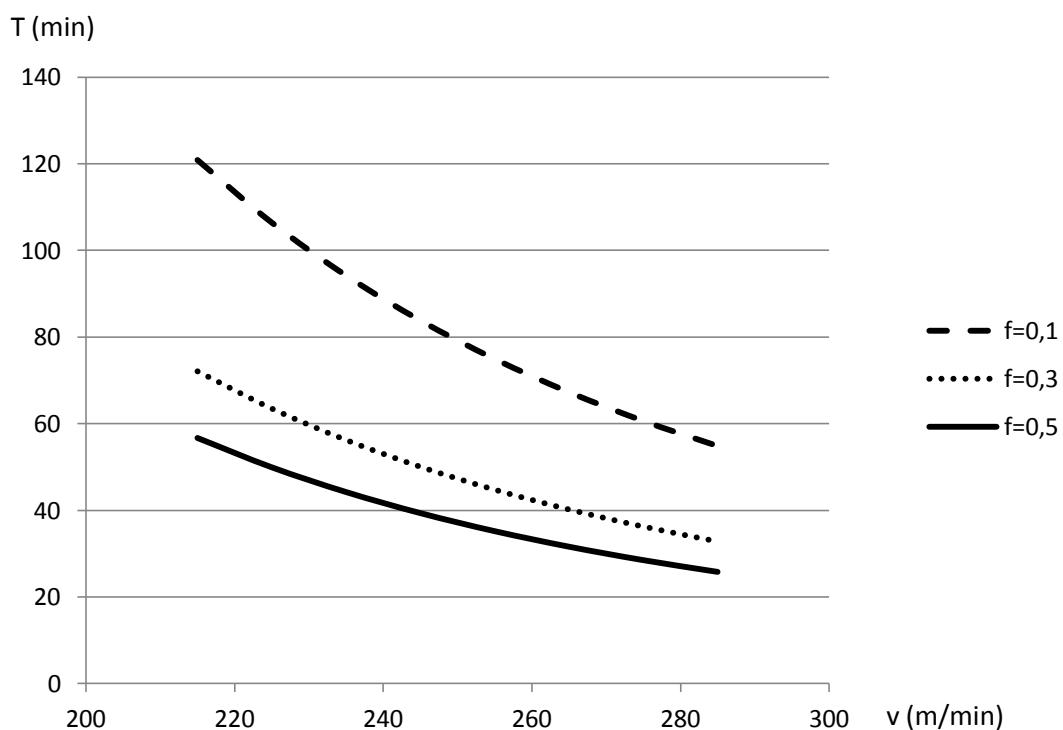


Gráfico 4: Vida após perturbação aleatória (Tabela 1)

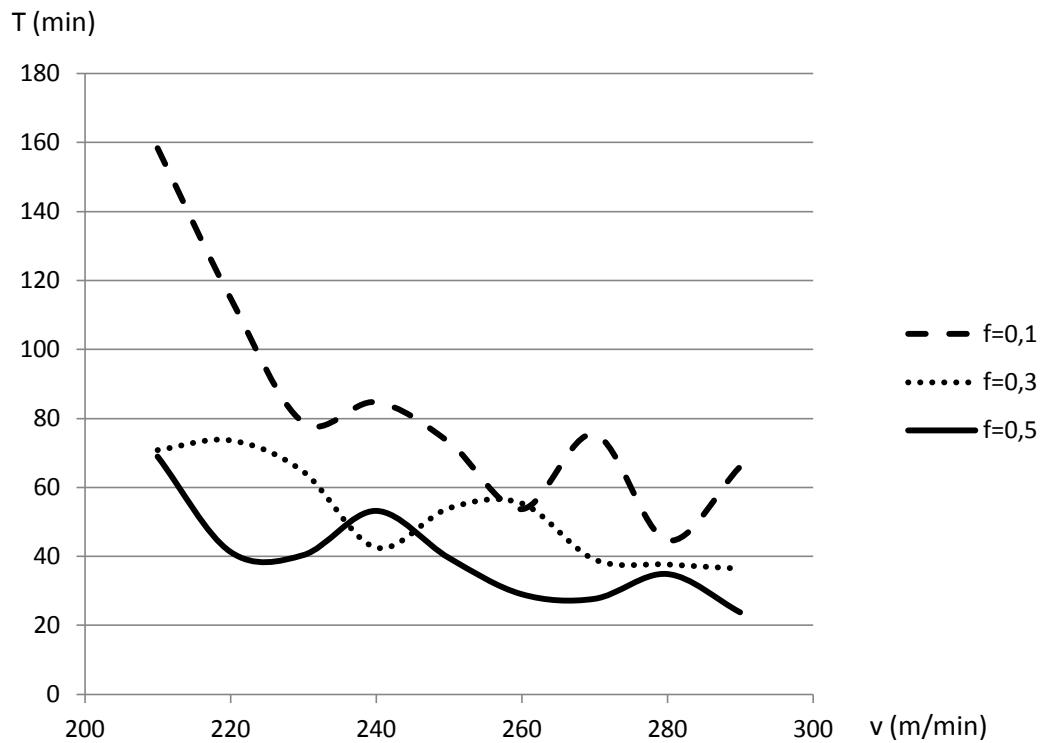
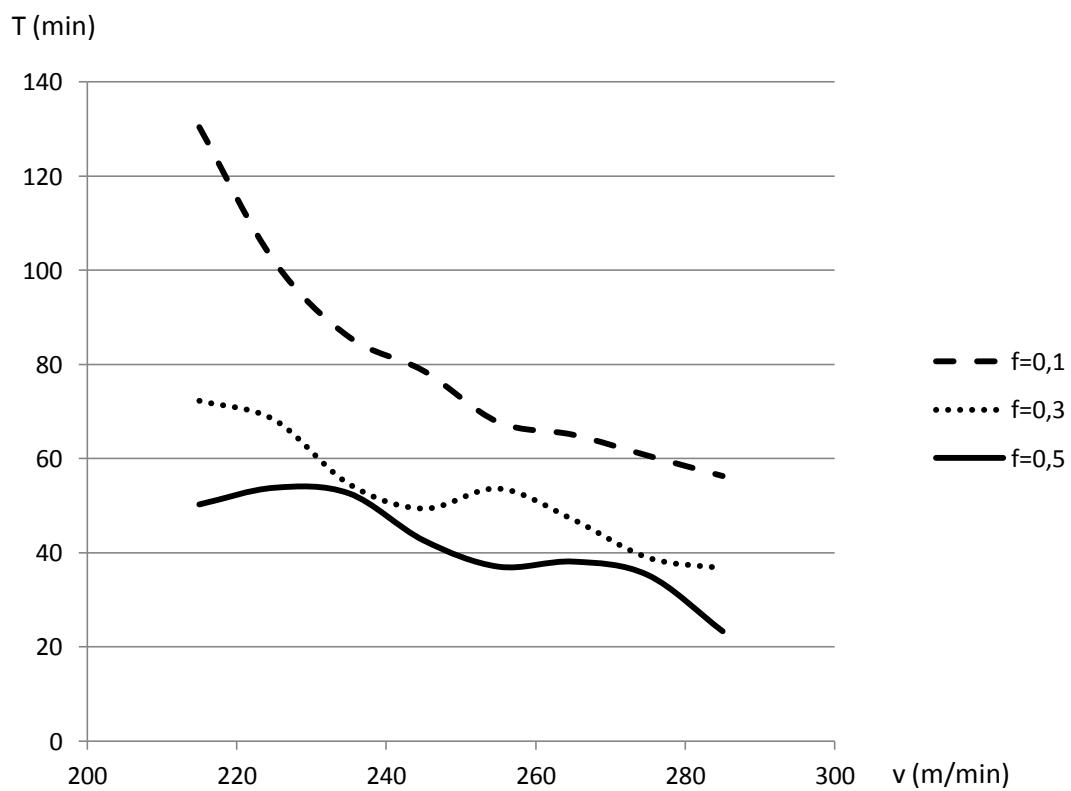


Gráfico 5: Resultado do processo de suavização (Tabela 3).



3.4.2 Obtenção da equação de vida de ferramenta

Para avaliar a obtenção da equação de vida de ferramenta com um número menor de ensaios, a Krigagem foi utilizada a partir de um conjunto com nove resultados retirados dos vinte e sete valores calculados na Tabela 1.

A partir deste conjunto de dados menor que o tradicionalmente utilizado, aplicou-se a Krigagem de modo a recompor os dezoito resultados retirados do conjunto inicial de dados. Os novos pontos obtidos por interpolação por meio da Krigagem foram avaliados em relação aos pontos originais.

3.4.2.1 Conjunto reduzido de dados

Segundo Gunes (2008), a Krigagem pode ser utilizada para recompor dados perdidos referentes a uma região fechada, bem como dados retirados de forma sistemática, isto é, retirando-se resultados em intervalos constantes. Ao conjunto que resulta da retirada de parte dos dados aplica-se a Krigagem com o objetivo de recompor estes pontos.

Para retirar de forma uniforme um conjunto com nove dados a partir dos vinte e sete dados presentes na Tabela 2, foram utilizados valores inicial e final da velocidade, e o meio aritmético, ou seja: 210, 250 e 290m/min. Para cada uma das velocidades mantiveram-se os resultados para os três avanços presentes na Tabela 2.

Combinando-se os três valores da velocidade com os três valores de avanço, resultam nove pares. Os valores de vida para estes nove pares são fornecidos pela Tabela 2, e apresentados na Tabela 4. Este novo conjunto de valores foi utilizado para recompor os 18 dados retirados do conjunto original.

Tabela 4: Conjunto reduzido de dados.

| Velocidade de corte v_c (m/min) | Avanço f_n (mm/ rotação) | Dados sem tendência (min) |
|---|-------------------------------|---------------------------------|
| 210 | 0,1 | 44.35 |
| 250 | 0,1 | -10,02 |
| 290 | 0,1 | 13.66 |
| 210 | 0,3 | -24,76 |
| 250 | 0,3 | -10,73 |
| 290 | 0,3 | 2,61 |
| 210 | 0,5 | -8,10 |
| 250 | 0,5 | -6,71 |
| 290 | 0,5 | 8,30 |

3.4.2.2 Recomposição dos dados

Aplicando-se a Krigagem ordinária aos dados sem tendência da Tabela 4, interpolaram-se 18 pontos para os pares de velocidade e avanço de modo a recompor a amostra original, e adicionou-se a tendência. A Tabela 5 apresenta os resultados da interpolação juntamente com os valores originais do conjunto reduzido presentes na Tabela 4, os quais aparecem seguidos por (*) na coluna à direita. Os demais valores foram resultado da recomposição realizada por meio da Krigagem.

Tabela 5: Conjunto com 27 dados obtidos a partir do conjunto reduzido.

| Velocidade v_c (m/min) | Avanço f_n (mm/rotação) | Dados sem tendência (min) | Tendência (min) | Vida de ferramenta (min) | Valores originais |
|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------|
| 210 | 0,1 | 44,35 | 114,03 | 158,38 | * |
| 220 | 0,1 | 16,46 | 104,74 | 121,2 | |
| 230 | 0,1 | 8,89 | 98,61 | 107,5 | |
| 240 | 0,1 | 2,99 | 90,91 | 93,9 | |
| 250 | 0,1 | -10,02 | 83,20 | 73,18 | * |
| 260 | 0,1 | -0,69 | 75,49 | 74,8 | |
| 270 | 0,1 | 1,5 | 67,70 | 69,2 | |
| 280 | 0,1 | 2,93 | 60,07 | 63 | |
| 290 | 0,1 | 13,66 | 52,36 | 66,02 | * |
| 210 | 0,3 | -24,76 | 95,56 | 70,8 | * |
| 220 | 0,3 | -18,65 | 87,85 | 69,2 | |
| 230 | 0,3 | -15,88 | 78,78 | 62,9 | |
| 240 | 0,3 | -16,03 | 72,43 | 56,4 | |
| 250 | 0,3 | -10,73 | 64,72 | 53,99 | * |
| 260 | 0,3 | -11,82 | 57,02 | 45,2 | |
| 270 | 0,3 | -8,71 | 49,31 | 40,6 | |
| 280 | 0,3 | -5,74 | 41,74 | 36 | |
| 290 | 0,3 | 2,61 | 33,89 | 36,5 | * |
| 210 | 0,5 | -8,10 | 77,09 | 68,99 | * |
| 220 | 0,5 | -11,28 | 69,38 | 58,1 | |
| 230 | 0,5 | -9,87 | 61,67 | 51,8 | |
| 240 | 0,5 | -7,52 | 52,82 | 45,3 | |
| 250 | 0,5 | -6,71 | 46,25 | 39,54 | * |
| 260 | 0,5 | -3,74 | 38,54 | 34,8 | |
| 270 | 0,5 | 0,07 | 30,83 | 30,9 | |
| 280 | 0,5 | 3,88 | 23,12 | 27 | |
| 290 | 0,5 | 8,30 | 15,42 | 23,72 | * |

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para avaliar a eficiência do método, a Equação 35 obtida a partir dos dados da Tabela 5 será comparada com a função que originou os dados (Equação 32). Para que fosse possível avaliar as consequências de se utilizar apenas nove pontos, também foi avaliado o resultado obtido com a utilização do conjunto completo dos dados.

4.1 MÉTODO TRADICIONAL DE OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO DE VIDA DE FERRAMENTA POR REGRESSÃO

Tradicionalmente, são feitas as vinte e sete observações, e a partir delas são obtidos os coeficientes da equação de vida de ferramenta. Utilizando-se a regressão (como exemplificado no Apêndice A), a partir os valores da Tabela 1 obteve-se a Equação 34:

$$T = 10^{7,983} * v_c^{-2,73} * f_n^{-0,46}, \quad (34)$$

4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Para verificar a acurácia do resultado obtido pela Krigagem em relação aos vinte e sete pontos originais, foram calculados os erros relativos dos resultados obtidos pela equação 34 e o resultado da Krigagem, como é apresentado na Tabela 6. O erro da equação 34 foi calculado para todos os 27 pontos, enquanto que o erro da Krigagem foi calculado apenas para os pontos interpolados, e não para os pontos do conjunto reduzido, pois nestes o erro não teria sentido, visto que os valores são os mesmos.

Tabela 6. Equação original, e as equações obtidas por meio dos dados gerados.

| Velocidade de corte (m/min) | Avanço por rotação (mm/rotação) | Vida da ferramenta (min) | | | Erro percentual | |
|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------|----------|-----------------|----------|
| | | Dados originais | Equação 34 | Krigagem | Equação 34 | Krigagem |
| 210 | 0,1 | 158,38 | 126,86 | 158,38 | 19,90% | - |
| 220 | 0,1 | 114,98 | 111,73 | 121,2 | 2,83% | 5,57% |
| 230 | 0,1 | 78,86 | 98,97 | 107,5 | 25,50% | 28,94% |
| 240 | 0,1 | 84,73 | 88,11 | 93,9 | 3,99% | 10,41% |
| 250 | 0,1 | 73,18 | 78,82 | 73,18 | 7,71% | - |
| 260 | 0,1 | 53,72 | 70,81 | 74,8 | 31,81% | 29,77% |
| 270 | 0,1 | 75,4 | 63,88 | 69,2 | 15,28% | 9,71% |
| 280 | 0,1 | 44,7 | 57,84 | 63 | 29,40% | 31,64% |
| 290 | 0,1 | 66,02 | 52,56 | 66,02 | 20,39% | - |
| 210 | 0,3 | 70,8 | 76,54 | 70,8 | 8,11% | - |
| 220 | 0,3 | 73,61 | 67,41 | 69,2 | 8,42% | 6,54% |
| 230 | 0,3 | 64,58 | 59,70 | 62,9 | 7,56% | 2,81% |
| 240 | 0,3 | 42,59 | 53,16 | 56,4 | 24,82% | 25,98% |
| 250 | 0,3 | 53,99 | 47,55 | 53,99 | 11,93% | - |
| 260 | 0,3 | 55,4 | 42,72 | 45,2 | 22,89% | 23,88% |
| 370 | 0,3 | 39,16 | 38,54 | 40,6 | 1,58% | 3,74% |
| 280 | 0,3 | 37,72 | 34,90 | 36 | 7,48% | 4,93% |
| 290 | 0,3 | 36,5 | 31,71 | 36,5 | 13,12% | - |
| 210 | 0,5 | 68,99 | 60,51 | 68,99 | 12,29% | - |
| 220 | 0,5 | 41,3 | 53,29 | 58,1 | 29,03% | 31,53% |
| 230 | 0,5 | 40,35 | 47,20 | 51,8 | 16,98% | 24,26% |
| 240 | 0,5 | 53,2 | 42,02 | 45,3 | 21,02% | 18,80% |
| 250 | 0,5 | 39,54 | 37,59 | 39,54 | 4,93% | - |
| 260 | 0,5 | 28,99 | 33,78 | 34,8 | 16,52% | 17,20% |
| 270 | 0,5 | 27,64 | 30,47 | 30,9 | 10,24% | 10,70% |
| 280 | 0,5 | 34,85 | 27,59 | 27 | 20,83% | 28,45% |
| 290 | 0,5 | 23,72 | 25,07 | 23,72 | 5,69% | - |

A partir destes resultados, é possível verificar o quanto os valores calculados por meio das Equações 34 e da Krigagem se aproximam dos valores obtidos pela Equação 32.

A Tabela 7 apresenta os erros máximos, médios e mínimos em relação à função original, possibilitando avaliar qual foi a perda de precisão ao adotarmos um número menor de pontos e então aumentar-se esta quantidade através da Krigagem.

Tabela 7. Erro das funções obtidas por regressão em relação à função original.

| Equação | Erro mínimo (%) | Erro médio (%) | Erro máximo (%) |
|--------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Método tradicional | 1,58 | 14,82 | 31,81 |
| Krigagem | 2,81 | 17,49 | 31,64 |

A Tabela 7 permite perceber que existe um aumento dos erros mínimo e médio quando se utilizam menos resultados experimentais como ponto de partida, porém é importante perceber que o erro máximo foi ligeiramente menor. De maneira geral, os erros dos dois métodos foram bastante próximos. Embora haja uma leve redução da precisão (em média) é importante ressaltar que a redução do número de ensaios em 66,67%, torna-o mais rápido e econômico, o que justifica esta redução.

5 CONCLUSÕES

Os resultados do experimento mostraram que ao aplicar a Krigagem a um conjunto pequeno de ensaios (9 ensaios) é possível obter resultados representativos no problema da obtenção da equação de vida de ferramenta.

Em resposta aos objetivos da pesquisa, a comparação dos resultados da abordagem tradicional para obtenção da função de vida de ferramenta com a geração de pontos por interpolação utilizando a Krigagem permite verificar que apesar do erro aumentar ligeiramente, ainda assim o mesmo não é grande o suficiente para inviabilizar o resultado. A aplicação da Krigagem para simplificar o processo experimental de levantamento da curva de vida de uma ferramenta demonstrou um resultado consistente e promissor, tornando o experimento mais barato e mais rápido.

A redução do número de ensaios de 27 para 9, reduz de forma muito significativa a quantidade de material usinado, bem como o uso de ferramentas de corte, barateando o experimento, tornando-o mais viável. Da mesma maneira, a redução do número de ensaios reduz o tempo necessário para o ensaio, liberando a máquina para outras utilizações.

Paralelamente, foi verificada a aplicabilidade da Krigagem ao problema de levantamento experimental da equação de vida de ferramenta, bem como o efeito do pequeno número de ensaios e seu efeito no resultado final em relação a um conjunto maior.

A Krigagem apresentou resultados promissores ao ser utilizada para reamostragem, compondo conjuntos maiores de dados a partir de conjuntos iniciais menores, com resultados satisfatórios.

5.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

A verificação dos resultados apresentados neste trabalho através de experimentos reais para obtenção de vida de ferramenta configura o passo seguinte deste trabalho. Com dados reais obtidos, o procedimento pode ser refeito e os resultados

finais comparados com os obtidos neste trabalho por meio dos dados obtidos por simulação.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- ADHIKARY, P. Indicator and probability Kriging methods for delineating Cu, Fe, and Mn contamination in groundwater of Najafgarh Block. **Environ Monit Assess.**, Delhi, India; v. 176, p. 663–676, 2011.
- AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade, e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro.** Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2002.
- AXINTE, D. A.; BELLUCO, W.; DE CHIFFRE, L. Reliable tool life measurements in turning — an application to cutting fluid efficiency evaluation. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 41, p.1003–1014, 2001.
- BADEL, M.; ANGORANI S.; PANAHİ, M. S.; The application of median indicator Kriging and neural networkin modeling mixed population in an iron ore deposit. **Computer & Geosciences**, vol. 37, p. 530-540, 2011.
- BAPTISTA, E. A.; COPPINI, N. L. Maximizando o lucro: otimizando processos de usinagem com auxílio de sistema especialista. **XXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP 2001.** Salvador, 2001.
- BAPTISTA, E. A.; **Desenvolvimento de um sistema especialista para a otimização do processo de usinagem baseado na web.** Tese de doutorado. Universidade Metodista de Piracicaba, UNIMEP. Santa Bárbara D'Oeste, SP. 2004.
- BERVEGLIERI, A.; Classificação Fuzzy de vertentes por thin-plate spline e Krigagem com comparação de resultados. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 64/1, p. 69-82, 2012.
- BOUJELBENE, M.; et al. Variation Cutting Speed on the Five Axis Milling. **Journal of Archivmentin Materials and Manufacturing Engineering.** v. 21, n. 2, 2007.
- BUI, T. Q.; NGUYEN, M. N. A moving Kriging interpolation-based meshfree method for free vibration analysis of Kirchhoff plates. **Computers and Structures**, v. 89, p. 380–394, 2011.
- CAMARGO, E.C.G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. **Geoprocessamento em projetos ambientais.** In: INPE, SP, Brasil. p. 1-36, 1998.

- CHEN, J.C.; CHEN, J.C. An artificial-neural-networks-based in-process tool wear prediction system in milling operations. **International Journal Advance Manufacturing Technology**, v. 25, p. 427–434, 2005.
- CHEN, L.; LIEW, K. M. A local Petrov-Galerkin approach with moving Kriging interpolation for solving transient heat conduction problems. **Computational Mechanics** v. 47, p. 455–467. 2011.
- CURRY, B.; MORGAN, P.H. Model selection in Neural Networks: Some difficulties. **European Journal of Operational Research**, v.170, p.567–577, 2006.
- COPPINI N. L., BAPTISTA E. Alternativa de otimização dos parâmetros de corte para cenários de fabricação em usinagem. **XVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – XVIII ENEGEP**, Niterói, RJ, 1998.
- CORRÊA JR., G. A.; et al. Levantamento da curva de vida da ferramenta de usinagem: uma investigação para a redução do número de ensaios. **CONEM, VII Congresso de Engenharia Mecânica**, Agosto, 2012.
- DALL'ANESE, E.; KIM, S. J.; GIANNAKIS, G. B. Channel Gain Map Tracking via Distributed Kriging. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**. v. 60, n. 3, p. 1205-1211, 2011.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. N. Y., 2ed., John Wiley, 1981.
- GUNES, H.; CEKLI, H.; RIST, U. Data Enhancement, Smoothing, Reconstructionand Optimization by Kriging Interpolation. **Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference**. 2008.
- HOFFMMAN, R. **Análise de regressão**, São Paulo, Edusp, 1982.
- IMAI, N. N.; et al. Análise comparativa da interpolação por krigagem ordinária e krigagem por indicação no caso de ervas daninhas em cultura de soja. **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Cartografia**, 2003, Belo Horizonte. Rio de Janeiro : Sociedade Brasileira de Cartografia - SBC, v. CDROM, 2003.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. R.. **Applied Geostatistics**, Oxford University Press, Oxford, New York, p. 560, 1989.

JU, F.; BARROW, G. A.. Technologically Oriented Approach for the Economic Tool Selection and Tool Balancing of Milled Components. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 13, p. 107-320, 1998.

KARL, J. W. Spatial Predictions of Cover Attributes of Rangeland Ecosystems Using Regression Kriging and Remote Sensing. **Rangeland Ecology & Management**, vol. 63, n. 3, p. 335-349, 2010.

KAVIANI, D.; BUI, T. D.; JENSEN, J. L.; HANKS, C.L. The Application of Artificial Neural Networks With Small Data Sets: An Example for Analysis of Fracture Spacing in the Lisburne Formation. **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, v. 11, n. 3, p. 598-605, 2008.

KARL, J. W. Spatial Predictions of Cover Attributes of Rangeland Ecosystems Using Regression Kriging and Remote Sensing. **Rangeland Ecology & Management**, vol. 63/3, p. 335-349, 2010.

KHODAPARAST, H. H.; MOTTERSHEAD, J. E.; BADCOCK, K. J. Interval model updating with irreducible uncertainty using the Kriging predictor. **Mechanical Systems and Signal Processing**, vol 25, p. 1204–1226, 2011.

KULJANIC, E. Random Strategy Method for Determining Tool Life Equation. **Annals of CIRP**, v. 29, 1980.

LANDIM, P.M.B., STURARO, J.R. & MONTEIRO, R. C. **Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada**. DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatématica, Texto Didático, p. 06-12, 2002.

LARGUECHE F. Z. Estimating Soil Contamination with Kriging Interpolation Method; **American Journal of Applied Sciences**, v. 3, n. 6, p. 1894-1898, 2006.

LEBAAL, N.; NOUARI, M.; GINTING, A. A new optimization approach based on Kriging interpolation and sequential quadratic programming algorithm for end milling refractory titanium alloys. **Applied Soft Computing**, p. 5110-5119, 2011.

LEBENSZTAJN, L. Kriging: a useful tool for electromagnetic device optimization. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 40, n. 2, p. 1196-1199, 2004.

LI, M.; LI, G; AZARM, S. A Kriging Metamodel Assisted Multi-Objective Genetic Algorithm for Design Optimization. **Journal of Mechanical Design**, v. 130, n.3, p.1-10, 2008.

- LI, Y. Can the spatial prediction of soil organic matter contents at various sampling scales be improved by using regression kriging with auxiliary information? **Geoderma**, vol. 159, p. 63-75, 2010.
- LIU, H.; MAGHSOODLOO, S. Simulation optimization based on Taylor Kriging and evolutionary algorithm. **Applied Soft Computing**, v. 11, p. 3451–3462, 2001.
- MARCONI, M.; LAKATOS, E. M. **Metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2000.
- MARQUES, A. P. S. Aplicação do interpolador Krigagem Ordinária para a elaboração de planta de valores genéricos. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 64/2, p. 175-186, 2012.
- MARRETO, C. A. R. **Modelos estatísticos na otimização de equipamentos eletromecânicos**. Tese de doutorado. Escola Politécnica da USP. 2004.
- MELO JR., J. C. F. et al. Distribuição espacial da frequência de chuvas na região hidrográfica do Atlântico, Leste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 417-425, 2006.
- MENG, Q.; ARSECULARATNE, J.A.; MATHEW, P. Calculation of optimum cutting conditions for turning operations using a machining theory, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 40, p. 1709–1733, 2000.
- MORIWAKI, T.; TANGJITSITCHAROEN, S.; SHIBASAKA, T. Development of Sequential Optimization Method for CNC Turning Based on In-Process Tool Wear Monitoring. **JSME International Journal**, Series C, v. 48, n. 4, 2005.
- MORETIN, P. A.; TOLOI, C. M. **Análise de séries temporais**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- NABETA, S. I.; et al. Mitigation of the Torque Ripple of a Switched Reluctance Motor Through a Multiobjective Optimization. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 44, n. 6, p. 1018-1021, 2008.
- OJHA, D.K.; DIXIT, U.S. An economic and reliable tool life estimation procedure for turning, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 26, p. 726–732, 2005.
- PRADO, K. R. M. ; ROSA J. M.; SANTANA J. C. C. ; TAMBOURGI, E. ; ALVES, W. A. L. ; PEREIRA, F. H. A Bootstrapped Neural Network Model Applied to Prediction

of the Biodegradation Rate of Reactive Black 5 Dye. **Acta Scientiarum. Technology** (Impresso), 2013. No Prelo.

PANCHAL, G., GANATRA, A., SHAH, P., PANCHAL, D. Determination of over-learning and over-fitting problem in back propagation neural network. **International Journal on Soft Computing**, v. 2, n. 2, p. 40-51, 2011.

PEI, T.; ET AL. Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: A comparative study based on different flow-direction algorithms and kriging methods. **Ecological Indicators**, v. 10, p. 610–619, 2010.

PESQUER, L.; CORTÉS, A.; XAVIER, P. Parallel ordinary Kriging interpolation incorporating automatic variogram fitting. **Computers&Geosciences**, vol.37, p. 464 – 473, 2011.

PRASZKIEWICZ, I. K. Application of artificial neural network for determination of standard time in machining. **Journal Intelligent Manufacturing** , v. 19, p. 233–240, 2008.

RICK, H. Statistical strategies for small sample research. **Sage Publications Inc.**, Thousand Oaks, California, 1999.

SANDIVIK COROMANT. **MANUAL TÉCNICO DE USINAGEM**. Publicado por Sandvik Coromant. Suécia, 2005.

SANTOS, A. L. B. **Metodologia via redes neurais para a estimativa da rugosidade e do desgaste de ferramentas de corte no processo de fresamento frontal**. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG. 2001.

SHYU, G.; et al. Applying Factor Analysis Combined with Kriging and Information Entropy Theory for Mapping and Evaluating the Stability of Groundwater Quality Variation in Taiwan. **Int. J. Environ. Res. Public Health**, vol. 8, p. 1084-1109, 2011.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 21 ed. São Paulo, Cortez, 2001.

SOUZA, A. C.; et al. Condições econômicas no processo de usinagem: uma abordagem para consideração dos custos. **VII Congresso do Instituto Internacional de Custos**, Leon, Espanha, 2001.

- TOLOSANA-DELGADO, R.; et al. Wave height data assimilation using non-stationary kriging. **Computers & Geosciences**, v. 37, p. 363–370, 2011.
- VEIGA, R. D.; SÁFADI, T. **Textos Acadêmicos: Análise de regressões e séries temporais**, Lavras, UFLA/FAEPE, 2000.
- WAN, M.; ZHANG, W.H.; DANG, J.W.; YANG, Y. A unified stability prediction method for milling process with multiple delays. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.50, p.29–41, 2010.
- WANG, W . A prognosis model for wear prediction based on oil-based monitoring. **Journal of the Operational Research Society**, v.58, p.887–893, 2007.
- XAVIER, A. C.; CECÍLIO, R. A.; LIMA, J. S. Módulos em Matlab para interpolação espacial pelo método de Krigagem Ordinária e do inverso da distância. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 62, n.01, p. 67-76, 2010.
- XIE, Y.; et al. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis. **Chemosphere**, v. 82, p. 468-476, 2011.
- XING, Y.L.; CHUN, Y.Y.; BANG, Y.Y. Neural network adaptive control for machining process based on generalized entropy square error and wavelet analysis. **International Journal of Manufacturing Technology and Management**, v.17, n.3, p. 246-260, 2009.
- YU, C. H. Resampling methods: concepts, applications, and justification. **Practical Assessment, Research & Evaluation**, v.8, n. 19, 2003.

APÊNDICE A – Regressão utilizando Scilab 5.3.2

Problema:

Seja f uma propriedade que varia em função de dois parâmetros independentes x_1 e x_2 . Havendo um conjunto de n pontos nos quais encontra-se experimentalmente um valor de f para cada par de valores de x_1 e x_2 .

Buscam-se os coeficientes de uma curva de regressão linear com as seguintes características:

$$f(x_1, x_2) = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2.$$

Procedimento:

Para tal seguem-se as seguintes etapas:

1) Cria-se as seguintes matrizes:

X_0 , matriz coluna com n elementos iguais a 1.

X_1 , matriz coluna com n elementos correspondentes aos valores do parâmetro x_1 .

X_2 , matriz coluna com n elementos correspondentes aos valores do parâmetro x_2 .

X , matriz com 3 colunas iguais a X_0 , X_1 , e X_2 , e n linhas.

F , matriz coluna com n elementos correspondentes aos valores da propriedade f .

2) Realiza-se a seguinte operação:

$$A = ((X^t \cdot X)^{-1})^* (X^t \cdot F)$$

3) Resulta então uma matriz coluna A com 3 linhas:

$$A = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix},$$

onde a_0 , a_1 , e a_2 são os coeficientes da função:

$$f(x_1, x_2) = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2.$$

Exemplo: Obtenção da função tendência (procedimento realizado diretamente no console do Scilab 5.3.2):

Observação: X_1 corresponde à velocidade de corte, X_2 ao avanço, e F é a tendência a ser retirada do conjunto original de dados para que se possa realizar a Krigagem ordinária.

Etapa 1:

```
X0=[1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1];
X1=[210;220;230;240;250;260;270;280;290;210;220;230;240;250;260;270;280;290;
210;220;230;240;250;260;270;280;290];
X2=[0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.3;0.3;0.3;0.3;0.3;0.3;0.3;0.3;0.3;0.3;0.3;0.3;0.3;0.5;0.5;0
.5;0.5;0.5;0.5;0.5];
F=[158.38;114.98;78.86;84.73;73.18;53.72;75.4;44.7;66.02;70.8;73.61;64.58;42.59;
53.99;55.4;39.16;37.72;36.5;68.99;41.3;40.35;53.2;39.54;28.99;27.64;34.85;23.72];
X=[X0 X1 X2];
```

Etapa 2:

$$((X^T X)^{-1})^* (X^T F)$$

ans =

285.15612

- 0.7708903

- 92.365306

Obtenção dos valores da tendência para os pontos (x_1, x_2) :

-->Ftrend=285.15612-0.7708903*X1-92.365306*X2

114.03

104.74

98.61

90.91

83.20

75.49

67.70

60.07

52.36

95.56

87.85

78.78

72.43

64.72

57.02

49.31

41.74

33.89

77.09

69.38

61.67

52.82

46.25

38.54

30.83

23.12

15.42

APÊNDICE B – Artigos publicados nos Anais do CONEM 2012 e COBEF 2013



LEVANTAMENTO DA CURVA DE VIDA DA FERRAMENTA DE USINAGEM: UMA INVESTIGAÇÃO PARA A REDUÇÃO DO NÚMERO DE ENSAIOS

Gilberto de Almeida Corrêa Jr., gilbertoacjr@uninove.br

Fábio Henrique Pereira, fabiohp@uninove.br

Elesandro Antonio Baptista, elesandro@uninove.br

Nivaldo Lemos Coppini, ncoppini@uninove.br

¹Universidade Nove de Julho, Avenida Francisco Matarazzo, 612 – CEP 05001-100– 1º Andar – Prédio C – Água Branca – São Paulo – SP

Resumo: *Este trabalho tem como objetivo investigar a obtenção da curva de vida da ferramenta de corte em função dos parâmetros de usinagem utilizando um número reduzido de ensaios, procurando manter a significância dos resultados. O Método de Estratégia Randômica (RMS) apresentado no estudo realizado por Kuljanic (1980) traz importantes bases para a investigação, com resultados satisfatórios para redução de observações para obtenção da curva de vida, e a partir destes resultados buscou-se elevar o nível de fidelidade da resposta por meio de um tratamento utilizando ferramentas da estatística clássica. Os resultados demonstram que é possível obter a curva de vida da ferramenta com a realização de um número reduzido de ensaios.*

Palavras-chave: vida da Ferramenta; usinagem; curva de vida

1. INTRODUÇÃO

A análise dos vários aspectos dos processos produtivos e o atual cenário da indústria, bem como a grande evolução tecnológica que apresentam (com o desenvolvimento de novos materiais e geometrias para ferramentas e máquinas), torna-se perceptível a necessidade de aumentar a eficiência dos processos produtivos, principalmente, por meio da otimização destes novos recursos. De acordo com Ju (1998), do ponto de vista econômico, somente ser capaz de selecionar ferramentas para um determinado componente não é suficiente para satisfazer as necessidades econômicas na indústria de manufatura atual. Em geral, ferramenta ideal selecionada deve apresentar a melhor relação custo/benefício dentre todas as ferramentas possíveis para uma determinada aplicação.

O uso adequado destas novas tecnologias torna possível flexibilizar num maior grau os processos industriais possibilitando que haja uma redução significativa dos custos relacionados à troca de ferramentas, no caso de processos de usinagem, seja pelo custo intrínseco da ferramenta como pela redução do seu tempo de substituição.. Para tanto, torna-se muito importante a investigação intensiva e sistemática do fenômeno de corte e dos parâmetros envolvidos que influenciam a eficiência do processo.

A operação de acabamento em processos de usinagem é tradicionalmente focado em pesquisas que relacionam os parâmetros de corte, como é abordado por Boujelbene (2007) e Meng (2000). Porém o conhecimento do relacionamento preciso entre estes parâmetros é muito importante para aumentar a vida útil da ferramenta e consequentemente reduzir o seu tempo de troca, por meio da redução do número de trocas. O estudo da vida de ferramentas de corte é alvo de pesquisas desde o início dos processos produtivos, porém, os avanços tecnológicos atuais aumentam a relevância destas investigações científicas.

Algumas das principais dificuldades relacionadas às pesquisas de estudo de vida de ferramentas de corte se relacionam ao custo e tempo envolvidos na obtenção dos dados experimentais utilizados para validar os aspectos teóricos investigados. O uso tradicional da equação estendida de Taylor para vida de ferramenta consome muito tempo e recursos (Moriwaki, 2005). O planejamento para obtenção dos dados baseando-se em abordagens fundamentadas na estatística clássica torna evidentes dois aspectos tradicionalmente reconhecidos:

- um aspecto está relacionado ao número de ensaios realizados, que deve ser próximo de trinta para que os resultados tenham validade conforme a abordagem clássica da estatística, e que as conclusões possam ser extrapoladas para outras situações;

- outro aspecto refere-se à representatividade dos resultados obtidos a partir dos dados experimentais; os ensaios realizados deveriam ter como foco observar o tempo de vida útil da aresta de corte da ferramenta num processo de usinagem que envolva características próximas às observadas regularmente pelos processos industriais; alguns exemplos destas características usuais seriam os materiais usinados (caso o objetivo da investigação envolva um processo em particular) e também parâmetros de usinagem (velocidade de corte, profundidade de corte, e o avanço de usinagem) normalmente utilizados na maioria dos processos.

Estes dois aspectos ressaltam dois dilemas de grande relevância que tornam evidente a busca de novas abordagens para a pesquisa. O primeiro ponto e talvez o mais importante refere-se ao número de ensaios necessário para a validação clássica dos resultados. Embora, do ponto de vista estatístico, trinta ensaios seja um número relativamente pequeno de resultados, do ponto de vista da viabilidade dos ensaios, este número é extremamente grande. Isso se deve às seguintes restrições: primeiro a quantidade de material que deve ser usinado para a realização destes ensaios, em segundo lugar o tempo de utilização das máquinas, e em terceiro um ponto de importância de ordem inferior que seria o número de ferramentas utilizado, como é enfatizado por Ojha (2005). Destes, os dois primeiros têm maior relevância. Uma quantidade de ensaios da magnitude solicitada pelas abordagens da estatística clássica, de forma a garantir a confiabilidade e extrapolação dos resultados, inviabilizaria a pesquisa em relação aos custos de material e de utilização de máquinas.

O segundo aspecto também aumenta o tempo do ensaio e também a quantidade de material usinado, pois a vida das ferramentas em condições usuais de operação é maior. Seria mais interessante realizar o ensaio em condições mais próximas dos limites críticos de utilização, pois assim reduzem-se as necessidades de tempo e material para usinagem.

Alguns trabalhos têm sido realizados com o objetivo de verificar como reduzir o número de ensaios sem perder a representatividade dos resultados obtidos a partir deles (Ojha, 2005). Estes métodos apresentam alternativas às modelagens de experimentos baseados na estatística clássica, e assim viabilizam as pesquisas do ponto de vista dos recursos utilizados nos ensaios.

Este trabalho tem como objetivo a investigação da obtenção da curva de vida da ferramenta de corte em função dos parâmetros de usinagem utilizando um número pequeno de ensaios, procurando manter a significância dos resultados. O Método de Estratégia Randômica (RMS) apresentado no estudo realizado por Kuljanic (1980) traz importantes bases para a investigação, com resultados satisfatórios para redução de observações para obtenção da curva de vida, e a partir destes resultados buscou-se elevar o nível de fidelidade da resposta com base em uma questão importante que o autor aborda no trabalho, mas que fica em aberto, e pode ser tratada de forma simples utilizando ferramentas da estatística clássica.

2. DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE ESTRATÉGIA RANDÔMICA (RMS):

O método tradicional para a obtenção da curva de vida de ferramenta consiste em obter os parâmetros da curva de vida variando-se os parâmetros envolvidos, os quais constam na Equação de Vida Extendida de Taylor - Equação 1.

$$T = K \bullet Vc^{kvc} \bullet f^{kf} \bullet ap^{kap} \quad (1)$$

Onde:

- K : constante;
- Vc : velocidade de corte (m/min);
- kvc : coeficiente da velocidade de corte;
- f : avanço (mm/volta);
- kf : coeficiente do avanço;
- ap : profundidade de corte (mm);
- kap : coeficiente da profundidade de corte.

São realizados ensaios variando-se a velocidade de corte (Vc), o avanço (f) e a profundidade de corte (ap), cada uma em três patamares, realizando-se todas as combinações possíveis (3^3), resultando em um total de 27 ensaios.

O RSM para obtenção da equação de vida de ferramenta consiste em reduzir o número de observações (amostras) necessárias para a interpolação por meio de seleção aleatória de nove ensaios entre os 27 que tradicionalmente seriam necessários para obtenção da curva. Segundo Kuljanic (1980), podem-se utilizar números menores de ensaios, tendo um mínimo sugerido de cinco ensaios, porém recomenda utilizar entre oito ou nove. Tal seleção aleatória tem como objetivo evitar possíveis combinações entre as leituras onde haja uma correlação entre os parâmetros de corte, pois, conforme observado experimentalmente pelo autor, esta correlação influencia o resultado final. Ao se verificar os resultados apresentados pelo autor, é possível perceber sua fidelidade satisfatória, embora tenha sido utilizado apenas um número inferior de ensaios que o número tradicionalmente usado. Isso se deve à seleção de um conjunto de observações eficiente.

Uma leitura detalhada do RMS permite perceber que, embora o autor tenha deixado claro que a presença de correlação entre os parâmetros de usinagem influencie muito o resultado final, o processo de escolha aleatória reduz a ocorrência de correlação entre os parâmetros de corte nos conjuntos de condições de corte selecionados, mas não impede totalmente que isto aconteça. Portanto é muito importante eliminar as combinações que trazem uma correlação significativa entre os parâmetros antes de se fazer a seleção aleatória.

3. METODOLOGIA

Para eliminar estas combinações, após a escolha aleatória do conjunto de condições de corte, é necessário verificar o grau de correlação entre os parâmetros de corte. Para tanto, utiliza-se o coeficiente de correlação amostral $r_{x,y}$, definido a seguir. Caso a haja correlação entre pelo menos um par de parâmetros, deve-se descartar a o conjunto e realizar uma nova escolha.

O coeficiente de correlação amostral pode ser definido como:

$$r_{x,y} = \frac{SP_{xy}}{\sqrt{SQ_x * SQ_y}} \quad (2)$$

A somatória do produto entre os n pares de x e y, SP_{xy} , é definida como:

$$SP_{xy} = \sum_i x_i y_i - \frac{\sum_i x_i \sum_i y_i}{n} \quad (3)$$

Analogamente, tem-se as somatórias dos quadrados de x e de y, SQ_x e SQ_y :

$$SQ_x = \sum_i x_i^2 - \frac{(\sum_i x_i)^2}{n} \quad (4)$$

$$SQ_y = \sum_i y_i^2 - \frac{(\sum_i y_i)^2}{n} \quad (5)$$

O coeficiente de correlação amostral se localiza entre 1 e -1. Quando $r_{x,y}$ se aproxima de 1, existe uma correlação positiva entre x e y, ou seja, uma relação crescente entre x e y, e quando $r_{x,y}$ se aproxima de -1 a correlação é negativa, indicando uma relação decrescente entre x e y. Quando $r_{x,y}$ está próximo de zero não existe correlação entre as variáveis. Para que se defina se um conjunto de condições de corte definidos pelo RMS poderá ser utilizado para encontrar a equação de vida de ferramenta, calcula-se o coeficiente de correlação entre os três parâmetros, dois a dois. Caso algum dos três apresente valor absoluto maior que 0,5 o conjunto deve ser descartado e uma nova escolha aleatória deverá se feita.

4. DESENVOLVIMENTO

Para verificar que, mesmo havendo a seleção dos conjuntos de condições de corte conforme as definições do RMS, há a possibilidade de haver correlação entre os parâmetros de corte, duas condições devem ser analisadas. O método inicia-se com a escolha de um conjunto de condições de corte entre as vinte e sete combinações possíveis. Os valores utilizados para velocidade de corte, avanço, e profundidade de corte são:

Tabela 1 – patamares de variação dos parâmetros de corte.

| Velocidade de corte <i>Vc</i> (m/min) | Avanço <i>f</i> (mm/volta) | Profundidade de corte <i>ap</i> (mm) |
|--|-------------------------------|---|
| 97 | 0,093 | 1,1 |
| | 0,117 | 2 |
| 155 | 0,238 | 5 |

Conforme o RMS deve-se realizar a escolha aleatória entre as vinte e sete condições de corte ordenadas, conforme demonstrado na Tabela 2.

Por meio dos coeficientes de correlação entre os parâmetros calculados para duas condições de corte definidas pelo RMS é possível observar que no primeiro caso (sugerido pelo autor) a ausência de correlação é evidente, enquanto que no segundo caso (selecionado neste trabalho), a presença de correlação entre todos os parâmetros, e de forma mais explícita entre a velocidade e o avanço e entre a velocidade e a profundidade de corte. Os dados do primeiro caso estão presentes na Tabela 3:

Tabela 2 – patamares de variação dos parâmetros de corte.

| nº | Velocidade de corte <i>Vc</i> (m/min) | Avanço <i>f</i> (mm/volta) | Profundidade de corte <i>ap</i> (mm) |
|----|--|-------------------------------|---|
| 1 | 97 | 0,093 | 1,1 |
| 2 | 97 | 0,117 | 1,1 |
| 3 | 97 | 0,238 | 1,1 |
| 4 | 97 | 0,093 | 2,0 |
| 5 | 97 | 0,117 | 2,0 |
| 6 | 97 | 0,238 | 2,0 |
| 7 | 97 | 0,093 | 5,0 |
| 8 | 97 | 0,117 | 5,0 |
| 9 | 97 | 0,238 | 5,0 |
| 10 | 122 | 0,093 | 1,1 |
| 11 | 122 | 0,117 | 1,1 |
| 12 | 122 | 0,238 | 1,1 |
| 13 | 122 | 0,093 | 2,0 |
| 14 | 122 | 0,117 | 2,0 |
| 15 | 122 | 0,238 | 2,0 |
| 16 | 122 | 0,093 | 5,0 |
| 17 | 122 | 0,117 | 5,0 |
| 18 | 122 | 0,238 | 5,0 |
| 19 | 155 | 0,093 | 1,1 |
| 20 | 155 | 0,117 | 1,1 |
| 21 | 155 | 0,238 | 1,1 |
| 22 | 155 | 0,093 | 2,0 |
| 23 | 155 | 0,117 | 2,0 |
| 24 | 155 | 0,238 | 2,0 |
| 25 | 155 | 0,093 | 5,0 |
| 26 | 155 | 0,117 | 5,0 |
| 27 | 155 | 0,238 | 5,0 |

Tabela 3: Primeiro conjunto de condições de corte.

| Velocidade de corte <i>Vc</i> (m/min) | Avanço <i>f</i> (mm/volta) | Profundidade de corte <i>ap</i> (mm) |
|--|-------------------------------|---|
| 97 | 0,093 | 1,1 |
| 97 | 0,117 | 2 |
| 97 | 0,238 | 1,1 |
| 97 | 0,238 | 2 |
| 122 | 0,093 | 2 |
| 122 | 0,117 | 2 |
| 122 | 0,238 | 2 |
| 155 | 0,093 | 1,1 |
| 155 | 0,238 | 2 |

A Tabela 4 apresenta a verificação da correlação entre os parâmetros do primeiro caso:

Tabela 4: Coeficientes de correlação, primeiro caso.

| | <i>Vc X f</i> | <i>Vc X ap</i> | <i>f X ap</i> |
|------------------|---------------|----------------|---------------|
| SP _{xy} | -0,6926 | 2,8333 | 0,0322 |
| SQ _x | 4549,56 | 4549,56 | 0,0414 |
| SQ _y | 0,0414 | 0,5 | 0,5 |
| <i>rx,y</i> | -0,0504 | 0,0594 | 0,2235 |

Em módulo, os coeficientes de correlação *rv,f* e *rv,ap* são muito próximos de zero, e o coeficiente *rf,ap* é pequeno o suficiente para que a correlação não seja significativa. Os dados do segundo caso estão presentes na Tabela 5:

Tabela 5: Segundo conjunto de condições de corte.

| Velocidade de corte <i>Vc</i> (m/min) | Avanço <i>f</i> (mm/volta) | Profundidade de corte <i>ap</i> (mm) |
|--|-------------------------------|---|
| 97 | 0,093 | 1,1 |
| 97 | 0,093 | 2 |
| 97 | 0,117 | 1,1 |
| 97 | 0,117 | 2 |
| 122 | 0,117 | 2 |
| 122 | 0,238 | 1,1 |
| 122 | 0,238 | 2 |
| 155 | 0,238 | 5 |
| 155 | 0,238 | 5 |

A Tabela 6 apresenta a verificação da correlação entre os parâmetros do primeiro caso:

Tabela 6: Coeficientes de correlação, primeiro caso.

| | <i>Vc X f</i> | <i>Vc X ap</i> | <i>f X ap</i> |
|------------------|---------------|----------------|---------------|
| SP _{xy} | 10,8331 | 240 | 0,4595 |
| SQ _x | 4549,56 | 4549,56 | 0,0386 |
| SQ _y | 0,0386 | 16,5 | 16,5 |
| <i>rx,y</i> | 0,8175 | 0,8760 | 0,5758 |

Em módulo, os coeficientes de correlação rv,f e rv,a são muito distantes de zero, e o coeficiente rf,a também ultrapassa o limite 0,5 indicando que há correlação significativa entre avanço e profundidade.

Além deste exemplo em que a correlação entre os parâmetros de corte é evidente, outros conjuntos de condições de corte estudados apresentaram correlação significativa em pelo menos um par de parâmetros.

5. CONCLUSÕES

O RMS é realmente uma forma interessante para reduzir o número de ensaios na obtenção da equação de vida da ferramenta. A verificação da correlação entre os parâmetros de corte pode ser utilizada para garantir que a escolha aleatória realizada pelo método pode ser utilizada sem risco de obter-se uma solução influenciada pela correlação entre os parâmetros que podem aparecer mesmo após a utilização do método.

Desta forma, como é observado por Kuljanic (1980), é possível reduzir o número de ensaios de vinte e sete para algo entre cinco e nove ensaios (de acordo com a disposição de recursos e a necessidade de precisão), obtendo um resultado significativo. Se após a escolha aleatória for verificada a condição de não correlação sugerida neste trabalho, garante-se que os coeficientes obtidos para a equação de vida de ferramenta sejam satisfatórios para prever o comportamento da vida da ferramenta em questão para usinagem do material aplicado nos ensaios.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Nove de Julho pela Bolsa de Estudos concedida.

7. REFERÊNCIAS

- Axinte D. A., Belluco W., De Chiffre L.; Reliable tool life measurements in turning — an application to cutting fluid efficiency evaluation, International Journal of Machine Tools & Manufacture 41, 1003–1014, 2001.
- Boujelbene M., Moisan A., Bouzid W., Torbaty S.; Variation Cutting Speed on the Five Axis Milling, Journal of Archivmentein Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 21, Issue 2, april 2007.
- Galante G., Lombardo A., Passannanti A.; Tool-life modelling as a stochastic process, International Journal of Machine Tools & Manufacture 38, 1361–1369, 1998.
- Ju F., Barrow G.; A Technologically Oriented Approach for the Economic Tool Selection and Tool Balancing of Milled Components, International Journal of Advanced Manufacturing Technology , 13: 107-320, 1998.
- Kuljanic E.; Random Strategy Method for Determining Tool Life Equation, Annals of CIRP, Vol 29, 1908.
- Lee B. Y., Liu H. S., Tarn Y. S.; An Abductive Network for Predicting Tool Life in Drilling, IEEE Transductions on Industry Applications, Vol. 35, nº 1, January/February 1999.
- Meng Q., Arsecularatne J.A., Mathew P.; Calculation of optimum cutting conditions for turning operations using a machining theory, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40, 1709–1733, 2000.
- Moriwaki T., Tangjitscharoen S., Shibasaki T.; Development of Sequential Optimization Method for CNC Turning Based on In-Process Tool Wear Monitoring, JSME International Journal, Series C, Vol. 48, nº 4, 2005.

- Ojha D.K., Dixit U.S.; An economic and reliable tool life estimation procedure for turning, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 26: 726–732, 2005.
- Sahin Y., Motorcu A. R.; Surface Roughness Prediction Model in Machining of Carbon Steel by PVD Coating Cutting Tools, American Journal of Applied Sciences, 1 (1) 12-17, ISSN 1546-9239, 2004.
- Wardany T. I., Elbestawi M. A.; Prediction of Tool Failure Rate in Turning Hardened Steels, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 13: 1-16, 1997.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

UTILIZAÇÃO DA KRIGAGEM PARA O LEVANTAMENTO DA CURVA DE VIDA DE FERRAMENTA

Gilberto de Almeida Corrêa Jr., gilbertoacjr@uninove.br¹

Fábio Henrique Pereira, fabiohp@uninove.br¹

Elesandro Antonio Baptista, elesandro@uninove.br¹

Nivaldo Lemos Coppini, nivaldocoppini@gmail.com²

¹Universidade Nove de Julho, Avenida Francisco Matarazzo, 612 – CEP 05001-100– 1º Andar – Prédio C – Água Branca – São Paulo – SP

¹Universidade Estadual de Campinas, Rua Mendeleyev, 200 - CEP 13083-860 - Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo - Campinas - SP

Resumo: A análise dos vários aspectos dos processos produtivos e o atual cenário da indústria, bem como a grande evolução tecnológica que apresentam, torna perceptível a necessidade de aumentar a eficiência dos processos e otimizar a utilização dos novos recursos. Do ponto de vista produtivo, somente ser capaz de selecionar ferramentas para um determinado componente não é suficiente para satisfazer as necessidades econômicas na indústria de manufatura atual; a ferramenta ideal selecionada deve ser a mais eficiente de todas as disponíveis em um ambiente real. A influência do fenômeno de corte sobre o acabamento do processo de usinagem é tradicionalmente o foco das pesquisas que relacionam os parâmetros de corte, porém, o estudo da vida de ferramentas de corte é alvo de pesquisas desde o início dos processos produtivos. Os avanços tecnológicos atuais aumentam a relevância das investigações científicas nessa área. Algumas das principais dificuldades relacionadas às pesquisas de estudo de vida de ferramentas de corte se relacionam ao custo e tempo envolvidos na obtenção dos dados experimentais utilizados para validar os aspectos teóricos investigados. Portanto o uso tradicional da equação estendida de Taylor para vida de ferramenta consome muito tempo e recursos. Como uma alternativa à abordagem da Estatística clássica, a Krigagem para tratamento dos dados tem apresentado resultados promissores. Este trabalho tem como objetivo a investigação do comportamento desta técnica de interpolação na obtenção da curva de vida da ferramenta de corte em função dos parâmetros de usinagem. São utilizados dados obtidos por simulação a partir de uma função de vida de ferramenta conhecida (acrescida de uma perturbação aleatória), com vistas a avaliar o comportamento da técnica de interpolação e investigar sua utilização para reduzir o número de experimentos necessários para obtenção da curva de vida de ferramenta.

Palavras-chave: vida de ferramenta, Taylor, Krigagem, Kriging, interpolação.

1. INTRODUÇÃO

A análise dos vários aspectos dos processos produtivos e o atual cenário da indústria, bem como a grande evolução tecnológica que apresentam (com o desenvolvimento de novos materiais e geometrias para ferramentas e máquinas), torna perceptível a necessidade de aumentar a eficiência dos processos e otimizar a utilização destes novos recursos. De acordo com Ju (1998), do ponto de vista econômico, somente ser capaz de selecionar ferramentas para um determinado componente não é suficiente para satisfazer as necessidades econômicas na indústria de manufatura atual. Em geral, ferramenta ideal selecionada deve ser a mais econômica de todas as ferramentas possíveis em um ambiente real.

A influência do fenômeno de corte sobre o acabamento do processo de usinagem é tradicionalmente o foco das pesquisas que relacionam os parâmetros de corte, como é abordado por Boujelbene (2007) e Meng (2000). Porém o conhecimento do relacionamento preciso entre estes parâmetros é muito importante para aumentar a vida útil da ferramenta e consequentemente reduzir o tempo de troca de ferramenta. O estudo da vida de ferramentas de corte é alvo de pesquisas desde o início dos processos produtivos, porém, os avanços tecnológicos atuais aumentam a relevância das investigações científicas nessa área.

Algumas das principais dificuldades relacionadas às pesquisas de estudo de vida de ferramentas de corte se relacionam ao custo e tempo envolvidos na obtenção dos dados experimentais utilizados para validar os aspectos teóricos investigados. O uso tradicional da equação estendida de Taylor para vida de ferramenta consome muito tempo e recursos (Moriwaki, 2005). O planejamento para obtenção dos dados baseando-se em abordagens fundamentadas na estatística clássica torna evidentes dois aspectos tradicionalmente reconhecidos: o número de ensaios realizados (um número muito grande dificulta a exequibilidade do experimento), e representatividade dos resultados obtidos a partir

dos dados experimentais (nem sempre os parâmetros de corte usados no ensaio estão próximos aos observados regularmente pelos processos industriais, pois isso torna os ensaios muito demorados e mais custosos).

Como uma alternativa à abordagem da Estatística clássica, a Krigagem para tratamento dos dados tem apresentado resultados promissores. Uma investigação do comportamento do método perante dados obtidos a partir de funções conhecidas (perturbadas aleatoriamente ou não) pode trazer muito subsídios para futuras aplicações da Krigagem.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo a investigação do comportamento da Krigagem na obtenção da curva de vida da ferramenta de corte em função dos parâmetros de usinagem. A curva de vida de ferramenta foi obtida para duas situações: primeiramente na condição ideal com vinte e cinco pontos, e como alternativa, partindo-se de um conjunto menor, com apenas nove pontos. Estes nove pontos foram obtidos a partir da amostra de cinco pontos. Inicialmente obteve-se a função da vida de ferramenta por regressão linear utilizando-se os vinte e cinco pontos. Esta função foi comparada ao resultado obtido partindo-se dos nove pontos, e aplicando-se a Krigagem para recompor o conjunto, e então refazer o processo de regressão linear. O objetivo do trabalho é comparar estes resultados e verificar qual o impacto causado pela utilização de apenas nove pontos recompostos pela Krigagem. Os dados utilizados foram gerados a partir de uma função estendida de Taylor para a vida de ferramenta conhecida (Kujalnic, 1980), acrescendo-se de uma perturbação aleatória.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Obtenção da Curva de Vida de Ferramenta

As questões referentes ao número de ensaios realizados para a determinação da vida da ferramenta, bem como à representatividade dos resultados obtidos a partir dos dados experimentais devida à utilização muitas vezes de parâmetros de corte diferentes daqueles utilizados nos processos industriais, ressaltam dois dilemas de grande relevância que tornam evidente a busca de novas abordagens para a pesquisa.

O primeiro ponto e talvez o mais importante refere-se ao número de ensaios necessário para a validação clássica dos resultados. Embora, do ponto de vista estatístico, trinta ensaios seja um número relativamente pequeno de resultados, do ponto de vista da viabilidade dos ensaios, este número é extremamente grande. Isso se deve às seguintes restrições: primeiro a quantidade de material que deve ser usinado para a realização destes ensaios, em segundo lugar o tempo de utilização das máquinas, e em terceiro um ponto de importância de ordem inferior que seria o número de ferramentas utilizado, como é enfatizado por Ojha (2005). Destes, os dois primeiros têm maior relevância. Uma quantidade de ensaios da magnitude solicitada pelas abordagens da estatística clássica inviabilizaria a pesquisa em relação aos custos de material e de utilização de máquinas.

O segundo aspecto também aumenta o tempo do ensaio e também a quantidade de material usinado, pois a vida das ferramentas em condições usuais de operação é maior. Seria mais interessante realizar o ensaio em condições mais próximas dos limites críticos de utilização, pois assim reduzem-se as necessidades de tempo e material para usinagem.

O método tradicional para a obtenção da curva de vida de ferramenta consiste em obter os coeficientes da curva de vida variando-se os parâmetros de corte envolvidos. Considera-se a função de vida de ferramenta estendida de Taylor:

$$T = K * v^{kv} * f^{kf} * a^{ka} \quad (1)$$

onde:

- K: constante;
- v: velocidade de corte;
- kv: coeficiente da velocidade de corte;
- f: avanço;
- kf: coeficiente do avanço;
- a: profundidade de corte;
- ka: coeficiente da profundidade de corte.

Realizam-se ensaios variando-se a velocidade de corte (v), o avanço (f) e a profundidade de corte (a), cada uma em três patamares. Realizando-se todas as combinações possíveis ($3^3 = 27$) obtemos então um total de vinte e sete ensaios. Como alternativa, busca-se uma maneira de reduzir esta quantidade de ensaios de forma a minimizar os custos e o tempo de ensaio, mantendo a representatividade dos resultados.

3.2. Krigagem

A Krigagem se apresenta como uma possibilidade viável para tratamento dos dados referentes aos ensaios de vida de ferramenta. As pesquisas de Daniel G. Krige na área da geofísica foram formalizadas pelo matemático francês Georges Matheron na década de 1960 (Largueche, 2006). A Krigagem é uma proposta que busca interpolar dados

baseando-se na hipótese que diz que as propriedades físico-químicas do solo variam continuamente e que o gradiente destas propriedades entre dois pontos distintos diminui com a proximidade entre eles.

A Krigagem é amplamente utilizada na análise de resultados de pesquisas geológicas, e é bastante presente no tratamento estatístico de pesquisas voltadas à agronomia, como a contaminação do solo (Adhikary, 2011), bem como às questões relacionadas à geologia e à mineração. Aplica-se bem aos conjuntos de dados esparsos, apresentando resultados satisfatórios. No entanto, algumas pesquisas recentes têm investigado as possíveis aplicações da Krigagem no tratamento de dados obtidos em experimentos de outras naturezas como, por exemplo, oriundos de problemas das engenharias (Chen, 2011). Para isso é muito importante verificar o comportamento da Krigagem quando aplicada a problemas de natureza diferente daqueles tradicionalmente abordados nas áreas das geociências.

Em seu trabalho, Gunes (2008) analisou o comportamento da Krigagem para recompor dados perdidos, suavizar e filtrar um sinal e também para otimização, apresentando resultados muito satisfatórios em todas as abordagens, o que sugere muitas possibilidades de aplicação da técnica para análise de dados estatísticos.

Em relação à técnica, a Krigagem consiste em uma regressão linear generalizada, que procura minimizar uma variância de estimativa, em relação ao modelo de covariância definido a partir dos dados originais, conforme Deutsch e Journel (1998). O método pressupõe que pontos espacialmente mais próximos tendem a ter propriedades mais parecidas do que pontos mais distantes. Portanto, a variabilidade dos dados deve depender da distância. Segundo Isaaks e Srivastava (1989), muitas vezes esta variabilidade sofre também influência da direção.

A partir de um conjunto de n pontos, sendo que em cada um se observa a magnitude de uma determinada propriedade f , é possível obter um estimador desta propriedade em um ponto x_p não observado realizando-se uma interpolação linear (Imai, 2003), como definido em (2):

$$\hat{f}(x_p) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot f(x_i) \quad (2)$$

Na Krigagem ordinária, os pesos w_i utilizados na interpolação são obtidos através do sistema:

$$\begin{bmatrix} \gamma(h_{11}) & \gamma(h_{12}) & \dots & \gamma(h_{1n}) & 1 \\ \gamma(h_{21}) & \gamma(h_{22}) & \dots & \gamma(h_{2n}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(h_{n1}) & \gamma(h_{n2}) & \dots & \gamma(h_{nn}) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(h_{1p}) \\ \gamma(h_{2p}) \\ \vdots \\ \gamma(h_{np}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

O termo $\gamma(h_{ij})$ é a semi-variância associada à distância h_{ij} entre um par de pontos x_i e x_j , e λ é o multiplicador de Lagrange (Imai, 2003). A função $\gamma(h)$ relaciona a semi-variância entre os pontos e a distância entre eles.

Para cada distância h calcula-se a semi-variância correspondente entre os pontos onde estas propriedades são aferidas de acordo com a expressão:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (f(x_i) - f(x_i + h))^2 \quad (4)$$

4. OBTENÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

4.1. Obtenção dos Dados

O conjunto de dados a serem utilizados neste trabalho foi obtido através da função de vida de ferramenta (5) obtida experimentalmente por Kuljanic (1980):

$$T = 220,3 * 10^5 * v^{-2,8} * f^{-0,47} * a^{-0,8} \quad (5)$$

Os dados foram obtidos variando-se de forma constante a velocidade de corte de 210 a 290m/min, e variando-se o avanço em três níveis (0,1; 0,3 e 0,5 mm/rotação) e a profundidade de corte foi mantida em 0,1mm (a cada valor de vida calculado foi introduzida uma perturbação aleatória). Desta forma, a equação em função apenas da velocidade de corte e avanço é:

$$T = 10^{8,143} * v^{-2,8} * f^{-0,47} \quad (6)$$

Desta forma foram obtidos vinte e sete pontos, com um valor de vida para cada um dos pares de velocidade de corte e avanço por rotação. A perturbação aleatória introduzida foi de 10% de erro em torno do valor calculado utilizando-se a função (6), com distribuição uniforme. Desta forma, foram obtidos os vinte e sete dados que compõem o conjunto apresentado na tabela 1.

A partir deste conjunto de vinte e sete pontos, definiu-se um segundo conjunto, reduzindo-se o número de pontos para apenas nove que serão utilizados na Krigagem. Estes nove pontos foram escolhidos dentre o conjunto anterior variando-se a velocidade e avanço em três patamares cada (menor, médio e maior) e combinando-os, como é apresentado na tabela 2.

Tabela 1. Conjunto de dados obtidos para os vinte e sete pares de valores de velocidade e avanço.

| Velocidade de corte (m/min) | Avanço por rotação (mm/rotação) | Vida da ferramenta (min) | Velocidade de corte (m/min) | Avanço por rotação (mm/rotação) | Vida da ferramenta (min) |
|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 210 | 0,1 | 138,28 | 260 | 0,3 | 46,10 |
| 220 | 0,1 | 113,53 | 370 | 0,3 | 38,33 |
| 230 | 0,1 | 93,30 | 280 | 0,3 | 35,03 |
| 240 | 0,1 | 87,71 | 290 | 0,3 | 32,67 |
| 250 | 0,1 | 77,10 | 210 | 0,5 | 80,39 |
| 260 | 0,1 | 65,54 | 220 | 0,5 | 63,19 |
| 270 | 0,1 | 67,66 | 230 | 0,5 | 44,91 |
| 280 | 0,1 | 53,87 | 240 | 0,5 | 50,03 |
| 290 | 0,1 | 56,33 | 250 | 0,5 | 41,82 |
| 210 | 0,3 | 125,71 | 260 | 0,5 | 35,48 |
| 220 | 0,3 | 69,91 | 270 | 0,5 | 32,19 |
| 230 | 0,3 | 61,55 | 280 | 0,5 | 32,73 |
| 240 | 0,3 | 49,71 | 290 | 0,5 | 26,72 |
| 250 | 0,3 | 49,12 | | | |

Tabela 2. Conjunto de dados reduzidos com nove pares de valores de velocidade e avanço.

| Velocidade de corte (m/min) | Avanço por rotação (mm/rotação) | Vida da ferramenta (min) |
|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 210 | 0,1 | 138,28 |
| 250 | 0,1 | 77,10 |
| 290 | 0,1 | 56,33 |
| 210 | 0,3 | 125,71 |
| 250 | 0,3 | 49,12 |
| 290 | 0,3 | 32,67 |
| 210 | 0,5 | 80,39 |
| 250 | 0,5 | 41,82 |
| 290 | 0,5 | 26,72 |

4.2. Tratamento dos Dados

Ao conjunto completo com os vinte e sete pontos obtidos foi realizada a regressão, e a curva obtida foi:

$$T = 10^{7,983} * v^{-2,73} * f^{-0,46} \quad (7)$$

A aplicação da Krigagem foi feita no conjunto reduzido de com nove pontos. Os dados não são estacionários, ou seja apresentam tendência (a vida diminui com o aumento dos parâmetros), então, antes de aplicar a Krigagem é necessário retirar essa componente dos dados mantendo-se apenas as componentes responsáveis pelas variações locais, e a componente aleatória.

Segundo Burrough (1987), a variação de um valor em relação à sua posição pode ser expressa pela soma de três componentes: a tendência, ou variação global; uma variação local; e um ruído aleatório ou erro residual. As duas primeiras são relacionadas à posição, e a terceira não. Se x_p representa um ponto correspondente a valores determinados de velocidade de corte e de avanço, então o valor da variável T , correspondente à vida da ferramenta no ponto x_p , é dada por:

$$T(x_p) = t(x_p) + s(x_p) + \varepsilon, \quad (8)$$

onde $t(x_p)$ é a componente de tendência global, $s(x_p)$ é a componente local, e ε é a componente aleatória.

Após a retirada da tendência, o conjunto de dados passa a ser estacionário, ou seja, sem tendência de crescimento e com média nula.

Tabela 3. Conjunto de dados reduzidos retirando-se a componente de tendência global.

| Velocidade de corte v | Avanço por rotação f | Vida da ferramenta T(x _p) | Tendência t(x _p) | Dados estacionários T(x _p) - t(x _p) |
|-----------------------|----------------------|---------------------------------------|------------------------------|---|
| 210 | 0,1 | 138,28 | 113,10 | 25,18 |
| 250 | 0,1 | 77,1 | 85,89 | -8,79 |
| 290 | 0,1 | 56,33 | 58,68 | -2,35 |
| 210 | 0,3 | 75,04 | 88,84 | -13,80 |
| 250 | 0,3 | 49,12 | 61,63 | -12,51 |
| 290 | 0,3 | 32,67 | 34,42 | -1,75 |
| 210 | 0,5 | 63,68 | 64,58 | -0,90 |
| 250 | 0,5 | 37,74 | 37,37 | 0,37 |
| 290 | 0,5 | 24,74 | 10,16 | 14,58 |

Através do sistema linear (3), são obtidos os pesos w_i para cada ponto de interpolação. Utilizando-se a equação (2) de interpolação linear, e acrescentando-se a componente de tendência (que foi retirada para utilização da Krigagem), são obtidos os valores de vida de forma a interpolar os dezoito pontos necessários para realizar a regressão linear com a mesma quantidade de pontos do conjunto completo de dados.

Tabela 4. Conjunto formado pelos pontos do conjunto reduzido (*) e os pontos obtidos pela Krigagem.

| Velocidade de corte (m/min) | Profundidade de corte (mm/rotação) | Vida da ferramenta (min) | Velocidade de corte (m/min) | Profundidade de corte (mm/rotação) | Vida da ferramenta (min) |
|-----------------------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 210 | 0,1 | 138,28* | 260 | 0,3 | 45,2 |
| 220 | 0,1 | 121,2 | 370 | 0,3 | 40,6 |
| 230 | 0,1 | 107,5 | 280 | 0,3 | 36,0 |
| 240 | 0,1 | 93,9 | 290 | 0,3 | 32,67* |
| 250 | 0,1 | 77,10* | 210 | 0,5 | 63,68* |
| 260 | 0,1 | 74,8 | 220 | 0,5 | 58,1 |
| 270 | 0,1 | 69,2 | 230 | 0,5 | 51,8 |
| 280 | 0,1 | 63,0 | 240 | 0,5 | 45,3 |
| 290 | 0,1 | 56,33* | 250 | 0,5 | 37,74* |
| 210 | 0,3 | 75,04* | 260 | 0,5 | 34,8 |
| 220 | 0,3 | 69,2 | 270 | 0,5 | 30,9 |
| 230 | 0,3 | 62,9 | 280 | 0,5 | 27,0 |
| 240 | 0,3 | 56,4 | 290 | 0,5 | 24,74* |
| 250 | 0,3 | 49,12* | | | |

Desta forma é possível comparar os resultados obtidos partindo-se de 27 pontos diretamente, ou apenas de 9 pontos e utilizando-se a Krigagem. A função obtida por regressão para o novo conjunto de dados da tabela 4 é:

$$T = 10^{8,199} * v^{-2,32} * f^{-0,48} \quad (9)$$

5. RESULTADOS

A comparação entre os coeficientes das duas funções obtidas pela regressão, e os coeficientes da função (6) obtida por Kujalnic (1980), permite verificar que os valores são bastante próximos:

Tabela 4. Função original utilizada para gerar os dados, e as funções obtidas por regressão.

| | |
|--|--|
| Função I: original | $T = 10^{8,143} * v^{-2,8} * f^{-0,47}$ |
| Função II: obtida com os 27 pontos do conjunto completo pelo método tradicional | $T = 10^{7,983} * v^{-2,73} * f^{-0,46}$ |
| Função III: obtida com os 9 pontos do conjunto reduzido e os 18 pontos obtidos pela Krigagem | $T = 10^{8,199} * v^{-2,32} * f^{-0,48}$ |

Para verificar a acurácia do resultado obtido pelo conjunto de pontos produzidos pela Krigagem em relação aos vinte e sete pontos originais, foi feita a comparação dos dois resultados com valores fornecidos pela equação (6) que foi utilizada para gerar os dados.

Tabela 5. Função original utilizada para gerar os dados, e as funções obtidas pelas regressões.

| Velocidade de corte (m/min) | Avanço por rotação (mm/rotação) | Vida da ferramenta (min) | | |
|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| | | Função I (Kujalnic) | Função II (método tradicional) | Função III (Krigagem) |
| 210 | 0,1 | 129 | 127 | 135 |
| 220 | 0,1 | 113 | 112 | 118 |
| 230 | 0,1 | 100 | 99 | 104 |
| 240 | 0,1 | 89 | 88 | 93 |
| 250 | 0,1 | 79 | 79 | 83 |
| 260 | 0,1 | 71 | 71 | 74 |
| 270 | 0,1 | 64 | 64 | 66 |
| 280 | 0,1 | 58 | 58 | 60 |
| 290 | 0,1 | 52 | 53 | 54 |
| 210 | 0,3 | 77 | 77 | 80 |
| 220 | 0,3 | 68 | 67 | 70 |
| 230 | 0,3 | 60 | 60 | 62 |
| 240 | 0,3 | 53 | 53 | 55 |
| 250 | 0,3 | 47 | 48 | 49 |
| 260 | 0,3 | 42 | 43 | 44 |
| 370 | 0,3 | 38 | 39 | 39 |
| 280 | 0,3 | 34 | 35 | 35 |
| 290 | 0,3 | 31 | 32 | 32 |
| 210 | 0,5 | 61 | 61 | 62 |
| 220 | 0,5 | 53 | 53 | 55 |
| 230 | 0,5 | 47 | 47 | 48 |
| 240 | 0,5 | 42 | 42 | 43 |
| 250 | 0,5 | 37 | 38 | 38 |
| 260 | 0,5 | 33 | 34 | 34 |
| 270 | 0,5 | 30 | 30 | 31 |
| 280 | 0,5 | 27 | 28 | 28 |
| 290 | 0,5 | 25 | 25 | 25 |

A tabela 6 apresenta os desvios médios das funções obtidas por regressão em relação à função original (6), que permite avaliar qual foi a perda de precisão ao adotarmos um número menor de pontos e então aumentarmos esta quantidade através da Krigagem.

Tabela 6. Desvio das funções obtidas por regressão em relação à função original (6).

| Função | Desvio mínimo (%) | Desvio médio (%) | Desvio máximo (%) |
|--------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Função II (método tradicional) | 0,06 | 1,04 | 2,64 |
| Função III (Krigagem) | 0,48 | 3,35 | 4,65 |

6. CONCLUSÕES

Por meio da comparação dos resultados da abordagem tradicional para obtenção da função de vida de ferramenta, com a geração de pontos por interpolação utilizando a Krigagem, é possível verificar que apesar do erro aumentar, ainda assim o mesmo não é grande o suficiente para prejudicar o resultado. A aplicação da Krigagem para simplificar o processo experimental para levantamento da curva de vida de uma ferramenta de corte demonstrou um resultado consistente e promissor.

Neste ponto observa-se que experimentos reais para obtenção de valores de vida de ferramenta para validar a técnica podem consolidar este procedimento, confirmando a eficiência não apenas com dados obtidos por simulação matemática, mas também em tratamento de dados experimentais.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Nove de Julho pela Bolsa de Estudos concedida.

8. REFERÊNCIAS

- Adhikary P. et al. Indicator and probability kriging methods for delineating Cu, Fe, and Mn contamination in groundwater of Najafgarh Block, Delhi, India; Environ Monit Assess (2011) 176:663–676.
- Boujelbene M. et al. Variation Cutting Speed on the Five Axis Milling, Journal of Archivmentein Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 21, Issue 2, 2007.
- Burrough, P. A. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Xford, Clarendon Press, 1987.
- Chen, L.; Liew, K. M. A local Petrov-Galerkin approach with moving Kriging interpolation for solving transient heat conduction problems. Comput Mech 47:455–467, 2011.
- Deutsch, C.V.; Journel, A. G.; GSLIB: Geostatistical Software Library and user's guide. Oxford niversity Press, New York, 339p, 1992.
- Gunes, H.; Cekli, H.; Rist, U. Data Enhancement, Smoothing, Reconstruction and Optimization By Kriging Interpolation. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, 2008.
- Harris, P.; Charlton, M.; Fotheringham, A. Moving window kriging with geographically weighted variograms. Stoch Environ Res Risk Assess 24:1193–1209, 2010.
- Imai, N. N. ; ET AL. Análise comparativa da interpolação por krigagem ordinária e krigagem por indicação no caso de ervas daninhas em cultura de soja. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 2003, Belo Horizonte. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Cartografia. Rio de Janeiro : Sociedade Brasileira de Cartografia - SBC, 2003. v. CDROM.
- Isaaks, E. H.; Srivastava, M. R. Applied Geoestatistics, Oxford University Press, Oxford, New York, 560 p., 1989.
- Ju F., barrow G. A Technologically Oriented Approach for the Economic Tool Selection and Tool Balancing of Milled Components. International Journal of Advanced Manufacturing Technology , 13: 107-320, 1998.
- Kuljanic E. Random Strategy Method for Determining Tool Life Equation, Annals of CIRP, Vol 29, 1980.
- Lagueche F. Estimating Soil Contamination with Kriging Interpolation Method. American Journal of Applied Sciences 3 (6): 1894-1898, 2006.
- Meng Q., Arsecularatne J.A., Mathew P. Calculation of optimum cutting conditions for turning operations using a machining theory. International Journal of Machine Tools & Manufacture 40, 1709–1733, 2000.
- Moriwaki T., Tangjitsitcharoen S., Shibasaki T. Development of Sequential Optimization Method for CNC Turning Based on In-Process Tool Wear Monitoring. JSME International Journal, Series C, Vol. 48, nº 4, 2005.
- Ojha D.K., Dixit U.S. An economic and reliable tool life estimation procedure for turning. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 26: 726–732, 2005.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Os trabalhos escritos em português ou espanhol devem incluir (após direitos autorais) título, os nomes dos autores e afiliações, o resumo e as palavras chave, traduzidos para o inglês e a declaração a seguir, devidamente adaptada para o número de autores.