

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECANICA

ANÁLISE E DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA ESTRUTURA ALGÉBRICA  
DE TAYLOR TENDO O DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE COMO  
VARIÁVEL DEPENDENTE

DISSERTAÇÃO SUBMETEIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

ARIMATÉA QUARESMA FERRAZ

RECIFE, 07 DE NOVEMBRO DE 2008.

**F378a Ferraz, Arimatéa Quaresma.**

Análise e determinação dos parâmetros da estrutura algébrica de Taylor tendo o desgaste da ferramenta de corte como variável dependente / Arimatéa Quaresma Ferraz. - Recife: O Autor, 2008. xi, 82 folhas, il : tabs.,grafs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2008.

Inclui Referências e Anexo.

1. Engenharia Mecânica. 2.Desgaste de Flanco. 3.Usinagem. 4.Modelo Matemático. I. Título.

**UFPE**

**621**

**BCTG/ 2009- 132**

“ANÁLISE E DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA ESTRUTURA ALGÉBRICA DE TAYLOR TENDO O DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE COMO VARIÁVEL DEPENDENTE”.

ARMATÉA QUARESMA FERRAZ

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EPP/UFPE

*Neemias Gomes de Mattos de Mesquita*  
Prof. Dra. NOEMIA GOMES DE MATOS DE MESQUITA  
ORIENTADORA/PRESIDENTE

*Severino Leopoldino Urtiga Filho*  
Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO  
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:

*Neemias Gomes de Mattos de Mesquita*  
Prof. Dra. NOEMIA GOMES DE MATOS DE MESQUITA (UFPE)

*Oscar Olimpio de Araujo Filho*  
Prof. Dr. OSCAR OLÍMPIO DE ARAUJO FILHO (UFPE)

*Ana Lucia Bezerra Candeias*  
Prof. Dra. ANA LUCIA BEZERRA CANDEIAS (UFPE)



Aos meus pais Antonio José de Souza Ferraz e Quitéria de Souza Quaresma Neta Ferraz e aos meus irmãos Alriceia e Ariel.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e Nossa Senhora por sempre está comigo e pela saúde e paz que sempre desfrutei.

A professora Noemia Gomes de Mattos de Mesquita pela sua orientação, condução dos trabalhos e conhecimentos técnicos fornecido durante todo esse período de desenvolvimento do meu trabalho.

Aos meus tios Tahmar de Souza Ferraz e Luzia de Souza Ferraz, Dario Pessoa Ferraz, Maria Antonieta Alves Ferraz, pela compreensão, paciência que tiveram comigo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPE e de todos os professores que direta ou indiretamente contribuíram pela colaboração deste trabalho.

Ao professores Tiago Rolim pela sua colaboração e orientação.

A secretária Heliane pela sua compreensão e atenção aos procedimentos administrativos em minha documentação.

Aos examinadores da Banca do Seminário Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira , Oscar com suas contribuições para o enriquecimentos do trabalho e sua compreensão.

A examinadora externa da Banca de Defesa Ana Lúcia Bezerra Candeias pelos seus esclarecimentos nos tópicos desse trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Aos meus colegas e amigos de Serra Talhada, Recife e do curso de Alemão.

## RESUMO

Este trabalho visa mostrar os resultados analisados a partir de dois modelos dos quais serão designados por Taylor Simples e Taylor Expandida para a mensuração do desgaste da ferramenta de corte. Foram analisados os dados obtidos dos desgastes da ferramenta de corte pelas funções em comparação com os dados reais medidos, que se encontram o Anexo I deste trabalho. Nos experimentos de usinagem com estes aços foram utilizadas oito e seis diferentes condições de corte para o ABNT 1038 e 1045 respectivamente. A partir dos dados reais e os calculados pelos modelos foram feitas algumas análises dos comportamentos dos resultados calculados para termos uma noção da eficiência dos modelos obtidos a partir da correlação múltipla das seguintes variáveis: velocidade, tempo de corte, avanço e profundidade de corte em função do desgaste da ferramenta (vida útil da ferramenta).

Palavras chaves: Desgaste de Flanco, Usinagem e Modelo matemático.

## **ABSTRACT**

This paper aims to show the results analyzed from two models of which are appointed by Taylor simple and Taylor Expanded to measure the wear of the cutting tool. The study analyzed data obtained from the wear of the cutting tool as functions in comparison with actual data measured, which are in the Annex I this work. On the machining experiments were eight and six different cutting conditions respectively by the ABNT 1038 and 1045 steels used. Up the real data and calculated data by models were made some results behaviours analysis, which were calculated to have an efficiency notion of the tool wear models obtained by multiple correlation of the following variables: cutting speed, cutting time, feed and cutting depth.

Keywords: Flank wear of, Machining and mathematical models.

**SUMÁRIO**

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>2. CONCEITOS BÁSICOS USINAGEM.....</b>	<b>02</b>
<b>3. CONCEITOS BÁSICOS DE ESTATÍSTICA.....</b>	<b>07</b>
<b>3.1 Distribuição Normal.....</b>	<b>07</b>
<b>3.2. Teste de Hipótese.....</b>	<b>08</b>
<b>3.3 Análise de Regressão.....</b>	<b>11</b>
<b>3.3.1 Modelo de Regressão Linear Simples.....</b>	<b>11</b>
<b>3.3.2 Regressão Linear Múltipla.....</b>	<b>11</b>
<b>4. A FÓRMULA EXPANDIDA DE TAYLOR TENDO O DESGASTE DE FLANCO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE.....</b>	<b>13</b>
<b>4.1 Desenvolvimento Matemático para a Determinação dos Parâmetros da Fórmula de Taylor Modificada.....</b>	<b>13</b>
<b>4.2 Cálculo dos Parâmetros da Fórmula Expandida de Taylor Modificada.....</b>	<b>15</b>
<b>4.3 Cálculo dos Parâmetros da Fórmula de Taylor Simples.....</b>	<b>18</b>
<b>5. COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE TAYLOR EXPANDIDA E TAYLOR SIMPLES A PARTIR DOS VALORES REAIS MEDIDOS.....</b>	<b>49</b>
<b>5.1 Comparação dos Modelos de Taylor para o Aço ABNT 1038.....</b>	<b>49</b>
<b>5.2 Comparação dos Modelos de Taylor para o Aço ABNT 1045.....</b>	<b>54</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>58</b>
<b>7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>59</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>60</b>

**ANEXOS**

**LISTA DE FIGURA.**

- Figura. 2.1 – Ferramenta de corte.
- Figura. 2.2 – Processo de usinagem tipo torneamento.
- Figura. 2.3 – Processo de usinagem tipo fresamento frontal/cilíndrico.
- Figura. 2.4 – Processo de usinagem tipo furação.
- Figura. 2.5 – Desgastes de flanco e de cratera da ferramenta de corte.
- Figura. 2.6 – Desenho da montagem dos equipamentos utilizados nos ensaios de usinagem.
- Figura. 3.1 – Função de densidade de probabilidade da distribuição normal.
- Figura 3.2 - A distribuição Z com destaque as regiões de aceitação e rejeição.
- Figura 3.3 - Curva normal em que as regiões azuis são as áreas de rejeição.
- Figura 3.4 A interface do programa STATDISK.
- Figura 4.1 -- Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 1 para o aço ABNT 1038.
- Figura 4.2 – Gráfico do teste de hipótese, condição de corte 1 para o aço ABNT 1038.
- Figura 4.3 -- Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 2 para o aço ABNT 1038.
- Figura 4.4 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 2 para o aço ABNT 1038.
- Figura 4.5 -- Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 3 para o aço ABNT 1038.
- Figura 4.6 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 3 para o aço ABNT 1038.
- Figura 4.7 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 4 para o aço ABNT 1038.
- Figura 4.8 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 4 para o aço ABNT 1038.
- Figura 4.9 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 5 para o aço ABNT 1038.
- Figura 4.10 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 5 para o aço ABNT 1038
- Figura 4.11 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 6, para o aço ABNT 1038.
- Figura 4.12 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 6 para o aço ABNT 1038.
- Figura 4.13 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 7, para o aço ABNT 1038.
- Figura 4.14 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 7, para o aço ABNT 1038.
- Figura 4.15 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 8, para o aço ABNT 1038.
- Figura 4.16 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 8, para o aço ABNT 1038.
- Figura 4.17 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 1 para o aço ABNT 1045.
- Figura 4.18 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 1, para o aço ABNT 1045.
- Figura 4.19 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 2 para o aço ABNT 1045.
- Figura 4.20 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 2 para o aço ABNT 1045.
- Figura 4.21 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 3 para o aço ABNT 1045.
- Figura 4.22 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 3 para o aço ABNT 1045.
- Figura 4.23 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 4 para o aço ABNT 1045.
- Figura 4.24 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 4 para o aço ABNT 1045.
- Figura 4.25 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 5 para o aço ABNT 1045.
- Figura 4.26 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 5 para o aço ABNT 1045.

Figura 4.27 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 6 para o aço ABNT 1045.

Figura 4.28 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 6 para o aço ABNT 1045.

Figura. 5.1 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 1, do aço ABNT 1038, ( $V=100$  m/min,  $f=0,3$  mm/volta,  $a_p=3$  mm).

Figura. 5.2 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 2 do aço ABNT 1038 ( $V=140$  m/min,  $f=0,6$  mm/volta,  $a_p=5$  mm).

Figura. 5.3 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 3 do aço ABNT 1038 ( $V=180$  m/min,  $f=0,4$  mm/volta,  $a_p=3$  mm).

Figura. 5.4 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 4 do aço ABNT 1038 ( $V=220$  m/min,  $f=0,3$  mm/volta,  $a_p=5$  mm).

Figura. 5.5 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 5 do aço ABNT 1038 ( $V=140$  m/min,  $f=0,5$  mm/volta,  $a_p=1,5$  mm).

Figura.5.6 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 6 do aço ABNT 1038 ( $V=100$  m/min,  $f=0,6$  mm/volta,  $a_p=5$  mm).

Figura. 5.7 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 7 do aço ABNT 1038 ( $V=140$  m/min,  $f=0,3$  mm/volta,  $a_p=5$  mm).

Figura. 5.8 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 8 do aço ABNT 1038 ( $V=180$  m/min,  $f=0,2$  mm/volta,  $a_p=5$  mm).

Figura. 5.9 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 1 do aço ABNT 1045 ( $V=240$  m/min,  $f=0,3$  mm/volta,  $a_p=2$  mm).

Figura. 5.10 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 2 do aço ABNT 1045 ( $V=150$  m/min,  $f=0,4$  mm/volta,  $a_p=5$  mm).

Figura 5.11 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 3 do aço ABNT 1045 ( $V=190$  m/min,  $f=0,6$  mm/volta,  $a_p=2$  mm).

Figura 5.12 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 4 do aço ABNT 1045, ( $V=240$  m/min,  $f=0,3$  mm/volta,  $a_p=2$  mm).

Figura 5.13 – Gráfico de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 5 do aço ABNT 1045, ( $V=190$  m/min,  $f=0,6$  mm/volta,  $a_p=2$  mm).

Figura 5.14 - Gráfico de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 5.1 do aço ABNT 1045, ( $V=190$  m/min,  $f=0,6$  mm/volta,  $a_p=2$  mm).

Figura 5.15. Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 6 do aço ABNT 1045, ( $V=210$  m/min,  $f=0,2$  mm/volta,  $a_p=2$  mm).

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 4.1 Dados de entrada para cálculo dos parâmetros da Taylor modificada, aço ABNT 1038.
- Tabela 4.2 Dados de entrada para cálculo dos parâmetros da Taylor modificada, aço ABNT 1045.
- Tabela 4.3 – Coeficientes de correlação para o aço ABNT 1038.
- Tabela 4.4 – Coeficientes de correlação para o aço 1045.
- Tabela 4.5 - Condições de corte para os ensaios do aço 1038 e as fórmulas simples de Taylor
- Tabela 4.6 - Condições de corte para os ensaios do aço 1045 e as fórmulas simples de Taylor.
- Tabela 4.7 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1038, para a condição de corte 1.
- Tabela 4.8 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1038, para a condição de Corte 2.
- Tabela 4.9 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1038, para a Condição de Corte 3.
- Tabela 4.10 - Coeficientes de correlação simples para o aço 1038, na condição de corte 4.
- Tabela 4.11 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1038, na condição de corte 5.
- Tabela 4.12 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1038, na a condição de corte 6.
- Tabela 4.13- Coeficientes de correlação simples para o aço 1038, na condição de corte 7.
- Tabela 4.14 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1038, na condição de corte 8.
- Tabela 4.15 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1045, na condição de corte 1.
- Tabela 4.16 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1045, na condição de corte 2.
- Tabela 4.17 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1045, na condição de corte 3.
- Tabela 4.18 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1045, na condição de Corte 4.
- Tabela 4.19 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1045, na Condição de Corte 5.
- Tabela 4.19 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1045, na Condição de Corte 6.



## 1. INTRODUÇÃO.

Um **modelo** matemático é uma representação ou interpretação simplificada da realidade, ou uma interpretação de um fragmento de um sistema, segundo uma estrutura de conceitos mentais ou experimentais. Ele apresenta apenas uma visão ou cenário de um fragmento do todo. Normalmente, para estudar um determinado fenômeno complexo, várias situações podem ser propostas. Os modelos matemáticos são utilizados praticamente em todas as áreas científicas, como, por exemplo, na biologia, química, física, economia, engenharia e na própria matemática pura. Para representar um fenômeno físico complexo pode-se utilizar: modelos físicos, modelos matemáticos; ou modelos híbridos de vários tipos. As representações físicas são baseadas no Teorema de Bridgman e as escalas de semelhança são calculadas com base no Teorema de Buckingham (Gonçalves, 1978), que são muito utilizados, em laboratórios, para estudos de maiores complexidades, como estudos de hidrodinâmica em engenharia hidráulica, por exemplo, nos cálculos de usinas hidrelétricas e de navios; estudos de aerodinâmica, por exemplo, em aviões, turbinas eólicas ou automóveis; e na mecânica quântica, por exemplo, no cálculo da velocidade ou da energia de partículas nucleares. Praticamente nenhuma grande obra hidráulica, porto ou usina hidrelétrica, é projetado sem estudos detalhados em vários modelos matemáticos de diversas categorias como hidrologia, hidráulica, mecânica dos solos. Também são muitíssimo utilizados na construção de vários modelos físicos específicos, tais como, em turbinas, em casa de força, em eclusas e em escada de peixe, entre outros. Estes modelos podem ser bidimensionais ou tridimensionais (modelo de conjunto). Na “Teoria de Modelos” é uma estrutura composta por: um conjunto universo e por constantes; e por relações e funções, definidas no conjunto universo. Este trabalho tem como objetivo mostrar um modelo que descreve bem o desgaste da ferramenta de corte a partir das variáveis: velocidade de corte; tempo de corte; avanço e profundidade de corte. A partir da equação de Taylor expandida (Mesquita, 1980), a qual relacionava a velocidade de corte em função das variáveis dependentes: avanço, profundidade de corte, tempo de corte e desgaste da ferramenta; foi proposto um novo modelo algébrico para descrever o desgaste da ferramenta de corte em função destas mesmas variáveis. Para este novo modelo algébrico seus parâmetros foram determinados através de uma correlação múltipla das variáveis envolvidas no processo de desgaste para os aços ABNT 1038 e 1045. Os resultados obtidos a partir do modelo proposto foram comparados com os dados reais levantados pela medição do desgaste da ferramenta nos ensaios de usinagem e com os valores calculados através da fórmula de Taylor simples. Como era de se esperar, uma vez que, o número de variáveis era menor, pois o avanço e a profundidade de corte foram e são mantidos constantes na fórmula de Taylor simples, o cálculo do desgaste através desta fórmula continua apresentando uma maior correlação com os desgastes levantados experimentais, do que a nova equação algébrica proposta. No entanto, tendo o menor coeficiente de correlação, entre o desgaste da ferramenta de corte e as variáveis dependentes, para todos os ensaios de usinagem dos dois aços, sido igual a 91%, isto demonstra ser o modelo proposto viável para descrição do fenômeno físico estudado. Para o novo modelo algébrico foram realizados testes de hipótese, para todas as condições de corte dos experimentos, com a finalidade de se determinar o percentual de erro do modelo proposto. Os desvios apresentados pelos testes de hipótese foram tão pequenos que podem ser desconsiderados.

## 2. CONCEITOS BÁSICOS USINAGEM

Como operações de usinagem entende-se aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou dimensões ou um acabamento ou ainda uma combinação qualquer destes três itens produzem cavaco. Cavaco é definido como sendo a porção de material da peça retirada pela ferramenta de corte, caracterizando-se por apresentar formas geométricas distintas (Ferraresi, 1977).

Denomina-se de ferramenta de usinagem mecânica a ferramenta destinada à remoção de cavaco. No caso de possuir uma única superfície de saída, a ferramenta é chamada de ferramenta mono cortante. A superfície de saída é a superfície da cunha cortante sobre a qual o cavaco se forma. Denomina-se cunha cortante (ou gume cortante) a parte da ferramenta na qual o cavaco se origina, através do movimento relativo entre ferramenta e peça.

As arestas que limitam a superfície da cunha são arestas de corte. Estas podem ser retilíneas, angulares ou curvilíneas. As superfícies de folga são as superfícies da cunha cortante que defrontam com as superfícies transitórias e usinada da peça. As cunhas cortantes de uma ferramenta de corte são formadas pelas superfícies de saída e de folga. A Figura 2.1 sintetiza essas características.

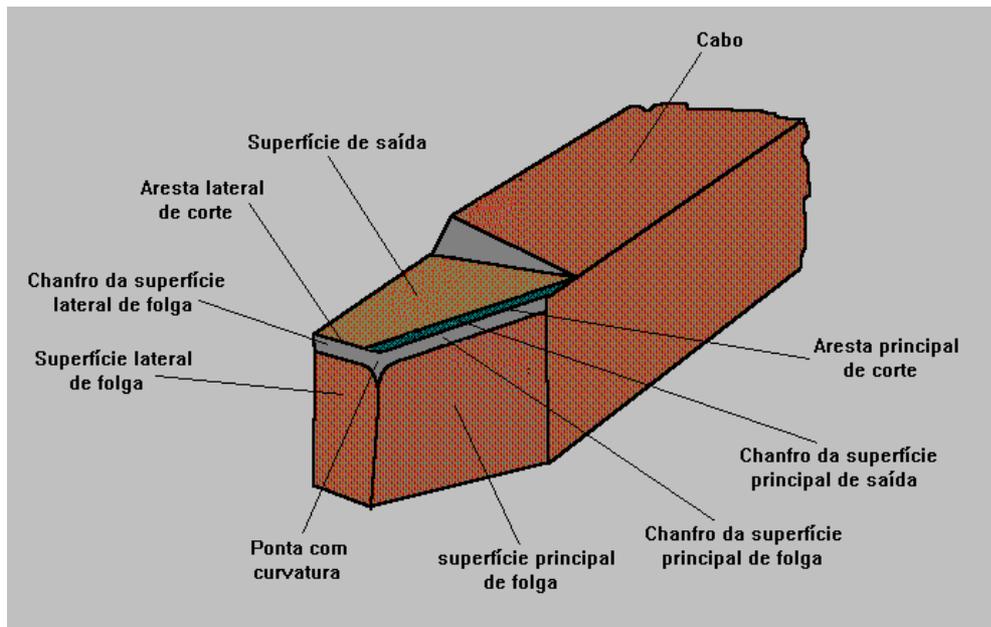


Figura. 2.1 – Ferramenta de corte.

Existem vários processos de usinagem, entre eles, **torneamento**, **fresamento**, **furação**. Seguem abaixo algumas descrições sobre esses processos de usinagem.

- Torneamento – É o processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas de corte monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo. A figura 2.2 sintetiza esse processo.

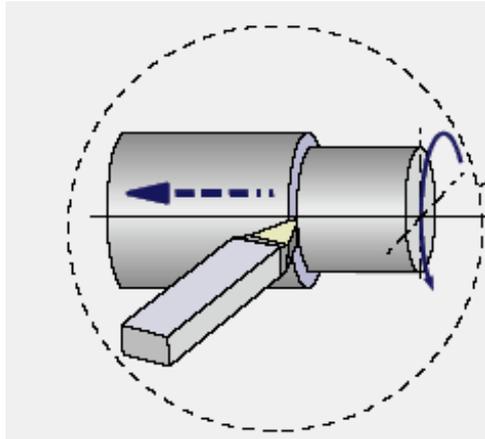


Figura. 2.2 – Processo de usinagem tipo torneamento

- Fresamento (ou fresagem) - Processo que utiliza ferramentas chamadas de fresas. Permite a obtenção de peças com geometrias complexas. Pode ser fresagem cilíndrica ou de topo. A Figura 2.3 ilustra esse tipo de processo de usinagem fresagem cilíndrica.

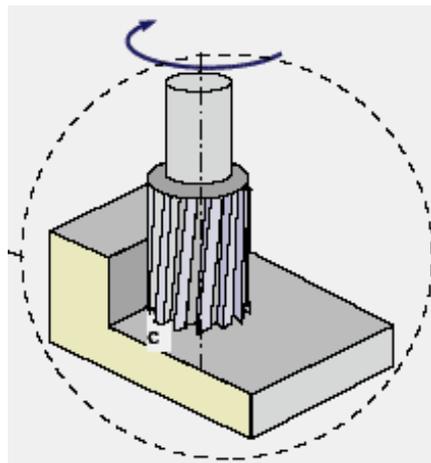


Figura. 2.3 – Processo de usinagem tipo fresamento frontal/cilíndrico.

- Furação - O processo de **furação** é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria manufatureira. A grande maioria das peças de qualquer tipo de indústria, tem pelo menos um furo e, somente uma parte muito pequena dessas peças, já vem com o furo pronto do processo de obtenção da peça bruta, seja ele fundição, forjamento. A Figura 2.4 ilustra esse tipo de processo de usinagem.

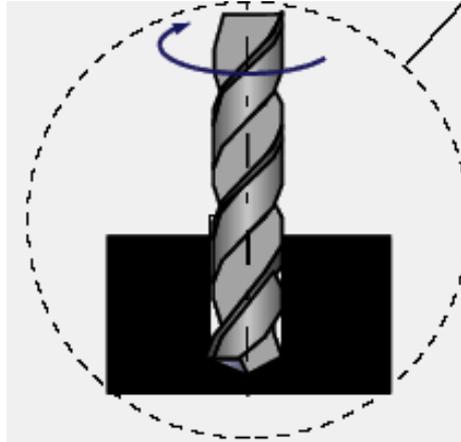


Figura. 2.4 – Processo de usinagem tipo furação.

Durante a usinagem ocorre um desgaste nas superfícies de saída e de folga da ferramenta de corte. Destingem-se dois tipos de desgastes: os originados na superfície de saída e os originados na superfície de folga (ou flanco da ferramenta). O desgaste da superfície de saída é causado pelo atrito entre o cavaco e esta superfície, sendo denominada de desgaste de cratera. O desgaste da superfície de folga é causado pelo atrito da superfície transitória ou usinada da peça com a superfície de folga e é denominado de desgaste de flanco. O desgaste de flanco provoca um deslocamento da aresta cortante e isto influencia diretamente o dimensionamento da peça.

Neste trabalho o desgaste da ferramenta de corte será analisado para o processo de torneamento levando-se em consideração unicamente o desgaste de flanco. A importância de se medir o desgaste da ferramenta de corte, na figura 2.5, que a distância de  $D$  provocada pelo desgaste de flanco  $V_B$  na ferramenta de corte influencia no diâmetro da peça duas vezes a distância  $D$ .

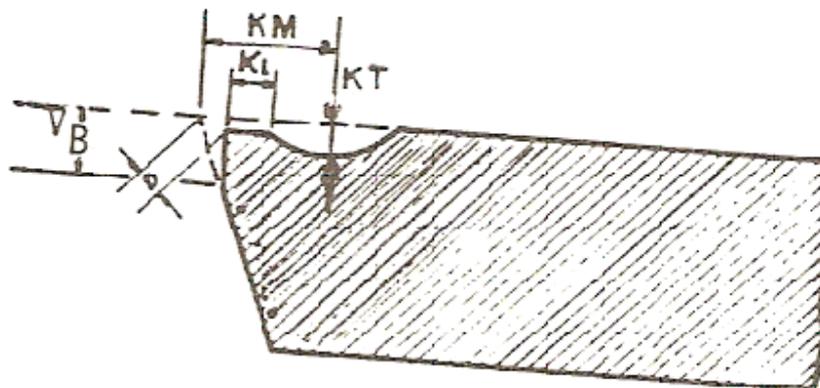


Figura. 2.5 – Desgastes de flanco e de cratera da ferramenta de corte.

A montagem dos equipamentos usados nos ensaios de usinagem desse trabalho está esquematicamente representada na figura 2.6. (Mesquita, 1981).

Características dos equipamentos:

01- torno Imor

tipo: p-400

fabricante: Indústria Romi S/A – Sta Bárbara d'Oeste – São Paulo

distancia entre os pontos: 1000 mm

altura dos pontos: 250 mm

diâmetro máximo torneável: 430 mm

02- ferramenta de corte e porta – ferramenta.

ferramenta – insertos reversíveis

fabricante: Brassinter S/A – São Paulo

referência: SNGN 12 04 08 TXL

formato: quadrada 12,700 x 12,700 mm

espessura: 4,762 mm

tipo: ABNT P-20

número de arestas cortantes: 8

porta – ferramenta

fabricante: Brassinter S/A – São Paulo

modelo: SBTR – 16 mm

dimensões: 25 x 25 x 150 mm

ângulo: de saída -6°

de incidência 6°

de posição 75°

de ponta 90°

03- plataforma dinamométrica de três componentes

sistema de medição: cristais piezoeleétricos

fabricante: Kistler Instruments – Suíça

modelo: 9257 D

tipo: SN 61370

04- amplificadores de tensão com três módulos ( um para cada componente da força de usinagem)

fabricante: Kistler Instruments – Suíça

tipo: 5001

05- voltímetro analógico ( um para cada componente da força de usinagem)

fabricante: Kistler Instruments – Suíça

tipo: 5501

06- taco-gerador

modelo: 9150, DC TACHOMETER

constante de medição: 7,0 volts de saída, correspondendo a 1000 rpm

fabricante: Beckman, Helipot Div.

07-multímetro digital

modelo: M 35 13 n°261

fabricante: Analog Instrumentos Analógicos Digitais Ltda - Indústria Brasileira

medição de tensão em C.C.

faixa de medição: 0 a 20 volts

08-variador de tensão

tipo: RT1 – 8R

fabricante: Eletro Máquina “Anel” S/A – São Paulo

potência: 25 KVA

09- retificador

fabricante: Eletro Máquina “Anel” S/A – São Paulo

10-motor de corrente contínua

fabricante: Eletro Máquina “Anel” S/A – São Paulo

potência: 22 Kwatts

### 3. CONCEITOS BÁSICOS DE ESTATÍSTICA.

Uma das ferramentas mais utilizadas, para a descrição de fenômenos, na estatística é a função de densidade de probabilidade da distribuição normal. Sua importância deve-se ao fato dessa função poder descrever diversos fenômenos físicos da natureza. Todo experimento repetido uma grande quantidade de vezes, a variável aleatória tende a um valor central e sua distribuição tende a ter uma distribuição normal. Logo abaixo segue uma síntese desse conceito, uma vez que, neste trabalho será verificado: se o desgaste de flanco da ferramenta de corte, em função da variação das condições de corte (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e tempo de usinagem) apresenta ou não uma distribuição normal e se será possível modelar o desgaste de flanco através dessa distribuição.

#### 3.1 Distribuição Normal

Em 1733, Abraham de Moivre sugeriu a estrutura da distribuição normal e apresentou o conceito de desvio padrão (Bernstein, 1996). Infelizmente a trabalho de De Moivre ficou perdido por algum tempo e Gauss, independentemente, desenvolveu uma distribuição normal cerca de cem anos depois. Embora De Moivre tivesse posteriormente recebido o crédito pela dedução, uma distribuição normal é também referida como “Distribuição Gaussiana” (Montgomery, 2003). Essa distribuição, de grande importância na estatística, tem a seguinte função densidade de probabilidade definida pela equação (3.1).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < x < \infty \quad (3.1)$$

Observando a expressão (3.1), vê-se imediatamente que ela depende de dois parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$ , os quais são sua média e o desvio-padrão, conforme a própria notação sugere. Uma importante propriedade dessa distribuição é que se os valores da média e desvio-padrão não forem 0 e 1 respectivamente, deve-se ser feita a padronização (utilizando a equação 3.2) para que esses valores tenham uma média  $\mu=0$  e um desvio padrão  $\sigma=1$ , assim com esses dados pode-se utilizar a tabela da distribuição normal (Taqqui, 1994). Analisando matematicamente a expressão (3.1), pode se notar que seu gráfico será simétrico em relação a  $\mu$ , que também será a moda e a mediana, decrescente assintoticamente a zero nos extremos e com pontos de inflexão em  $\mu - \sigma$  e  $\mu + \sigma$ , conforme mostra a figura 3.1

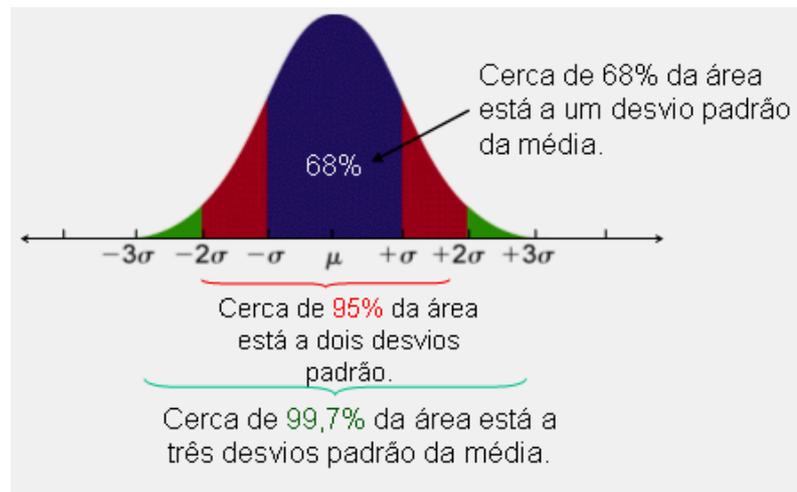


Figura. 3.1 – Função de densidade de probabilidade da distribuição normal.

A curva normal tem as seguintes características:

- Tem forma de sino;
- É simétrica em relação à perpendicular que passa pela média ( $\mu$ );
- A média, a mediana e a moda são coincidentes;
- A curva tem dois pontos de inflexão, um desvio-padrão ( $\sigma$ ) acima e abaixo da média;
- A área sob a curva totaliza 1 ou 100%;
- Aproximadamente 68% ( $\approx 2/3$ ) dos valores de X situam-se entre os pontos  $(\mu - \sigma)$  e  $(\mu + \sigma)$ ;
- Aproximadamente 95% dos valores de X estão entre  $(\mu - 2\sigma)$  e  $(\mu + 2\sigma)$  e
- Aproximadamente 99,7% dos valores de x estão entre  $(\mu - 3\sigma)$  e  $(\mu + 3\sigma)$ .

A importância da distribuição normal decorre de razões práticas e teóricas. Em relação à importância prática está em que diversas variáveis encontradas na realidade se distribuem aproximadamente segundo o modelo normal que pode, então, ser usado para descrever o seu comportamento. A importância teórica está ligada ao fato de ser a distribuição normal uma distribuição limite, fato esse resultante do chamado “Teorema do limite central” (Silva, 2004). Esse importante teorema afirma que, de modo geral, uma variável aleatória resultante de uma soma de  $n$  variáveis aleatórias e independentes, no limite quando  $n$  tende a infinito tem uma distribuição normal. Os próprios fenômenos naturais, de certa forma, oferecem situações semelhantes à mencionada no teorema, em que diversas causas independentes somam seus efeitos para produzir um certo resultado. Por outro lado, uma consequência do teorema é que se pode aproximar pela normal várias distribuições importantes que se enquadram na situação mencionada como, por exemplo, a distribuição t de Student que pode servir de modelo para a aproximação da normal. Os efeitos do teorema do limite central são particularmente visíveis quando as variáveis independentes somadas são igualmente distribuídas, caso em que a convergência para a normal costuma ser bastante rápida.

### 3.2. Teste de Hipótese

Uma hipótese estatística é uma afirmativa a respeito de um parâmetro de uma distribuição de probabilidade (Montgomery, 2003, Lehmann, 2005). Por exemplo, podemos formalmente formular a hipótese que a produtividade é diferente de 2,5 peças/hora simplesmente escrevendo-se:

$$H_0 : \mu = 2,5 \text{ peças / hora}$$

$$H_1 : \mu \neq 2,5 \text{ peças / hora}$$

$H_0$  é chamada de hipótese nula e  $H_1$  de hipótese alternativa. Nesse caso, a alternativa formulada é bilateral, mas também podem ser estabelecidas alternativas unilaterais, tais como:

$$H_0 : \mu = 2,5 \text{ peças / hora}$$

$$H_1 : \mu < 2,5 \text{ peças / hora}$$

ou

$$H_0 : \mu = 2,5 \text{ peças / hora}$$

$$H_1 : \mu > 2,5 \text{ peças / hora}$$

O Teste de Hipótese tem as seguintes características básicas:

- Os testes de hipótese são uma das aplicações da estatística mais usada;
- Via de regra, a hipótese nula é feita com base no comportamento passado do produto/processo/serviços, enquanto a alternativa é formulada em função de alterações ou inovações recentes.
- No ambiente atual de melhoria contínua, é fácil entender a importância dos testes de hipótese: eles permitem confirmar a eficácia das medidas de melhoria adotadas; e
- Ao testar a hipótese, toma-se uma amostra aleatória do sistema em estudo e se calcula o parâmetro desejado. Conforme o valor do parâmetro, a hipótese nula será aceita ou rejeitada, a partir de procedimentos estatísticos.

Com base em todas as características deste tipo de teste, para facilitar a compreensão dos resultados é mais didático dividir em cinco etapas a resolução dos testes.

### **1º Etapa - Definição da Hipótese**

O primeiro passo é o estabelecimento das hipóteses: hipótese nula e hipótese alternativa.

Hipótese Nula ( $H_0$ ): É um valor suposto para um parâmetro. Se os resultados da amostra não forem muito diferentes de  $H_0$ , ela não poderá ser rejeitada.

Hipótese Alternativa ( $H_1$ ): É uma hipótese que contraria a hipótese nula, complementar de  $H_0$ . Essa hipótese somente será aceita se os resultados forem muito diferentes de  $H_0$ .

### **2º Etapa - Calcular a estatística do Teste.**

É o valor calculado a partir da amostra, que será usado na tomada de decisão. Uma maneira de tomar-se uma decisão é comparar o valor tabelado com a estatística do teste. Para o caso de testes de médias, a estatística do teste é a variável padronizada  $Z$ , neste trabalho será usado o teste estatístico da distribuição normal, pois, os dados do trabalho de (Mesquita, 1980) utilizando o teste de Kolmogorov-Smirnov (Doksum, 2001; Ross, 1997; Ramirez, 1979) nesses

dados indicou que os mesmos têm uma distribuição normal, assim a estatística de teste nessa condição deve-se utilizar a equação (3.2):

$$Z_{cal} = \frac{(\bar{X} - \mu)}{(\sigma/\sqrt{n})} \quad (3.2)$$

Estatística do teste
Variabilidade das médias

Onde:

$\bar{X}$  é o valor médio da amostra  
 $\mu$  é o valor médio da população  
 $n$  é o tamanho da amostra e  
 $\sigma$  é o desvio padrão.

### 3º Etapa - Região Crítica.

O valor da estatística do teste, no caso, o valor Z, é calculado supondo que a hipótese nula ( $H_0$ ) é verdadeira. No entanto, o valor calculado pode estar associado a uma probabilidade de ocorrência muito baixa. Nesse caso, a hipótese nula deve ser rejeitada e aceitamos a hipótese alternativa( Larson, 1982; James, 1996).

A região crítica é a região onde  $H_0$  é rejeitada. A área da região crítica é igual ao nível de significância ( $\alpha$ ), que estabelece a probabilidade de rejeitar  $H_0$ , quando ela é verdadeira. Por exemplo, se utilizarmos o nível de significância de 5%, a probabilidade de rejeitar  $H_0$  quando ela é verdadeira é igual a 5%. Na prática, os valores usuais de alfa são  $\alpha = 0,01$  ou  $0,05$  ou  $0,10$ . A figura 3.2 ilustra as regiões de significância na curva da normal.



Figura 3.2 -A distribuição Z com destaque as regiões de aceitação e rejeição.

A figura 3.3 mostra as regiões críticas e as regiões de aceitação para os testes de hipótese unilateral. Para se entender esse teste suponha o caso do diâmetro de uma peça que deve ter um valor nominal de 50 mm. Caso o valor médio real seja maior que 50 mm ( $\mu > 50$ ) a hipótese nula

( $\mu = 50$ ) deve ser rejeitada. Caso o valor médio real seja menor que 50 mm ( $\mu < 50$ ) a hipótese nula deve ser rejeitada. A hipótese nula é aceita para valores próximos a 50 mm, dentro de um intervalo de confiança definido pelo valor de  $\alpha$  (o nível de significância).

**Unilateral à esquerda**  
 (área de rejeição à esquerda):  
**H<sub>0</sub>:  $\mu = 50$**   
**H<sub>1</sub>:  $\mu > 50$**

**Unilateral à direita**  
 (área de rejeição à direita):  
**H<sub>0</sub>:  $\mu = 50$**   
**H<sub>1</sub>:  $\mu < 50$**

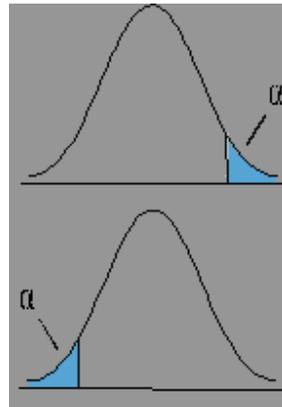


Figura 3.3 - Curva normal em que as regiões azuis são as áreas de rejeição.

#### **4º Etapa - Regra de Decisão:**

Se o valor da estatística do teste cair na região crítica (região azul nas figuras 3.2 e 3.3), rejeita-se  $H_0$ . Ao rejeitar a hipótese nula ( $H_0$ ) existe uma forte evidência de sua falsidade. Ao contrário, quando a aceitamos, dizemos que não houve evidência amostral significativa no sentido de permitir a rejeição de  $H_0$ .

#### **5º Etapa - Conclusão.**

**Aceitar**  $H_0$  implica que a hipótese nula não pode ser rejeitada.

**Rejeitar**  $H_0$  implica que temos evidências estatísticas para rejeitá-la com um risco conhecido:  $\alpha$ .

### **3.3 Análise de Regressão.**

Em muitos problemas envolvendo duas ou mais variáveis, inerentemente relacionadas, muitas vezes é necessário explorar a natureza desta relação. A análise de regressão é uma técnica estatística para modelar e investigar a relação entre duas ou mais variáveis. A análise de regressão pode ser usada para construir um modelo que descreve um determinado fenômeno físico. Este modelo pode também ser usado para otimização de processos ou para finalidades de controle de processos. Os modelos de regressão podem ser simples ou múltiplos (Montgomery, 2003).

### 3.3.1 Modelo de Regressão Linear Simples.

Chamamos de modelo de regressão linear simples aquele que relaciona apenas uma variável independente. Na equação (3.3) a função  $f(X)$  descreve a relação entre as variáveis  $Y$  e  $X$  e  $\varepsilon$  descreve os erros aleatórios do modelo algébrico.  $Y$  é a variável resposta ou dependente, enquanto que  $X$  é a variável independente, concomitante, covariável ou variável preditora. *O caso mais simples de regressão é quando temos duas variáveis e a relação entre elas pode ser representada por uma linha reta, que é definida através da Regressão linear simples.*

$$Y = f(X) + \varepsilon \quad (3.3)$$

### 3.3.2 Regressão Linear Múltipla.

Muitas aplicações da análise de regressão envolvem situações em que há mais de uma variável independente. O modelo de regressão que contém mais de uma variável aleatória ou independente é chamado de modelo de regressão múltipla. Modelos de regressão múltiplos são frequentemente usados como aproximações de funções (Lima, 2006).

A finalidade das variáveis independentes adicionais é melhorar a capacidade de predição em confronto com a regressão linear simples. Isto é, reduzir o coeficiente do intercepto, o qual, em regressão, significa a parte da variável dependente explicada por outras variáveis, que não a considerada no modelo (Gonçalves, 1978).

Mesmo quando estamos interessados no efeito de apenas uma das variáveis, é aconselhável incluir as outras capazes de afetar  $Y$ , efetuando uma análise de regressão múltipla, por 2 razões:

- a) Para reduzir os resíduos estocásticos. Reduzindo-se a variância residual (ERRO PADRÃO DA ESTIMATIVA, ou seja, o desvio padrão), aumenta a força dos testes de significância;
- b) Para eliminar a tendência que poderia resultar se simplesmente ignorássemos uma variável que afeta  $Y$  substancialmente.

O ideal é obter o mais alto relacionamento explanatório com o mínimo de variáveis independentes, sobretudo em virtude do custo na obtenção de dados para muitas variáveis e também pela necessidade de observações adicionais para compensar a perda de **graus de liberdade** decorrente da introdução de mais variáveis independentes.

A equação (3.4) da regressão múltipla tem a seguinte forma:

$$Y_c = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + \varepsilon \quad (3.4)$$

onde:

- $a$  = intercepta o eixo  $y$ ;
- $b_i$  = coeficiente angular da  $i$ -ésima variável;
- $k$  = número de variáveis independentes;
- $\varepsilon$  = o erro ou resíduo das variáveis aleatórias.

As ferramentas estatísticas acima apresentadas serão usadas neste trabalho da seguinte forma:

- O teste de hipótese para determinar o desvio do coeficiente de correlação do modelo proposto para descrever o desgaste de uma ferramenta de corte (veja capítulo4).

- A regressão linear simples para obter as equações simples de Taylor, que envolvem as variáveis: velocidade de corte e tempo de vida da ferramenta de corte; e
- A regressão múltipla para calcular os parâmetros da fórmula de Taylor expandida do modelo aqui proposto para descrever o desgaste da ferramenta em função da velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e tempo de corte.

Esse programa tem diversas funções no tratamento de dados estatísticos. Sua interface é mostrada na figura 4.1 para um modelo de regressão simples.

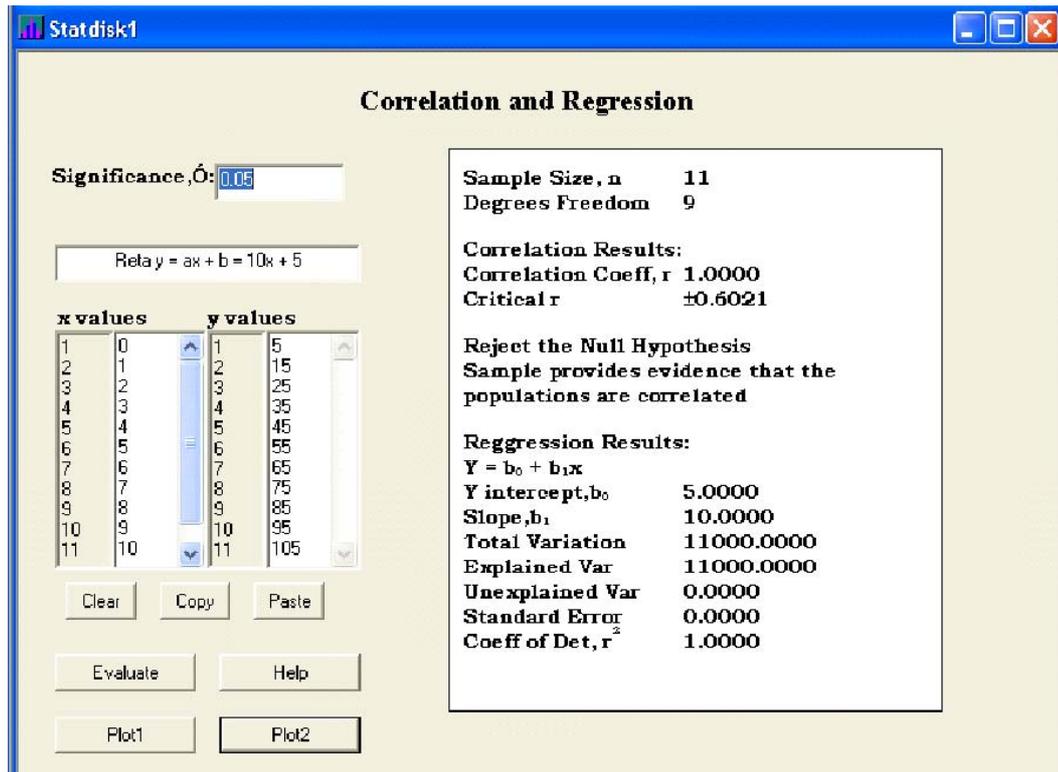


Figura 3.4 A interface do programa STATDISK.

#### 4. A FÓRMULA EXPANDIDA DE TAYLOR TENDO O DESGASTE DE FLANCO COMO VARIÁVEL DEPENDENTE.

A fórmula expandida de Taylor tem sido usada por diferentes autores com diferentes configurações (Kronenberg, 1966; ASTM, 1959; AWF 158, 1949; Mesquita, 1981; Boehs, L., 1988, Widia, \*\*\*). Neste trabalho o desgaste de flanco da ferramenta de corte (VB) será utilizado como a variável dependente dos demais parâmetros de usinagem, a saber: a velocidade de corte (V); o tempo de corte (T); o avanço (f) e da profundidade de corte (ap).

##### 4.1 Desenvolvimento Matemático para a Determinação dos Parâmetros da Fórmula de Taylor Modificada

O novo modelo algébrico designado por “Fórmula Expandida de Taylor Modificada” relaciona as variáveis de usinagem conforme equação (4.1), e foi proposto a partir do trabalho de Mesquita (1981):

$$VB = C.V^E T^F f^G ap^H \quad (4.1)$$

Onde:

VB – a variável dependente é o desgaste de flanco da ferramenta de corte dado em (mm);  
V, T, f ap – as variáveis independentes são a velocidade de corte (m/min); o tempo de corte (min); avanço (mm/volta) e profundidade de corte (mm), respectivamente;  
C, E, F, G, H – são os parâmetros do modelo algébrico aqui proposto, que devem assumir valores diferentes para cada tipo de material da peça e ferramenta de corte.

Para a determinação dos parâmetros da fórmula de Taylor modificada serão utilizados os dados experimentais levantados por Mesquita (1981) e que são apresentados no anexo I deste trabalho. Durante os ensaios de usinagem foram medidos os valores que o desgaste de flanco (VB<sub>i</sub>) atingiu em cada condição de corte utilizada (V<sub>i</sub>, f<sub>i</sub>, ap<sub>i</sub>) e em diferentes tempos de corte (T<sub>i</sub>), onde i varou de 1 a n, assim como descreve a equação (4.2).

$$VB_i = C.V_i^E T_i^F f_i^G ap_i^H \quad (4.2)$$

Para a determinação dos parâmetros C, E, F, G e H da fórmula de Taylor expandida modificada (4.1) fez-se uso do logaritmo neperiano em ambos os lados da equação (4.2) obtendo-se assim a equação (4.3).

$$\ln VB_i = \ln C + E \ln V_i + F \ln T_i + G \ln f_i + H \ln ap_i \quad (6.3)$$

Com base no desenvolvimento em modelos matemáticos, sempre a existência de variáveis não controladas que passaremos a chamá-los de resíduos, representado por  $\varepsilon_i$ , ou seja, o resíduo em cada ponto i, será dada pela seguinte expressão (4.4):

$$\varepsilon_i = \ln C + E \ln V_i + F \ln T_i + G \ln f_i + H \ln ap_i - \ln VB_i \quad (4.4)$$

Supondo agora todos os possíveis resíduos, devido a influência de todas as variáveis de corte, tem-se a soma quadrática dos resíduos dada pela equação (4.5).

$$M = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^N (\ln C + E \ln V_i + F \ln T_i + G \ln f_i + H \ln ap_i - \ln VB_i)^2 \quad (4.5)$$

Considerando M como uma função das incógnitas C, E, F, G e H a condição para que a soma dos quadrados dos resíduos, M, seja mínima é que a derivada parcial de M, em relação a cada uma das derivadas parciais, seja nula (equações (4.6)).

$$\frac{\partial M}{\partial C} = 0 \quad \frac{\partial M}{\partial E} = 0 \quad \frac{\partial M}{\partial F} = 0 \quad \frac{\partial M}{\partial G} = 0 \quad \frac{\partial M}{\partial H} = 0 \quad (4.6)$$

Desenvolvendo-se as derivadas tem-se o conjunto de equações (4.7)

$$\frac{\partial M}{\partial C} = 2 \sum_{i=1}^N (\ln C + E \ln V_i + F \ln T_i + G \ln f_i + H \ln ap_i - \ln VB_i) \frac{1}{C} = 0 \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial M}{\partial E} = 2 \sum_{i=1}^N (\ln C + E \ln V_i + F \ln T_i + G \ln f_i + H \ln ap_i - \ln VB_i) \ln V_i = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial F} = 2 \sum_{i=1}^N (\ln C + E \ln V_i + F \ln T_i + G \ln f_i + H \ln ap_i - \ln VB_i) \ln T_i = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial G} = 2 \sum_{i=1}^N (\ln C + E \ln V_i + F \ln T_i + G \ln f_i + H \ln ap_i - \ln VB_i) \ln f_i = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial H} = 2 \sum_{i=1}^N (\ln C + E \ln V_i + F \ln T_i + G \ln f_i + H \ln ap_i - \ln VB_i) \ln ap_i = 0$$

Considerando que  $\sum \ln C = N \ln C = NI$  as equações (4.7) passam a ter a configuração das equações (4.8)

$$NI + E \sum_{i=1}^N \ln V_i + F \sum_{i=1}^N \ln T_i + G \sum_{i=1}^N \ln f_i + H \sum_{i=1}^N \ln ap_i - \sum_{i=1}^N \ln VB_i = 0 \quad (4.8)$$

$$NI \sum_{i=1}^N \ln V_i + E \sum_{i=1}^N (\ln V_i)^2 + F \sum_{i=1}^N \ln T_i \cdot \ln V_i + G \sum_{i=1}^N \ln f_i \cdot \ln V_i + H \sum_{i=1}^N \ln ap_i \cdot \ln V_i - \sum_{i=1}^N \ln VB_i \cdot \ln V_i = 0$$

$$NI \sum_{i=1}^N \ln T_i + E \sum_{i=1}^N \ln V_i \cdot \ln T_i + F \sum_{i=1}^N (\ln T_i)^2 + G \sum_{i=1}^N \ln f_i \cdot \ln T_i + H \sum_{i=1}^N \ln ap_i \cdot \ln T_i - \sum_{i=1}^N \ln VB_i \cdot \ln T_i = 0$$

$$NI \sum_{i=1}^N \ln f_i + E \sum_{i=1}^N \ln V_i \cdot \ln f_i + F \sum_{i=1}^N \ln T_i \cdot \ln f_i + G \sum_{i=1}^N (\ln f_i)^2 + H \sum_{i=1}^N \ln ap_i \cdot \ln f_i - \sum_{i=1}^N \ln VB_i \cdot \ln f_i = 0$$

$$NI \sum_{i=1}^N \ln ap_i + E \sum_{i=1}^N \ln V_i \cdot \ln ap_i + F \sum_{i=1}^N \ln T_i \cdot \ln ap_i + G \sum_{i=1}^N \ln f_i \cdot \ln ap_i + H \sum_{i=1}^N (\ln ap_i)^2 - \sum_{i=1}^N \ln VB_i \cdot \ln ap_i = 0$$

Portanto, conforme as equações (4.8), tem-se 5 equações e 5 incógnitas (I, E, F, G e H). A solução deste sistema de equações heterogêneas será obtida utilizando o programa STADISK (Triola, 2005).

#### 4.2 Cálculo dos Parâmetros da Fórmula Expandida de Taylor Modificada

Os parâmetros da fórmula expandida de Taylor modificada foram obtidos através da resolução do sistema de equações (4.8), usando-se os dados experimentais dos anexos 1 e 2, respectivamente para os aços ABNT 1038 e ABNT 1045. Foram calculados os logaritmos naturais de acordo com as equações (4.8), veja tabelas que se encontram nos Anexos III e IV deste trabalho.

Os dados de entrada para o cálculo dos parâmetros da Taylor modificada foram os dados das tabelas abaixo 4.1 e 4.2 trabalhados de acordo com as multiplicações e somatórios indicados no conjunto das cinco equações (4.8). As tabelas 4.1 e 4.2 mostram os coeficientes do sistema de equações (4.8), uma vez efetuadas estas operações algébricas, para os aços ABNT 1038 e ABNT 1045 respectivamente.

Tabela 4.1 Dados de entrada para cálculo dos parâmetros da Taylor modificada, aço ABNT 1038.

Incógnitas:	I	E	F	G	H	C
Coefficientes da 1ª equação	127	-130,1047	160,1785	311,7301	-168,1351	632,74205
Coefficientes da 2ª equação	-16523,3	16927,24	-20839,98	-40557,6	21875,166	-82322,731
Coefficientes da 3ª equação	20342,669	-20839,98	25657,151	49932,46	-26931,622	101351,67
Coefficientes da 4ª equação	39589,723	-40557,55 9	49932,459	97175,65	-52412,759	197244,74
Coefficientes da 5ª equação	-21353,15 3	21875,166	-26931,62	-52412,8	28269,399	-106386,1 2

Tabela 4.2 Dados de entrada para cálculo dos parâmetros da Taylor modificada, aço ABNT 1045.

Coefficientes	NI	E	F	G	H	C
Coefficientes da 1ª equação	117	-99,154481	102,8186	246,5329	-155,839	577,5924
Coefficientes da 2ª equação	-11601,074	9831,61108	-10194,9	-24444,8	15452,17	-57270,9
Coefficientes da 3ª equação	12029,7787	-10194,927	10571,67	25348,17	-16023,2	59387,25
Coefficientes da 4ª equação	28844,3517	-24444,844	25348,17	60778,48	-38419,5	142395,5
Coefficientes da 5ª equação	-18233,204	15452,1701	-16023,2	-38419,5	24285,9	-90011,6

Os coeficientes de correlação múltipla fornecidos pelo STATDISK são apresentados nas tabelas 4.3 e 4.4.

As tabelas 4.3 e 4.4 mostram respectivamente os coeficientes de correlação múltipla para os aços ABNT 1038 e 1045, utilizando o programa STATDISK 9.0. Uma vez que a equação (4.2) foi linearizada, os resultados apresentados nas tabelas 4.3 e 4.4 não correspondem aos valores reais das incógnitas das equações (4.8), sendo necessário um cálculo adicional a partir dos valores apresentados nestas tabelas para se obter os parâmetros da Taylor expandida modificada. A partir dos dados fornecidos pelo programa, o valor da constante para os aços ABNT 1038 e 1045 serão calculados através dos valores de ( $b_0$ ), o expoente da velocidade de corte por ( $b_2$ ), o expoente do tempo de corte por ( $b_3$ ), o expoente do avanço por ( $b_4$ ) e o expoente da profundidade de corte por ( $b_5$ ).

Os coeficientes de correlação  $R^2$  dado pelo programa foi de aproximadamente 0,91 para o aço ABNT 1038 e para o aço ABNT 1045 é aproximadamente 0,93. O tamanho da amostra representado por “n” foi igual a 127 para o aço ABNT 1038 e 110 para o aço ABNT 1045, conforme indicado nos anexos I e II e pelas tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3 – Coeficientes de correlação para o aço ABNT 1038

<b>Sample Size, n</b>	<b>127</b>
<b>Num Columns Used</b>	<b>5</b>
<b>Degrees Freedom</b>	<b>122</b>
<b>Dependent Column</b>	<b>1</b>
<b><math>Y_1 = b_0 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5</math></b>	
<b>Coeff, <math>b_0</math></b>	<b>-6.262327</b>
<b>Coeff, <math>b_2</math></b>	<b>0.840826</b>
<b>Coeff, <math>b_3</math></b>	<b>0.402742</b>
<b>Coeff, <math>b_4</math></b>	<b>0.314036</b>
<b>Coeff, <math>b_5</math></b>	<b>0.065334</b>
<b>Total Variation</b>	<b>16.998736</b>
<b>Explained Var</b>	<b>15.533174</b>
<b>Unexplained Var</b>	<b>1.465562</b>
<b>Standard Error</b>	<b>0.109603</b>
<b>Coeff of Det, <math>R^2</math></b>	<b>0.913784</b>
<b>Adjusted <math>R^2</math></b>	<b>0.910957</b>
<b>P-Value</b>	<b>0.0000</b>

Tabela 4.4 – Coeficientes de correlação para o aço 1045.

<b>Sample Size, n</b>	<b>110</b>
<b>Num Columns Used</b>	<b>5</b>
<b>Degrees Freedom</b>	<b>105</b>
<b>Dependent Column</b>	<b>1</b>
<b><math>Y_1 = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5</math></b>	
<b>Coeff, <math>b_0</math></b>	<b>-10.693454</b>
<b>Coeff, <math>b_1</math></b>	<b>1.566644</b>
<b>Coeff, <math>b_2</math></b>	<b>0.420741</b>
<b>Coeff, <math>b_3</math></b>	<b>0.170584</b>
<b>Coeff, <math>b_4</math></b>	<b>0.279586</b>
<b>Total Variation</b>	<b>12.645314</b>
<b>Explained Var</b>	<b>11.751897</b>
<b>Unexplained Var</b>	<b>0.893417</b>
<b>Standard Error</b>	<b>0.092243</b>
<b>Coeff of Det, <math>R^2</math></b>	<b>0.929348</b>
<b>Adjusted <math>R^2</math></b>	<b>0.926656</b>
<b>P-Value</b>	<b>0.0000</b>

O coeficiente C da equação (4.9) foi obtido a partir do valor de  $b_0 = -6,262327$  da seguinte forma:

$$\ln C = I = b_0, \text{ ou seja}$$

$$e^I = C$$

$$C = e^{(-6,262327)} = 1,9 \cdot 10^{-3}$$

Para a equação (4.10) o valor de C é:

$$C = e^{(-10,693454)} = 2,2 \cdot 10^{-5}$$

As fórmulas de Taylor modificadas são, portanto, apresentadas abaixo, pelas equações (4.9) e (4.10):

a) para o aço 1038

$$Vb = 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot V^{0,84} \cdot T^{0,40} \cdot f^{0,31} \cdot ap^{0,06} \quad (4.9)$$

b) para o aço 1045

$$Vb = 2,2 \cdot 10^{-5} V^{1,56} T^{0,42} \cdot f^{0,17} \cdot ap^{0,27} \quad (4.10)$$

### 4.3 Cálculo dos Parâmetros da Fórmula de Taylor Simples

Para cada condição de corte utilizada nos ensaios de usinagem mostradas na tabela 4.5 e 4.6 foram calculados os parâmetros da Taylor simples ( $VB = b + aT$ ) para os dois aços, tendo-se como dados de entrada para o STATDISK os valores dos tempo (T em minuto) e desgastes medidos das ferramentas de corte (VB em mm) em cada condição de corte para os respectivos aços ABNT 1038 e ABNT 1045 foram utilizados no programa STATDISK para a obtenção dos coeficientes do modelo de regressão linear simples, apresentados nos anexos I e II.

Tabela 4.5 Condições de corte para os ensaios do aço 1038 e as fórmulas simples de Taylor

Condições	V (m/min)	f (mm/volta)	ap ( mm)	Equação $VB = b + aT$
01	100	0,30	3,0	$VB = 0,1344 + 0,0044T$
02	140	0,60	5,0	$VB = 0,0797 + 0,0246T$
03	180	0,40	3,0	$VB = 0,1742 + 0,0142T$
04	220	0,30	5,0	$VB = 0,1827 + 0,0160T$
05	140	0,50	1,5	$VB = 0,1504 + 0,0076T$
06	100	0,60	5,0	$VB = 0,1262 + 0,0068T$
07	140	0,30	5,0	$VB = 0,1233 + 0,0092T$
08	180	0,20	5,0	$VB = 0,1210 + 0,0096T$

Tabela 4.6 Condições de corte para os ensaios do aço 1045 e as fórmulas simples de Taylor.

Condições	V (m/min)	f (mm/volta)	ap ( mm)	Equação $VB = b + aT$
01	240	0,3	2,0	$VB = 0,1281 + 0,0183T$
02	150	0,4	5,0	$VB = 0,1072 + 0,0079T$
03	190	0,6	2,0	$VB = 0,1098 + 0,0134T$
04	240	0,3	2,0	$VB = 0,1487 + 0,0161T$
05	190	0,6	2,0	$VB = 0,1006 + 0,013T$
06	210	0,2	2,0	$VB = 0,1008 + 0,0126T$

A tabela 4.7 foi obtida a partir do STATDISK ao se fazer a correlação simples entre o desgaste da ferramenta e o tempo de corte, para o primeiro experimento do aço 1038 (veja anexo 1, linha 1 até 17). Observe que nesta tabela os valores de  $b_0$  e de  $b_1$  são respectivamente 0,1344 e 0,0044, de forma que, a equação simples de Taylor é dada por  $VB = 0,1344 + 0,0044T$ , conforme também mostrada na tabela 4.5.

A figura 4.2 apresenta a curva de regressão dos valores do desgaste da ferramenta de corte em função do tempo de usinagem, para a primeira condição de corte dos ensaios do aço ABNT 1038. Uma vez que os eixos desta figura estão em escalas logarítmicas, a curva de regressão que representa a equação simples de Taylor é uma reta. O eixo das abscissas representa os tempos de corte e o eixo das ordenadas representa o desgaste da ferramenta. Assim o modelo de regressão utilizado pelo STATDISK mostra que os pontos repousam aleatoriamente dispersos sobre o

modelo desenvolvido pelo programa. De acordo com a literatura algébrica o termo não razoável quando é feito um teste para identificar que os dados descrevem bem o fenômeno físico com um percentual no intervalo de (98% a 99%), para valor inferior a este intervalo o termo é designado por razoável ( Lehmann, 2005; Lima ,1969).

Percebe-se pela figura 4.1 que o modelo desenvolvido utilizado nessa condição descreve muito bem o experimento, confirmado assim pelo o coeficiente de determinação (**Coeff. or Dt.  $r^2$** ), que é aproximadamente 93 % como mostrado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1038, para a condição de corte 1.

<b>Sample Size, n</b>	17
<b>Degrees Freedom</b>	15
<b>Correlation Results:</b>	
<b>Correlation Coeff, r</b>	0.9646
<b>Critical r</b>	±0.4821
<b>Reject the Null Hypothesis</b>	
<b>Sample provides evidence that the populations are correlated</b>	
<b>Regression Results:</b>	
<b><math>Y = b_0 + b_1x</math></b>	
<b>Y intercept, <math>b_0</math></b>	0.1344
<b>Slope, <math>b_1</math></b>	0.0044
<b>Total Variation</b>	0.0358
<b>Explained Var</b>	0.0334
<b>Unexplained Var</b>	0.0025
<b>Standard Error</b>	0.0129
<b>Coeff of Det, <math>r^2</math></b>	0.9305

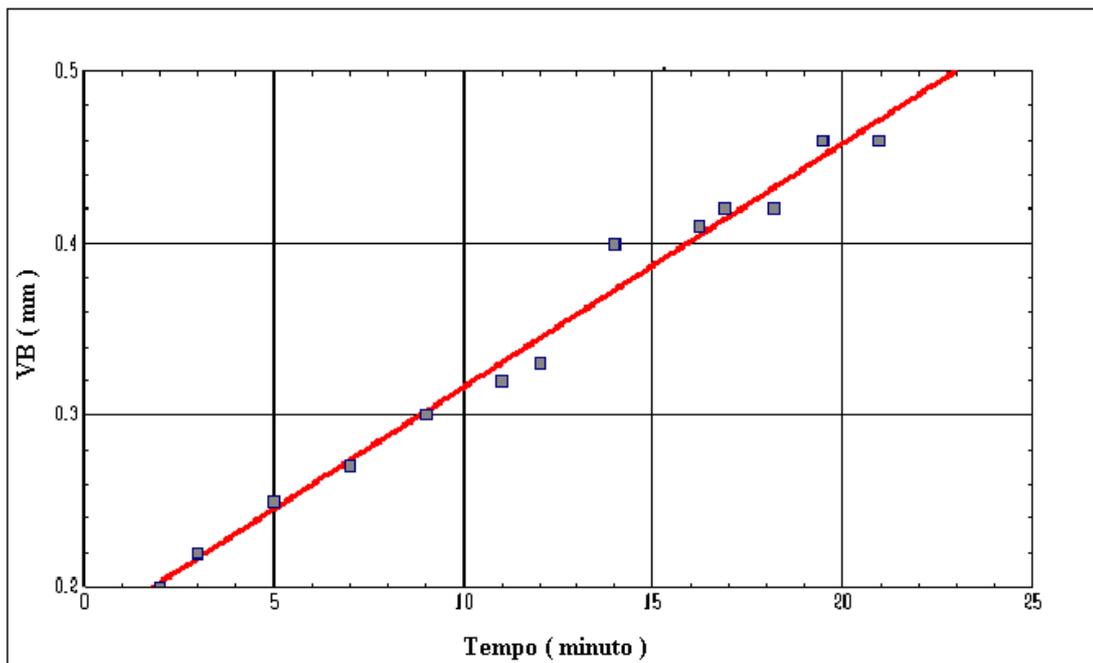


Figura 4.1 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 1 para o aço ABNT 1038.

A figura 4.2 apresenta o teste de hipótese do coeficiente de determinação. De acordo com a tabela 4.7, fornecida pelo STATDISK, a Hipótese Nula deve ser rejeitada. A Hipótese Nula neste caso  $H_0: r = 0$ , ou seja, “há variação em torno da reta de regressão”.

De acordo com os pontos críticos  $r = -0,482$  e  $r = 0,482$ , calculados pelo STATDIK para um grau de significância de 5% ( $\delta = 0,05$ ), a estatística de teste  $r = 0,965$  caiu fora da região de aceitação. Portanto deve rejeitar a Hipótese Nula, ou seja, “não há variação em torno da reta de regressão”, como mostra a figura 4.1. De acordo com a figura 4.2 o erro apresentado é do Tipo I (Montgomery, 2003).

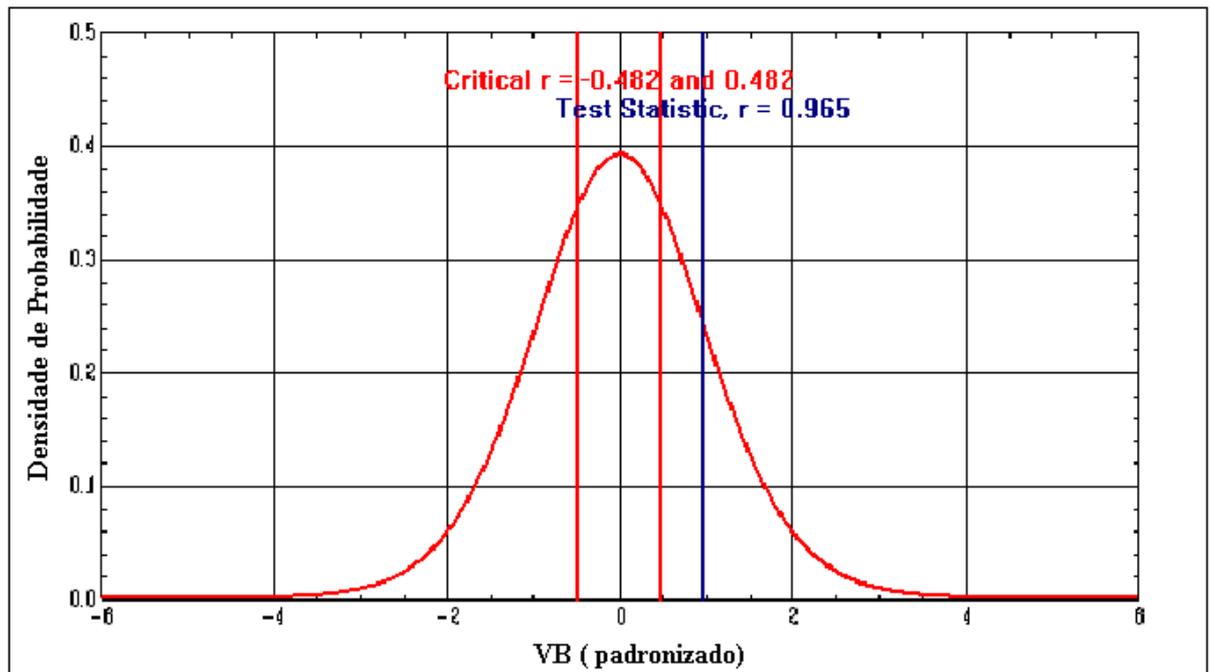


Figura 4.2 – Gráfico do teste de hipótese, condição de corte I para o aço ABNT 1038.

Fazendo-se a padronização dos valores críticos temos:

$$z_1 = \frac{r_1 - r}{S} = \frac{-0,482 - 0}{0,1136} = -4,24$$

$$z_2 = \frac{r_2 - r}{S} = \frac{0,482 - 0}{0,1136} = 4,24$$

Observe que o valor do desvio padrão “S” foi calculado a partir da raiz quadrada da variância da amostra indicada na tabela 4.9, que foi de 0,0129. Portanto o erro cometido ao se rejeitar a Hipótese Nula é de 0%, como mostrado abaixo.

$$\alpha = P(Z < -4,24) + P(Z > 4,24) = 0,00$$

De acordo com as tabelas da distribuição normal para um escore de -3,50, área de rejeição é de 0,0001. O escore obtido no teste de rejeição foi de -4,24 o que corresponde a um valor de área de rejeição de bem menor que 0,0001, podendo-se assim afirmar que a área de rejeição é aproximadamente 0,00. Isso implica que 0% de todas as amostras aleatórias conduziriam a rejeição da hipótese nula, quando ela for verdadeira. Portanto o desgaste da ferramenta de corte calculado através da expressão dada na tabela 4.5 ( $VB = 0,1344 + 0,0044T$ ) representa muito bem o desgaste da ferramenta em relação ao tempo de corte, uma vez que o erro do tipo I é nulo.

Para o segundo experimento do aço ABNT 1038, os desgastes da ferramenta de corte nos respectivos tempos de corte estão apresentados nas linhas 18 a 27 do anexo 1. Fornecidos estes dados ao STATDISK foram obtidos os resultados, apresentados na tabela 4.8 e nas figuras 4.3 e 4.4.

Tabela 4.8–Coeficientes de correlação simples para o aço 1038, para a Condição de Corte 2.

<b>Sample Size, n</b>	<b>10</b>
<b>Degrees Freedom</b>	<b>8</b>
<b>Correlation Results:</b>	
<b>Correlation Coeff, r</b>	<b>0.9706</b>
<b>Critical r</b>	<b>±0.6319</b>
<b>Reject the Null Hypothesis</b>	
<b>Sample provides evidence that the populations are correlated</b>	
<b>Regression Results:</b>	
<b><math>Y = b_0 + b_1x</math></b>	
<b>Y intercept, <math>b_0</math></b>	<b>0.0797</b>
<b>Slope, <math>b_1</math></b>	<b>0.0246</b>
<b>Total Variation</b>	<b>0.0582</b>
<b>Explained Var</b>	<b>0.0548</b>
<b>Unexplained Var</b>	<b>0.0034</b>
<b>Standard Error</b>	<b>0.0205</b>
<b>Coeff of Det, <math>r^2</math></b>	<b>0.9421</b>

A figura 4.3 mostra que os valores repousam muito próximos à equação de regressão, que é uma linha reta e que representa a equação de Taylor simples. Neste segundo experimento houve também uma variação dos pontos em relação ao modelo ajustado, sendo o seu coeficiente de correlação é de aproximadamente 94%, conforme informação da tabela 4.8.

A figura 4.4 apresenta o teste de hipótese do coeficiente de determinação. De acordo com a tabela 4.8, fornecida pelo STATDISK, a Hipótese Nula ( $r = 0$ , há variação dos pontos em torno da reta de regressão) deve ser também rejeitada. De acordo com os pontos críticos  $r = -0,632$  e  $r = 0,632$ , calculados pelo STATDIK para um grau de significância de 5% ( $\delta = 0,05$ ), a estatística de teste  $r = 0,971$  caiu fora da região de aceitação. Portanto devesse rejeitar a Hipótese Nula, ou seja, “não há variação em torno da reta de regressão”, como mostra a figura 4.3. De acordo com a figura 6.4 o tipo de erro apresentado também é do Tipo I.

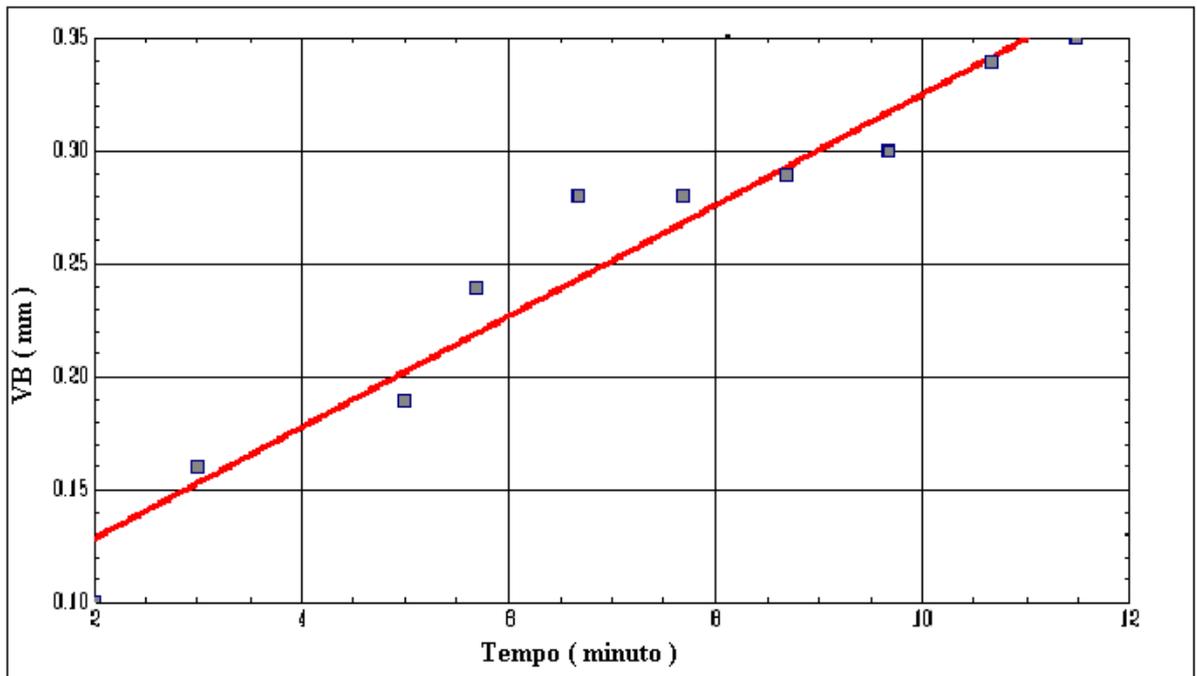


Figura 4.3 -- Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 2 para o aço ABNT 1038.

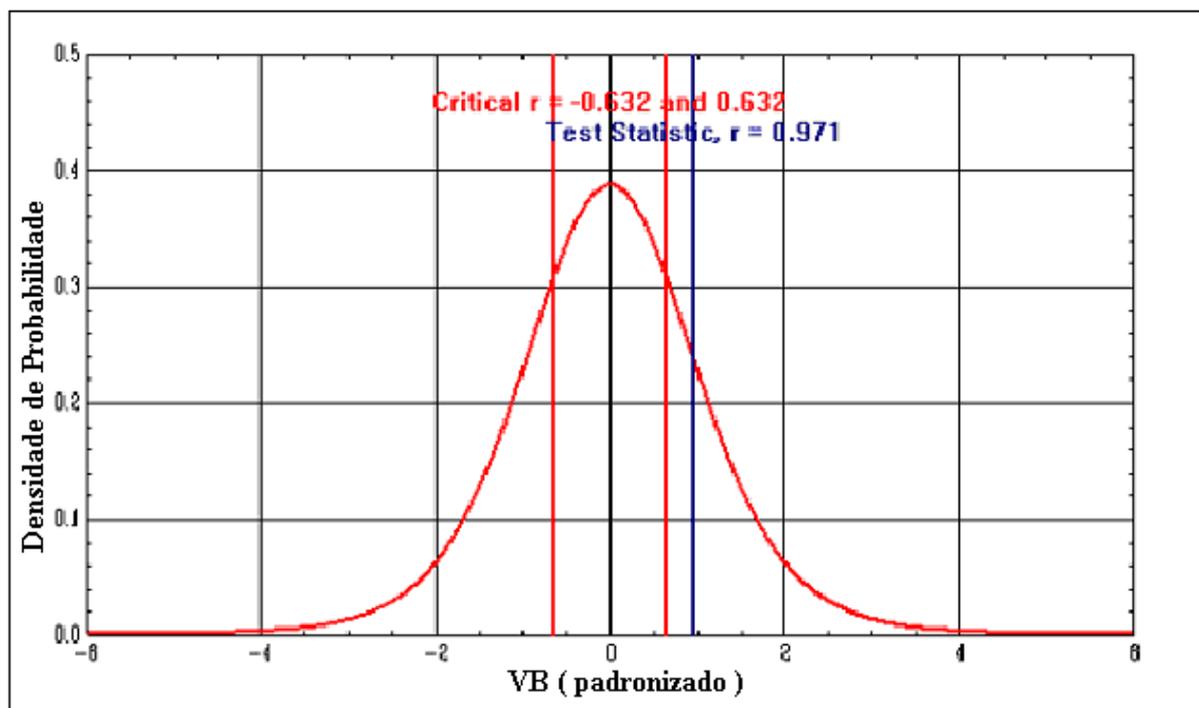


Figura 4.4 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 2 para o aço ABNT 1038

Fazendo-se a padronização dos valores críticos temos:

$$z_1 = \frac{r_1 - r}{S} = \frac{-0,632 - 0}{0,1431} = -4,41$$

$$z_2 = \frac{r_2 - r}{S} = \frac{0,632 - 0}{0,1431} = 4,41$$

Aqui também o valor do desvio padrão “S” foi calculado a partir da raiz quadrada da variância da amostra indicada na tabela 4.8, que foi de 0,0205. Portanto o erro cometido ao se rejeitar a Hipótese Nula é, neste caso de 0%, como mostrado abaixo.

$$\alpha = P(Z < -4,41) + P(Z > 4,41) = 0,00$$

Isto significa que o desgaste da ferramenta de corte em função do tempo de corte pode ser calculado através da expressão dada na tabela 4.5 ( $VB = 0,0797 + 0,0246T$ ) com uma aproximação muito boa.

Para os demais ensaios do aço ABNT 1038 a curva de regressão entre o desgaste da ferramenta e o tempo de corte também apresentaram uma forte correlação como mostram as tabelas 4.9 a 4.12 e as figuras 4.5 a 4.12.

Tabela 4.9–Coeficientes de correlação simples para o aço 1038, para a Condição de Corte 3.

<b>Sample Size, n</b>	<b>13</b>
<b>Degrees Freedom</b>	<b>11</b>
<b>Correlation Results:</b>	
<b>Correlation Coeff, r</b>	<b>0.9920</b>
<b>Critical r</b>	<b>±0.5529</b>
<b>Reject the Null Hypothesis</b>	
<b>Sample provides evidence that the populations are correlated</b>	
<b>Regression Results:</b>	
<b>Y = b<sub>0</sub> + b<sub>1</sub>x</b>	
<b>Y intercept, b<sub>0</sub></b>	<b>0.1742</b>
<b>Slope, b<sub>1</sub></b>	<b>0.0142</b>
<b>Total Variation</b>	<b>0.0991</b>
<b>Explained Var</b>	<b>0.0975</b>
<b>Unexplained Var</b>	<b>0.0016</b>
<b>Standard Error</b>	<b>0.0120</b>
<b>Coeff of Det, r<sup>2</sup></b>	<b>0.9841</b>

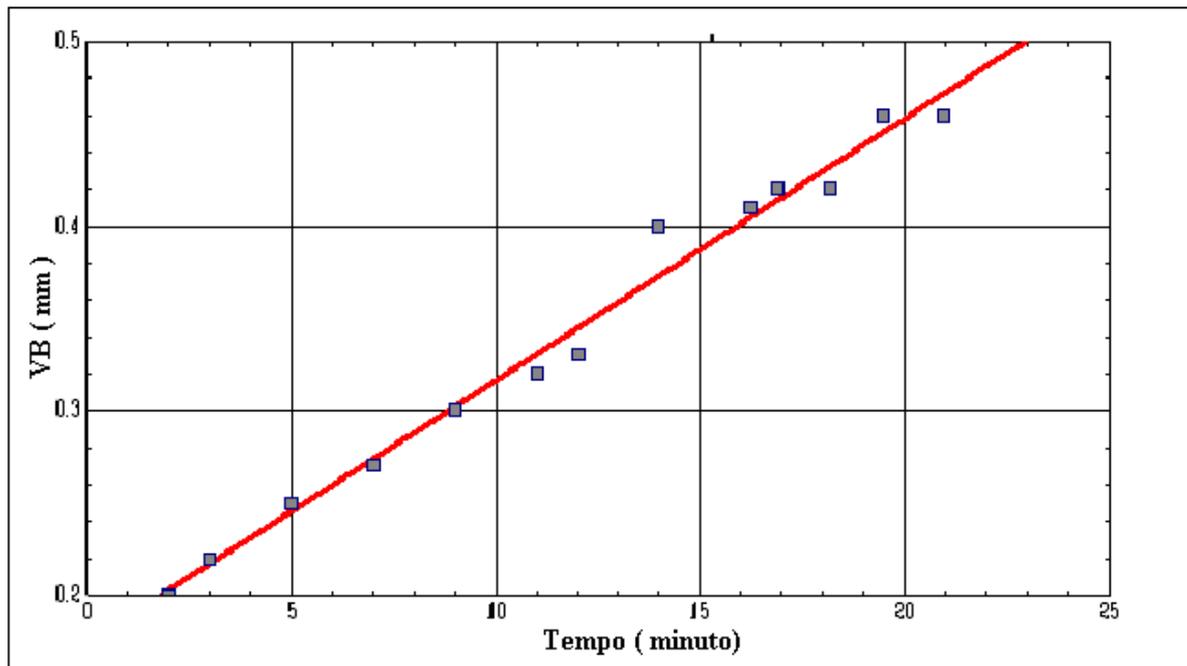


Figura 4.5 -- Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 3 para o aço ABNT 1038.

A figura 4.5 mostra que os valores repousam praticamente em cima da linha reta que representa a equação de Taylor simples, não houve uma variação maior dos pontos em relação a reta, por isso o seu coeficiente de correlação é de aproximadamente 98%, confirmando assim, que os valores reais em torno da equação apresentam uma pequena variação.

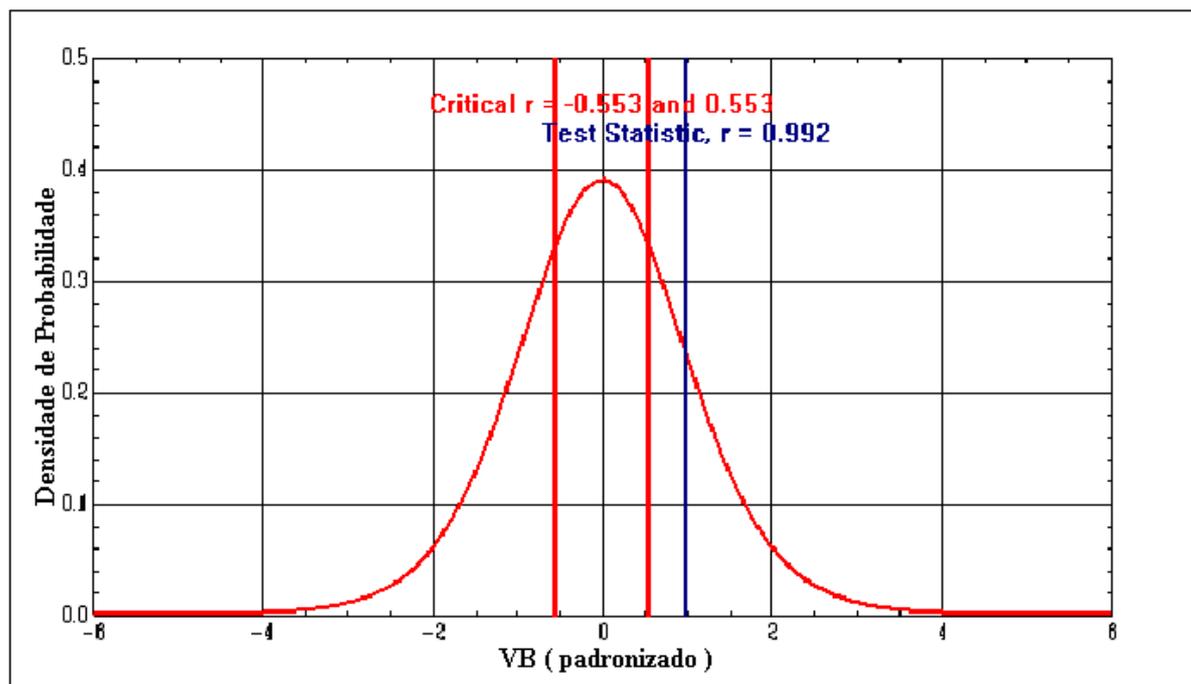


Figura 4.6 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 3 para o aço ABNT 1038.

A figura 4.6 mostra um gráfico de uma curva normal, para a realização de um teste de hipótese a fim de realizar um julgamento no modelo desenvolvido. De acordo com os valores da Tabela 4.11 e da figura 4.6 os pontos críticos são  $-0,553$  e  $+0,553$ . Portanto a estatística de teste é de  $0,992$  é um valor maior do que  $0,553$ . Para esse tipo de amostra deve-se rejeitar a hipótese nula, ou seja, o valor do coeficiente de correlação tem uma variação.

De acordo com os pontos críticos  $r = -0,553$  e  $r = 0,553$ , calculados pelo STATDIK para um grau de significância de 5% ( $\delta = 0,05$ ), a estatística de teste  $r = 0,992$  caiu fora da região de aceitação. Portanto devesse rejeitar a Hipótese Nula, ou seja, **“não há variação em torno da reta de regressão”**, como mostra a figura 4.6. De acordo com a figura 4.6 o tipo de erro apresentado também é do Tipo I. Fazendo-se a padronização dos valores críticos temos:

$$z_1 = \frac{r_1 - r}{S} = \frac{-0,553 - 0}{0,1095} = -5,05$$

$$z_2 = \frac{r_2 - r}{S} = \frac{0,632 - 0}{0,1095} = 5,05$$

Aqui também o valor do desvio padrão “S” foi calculado a partir da raiz quadrada da variância da amostra indicada na tabela 4.9, que foi de  $0,0120$ . Portanto o erro cometido ao se rejeitar a Hipótese Nula é, neste caso de 0%, como mostrado abaixo.

$$\alpha = P(Z < -5,05) + P(Z > 5,05) = 0,00$$

Portanto com base no valor calculado do erro do tipo I caracteriza que o modelo desenvolvido descrito, mostrado na Tabela 4.5 ( $VB = 0,1742 + 0,0142T$ ) representa bem o fenômeno em questão.

A figura 4.7 mostra que os valores repousam de modo não razoável em relação à linha reta que representa a equação de Taylor simples, não houve uma variação maior dos pontos em relação à reta, por isso, o seu coeficiente de determinação é de aproximadamente 98%, como mostra a tabela 4.10.

A figura 4.8 mostra o gráfico de uma curva normal, para a realização de um teste de hipótese a fim de realizar um julgamento no modelo desenvolvido. De acordo com os pontos críticos  $r = -0,5140$  e  $r = 0,5140$ , calculados pelo STATDIK para um grau de significância de 5% ( $\delta = 0,05$ ), a estatística de teste  $r = 0,9891$  caiu fora da região de aceitação. Portanto devesse rejeitar a Hipótese Nula, ou seja, **“não há variação em torno da reta de regressão”**, como mostra a figura 4.8. De acordo com a figura 4.8 o tipo de erro apresentado também é do Tipo I.

Fazendo-se a padronização dos valores críticos temos:

$$z_1 = \frac{r_1 - r}{S} = \frac{-0,5140 - 0}{0,0949} = -5,41$$

$$z_2 = \frac{r_2 - r}{S} = \frac{0,5140 - 0}{0,0949} = 5,41$$

Tabela 4.10 - Coeficientes de correlação simples para o aço 1038, na condição de corte 4.

<b>Sample Size, n</b>	<b>15</b>
<b>Degrees Freedom</b>	<b>13</b>
<b>Correlation Results:</b>	
<b>Correlation Coeff, r</b>	<b>0.9891</b>
<b>Critical r</b>	<b>±0.5140</b>
<b>Reject the Null Hypothesis</b>	
<b>Sample provides evidence that the populations are correlated</b>	
<b>Regression Results:</b>	
<b>Y = b<sub>0</sub> + b<sub>1</sub>x</b>	
<b>Y intercept, b<sub>0</sub></b>	<b>0.1827</b>
<b>Slope, b<sub>1</sub></b>	<b>0.0160</b>
<b>Total Variation</b>	<b>0.0491</b>
<b>Explained Var</b>	<b>0.0481</b>
<b>Unexplained Var</b>	<b>0.0011</b>
<b>Standard Error</b>	<b>0.0090</b>
<b>Coeff of Det, r<sup>2</sup></b>	<b>0.9784</b>

Aqui também o valor do desvio padrão “S” foi calculado a partir da raiz quadrada da variância da amostra indicada na tabela 4.10, que foi de 0,0090.

$$\alpha = P(Z < -5,41) + P(Z > 5,41) = 0,00$$

Assim o erro cometido ao se rejeitar a Hipótese Nula é, neste caso de 0%, como mostrado abaixo. Portanto com base no valor calculado do erro do tipo I caracteriza que o modelo desenvolvido descrito, mostrado na Tabela 4.5 (VB = 0,1827 + 0,0160T) também descreve bem o desgaste da ferramenta de corte.

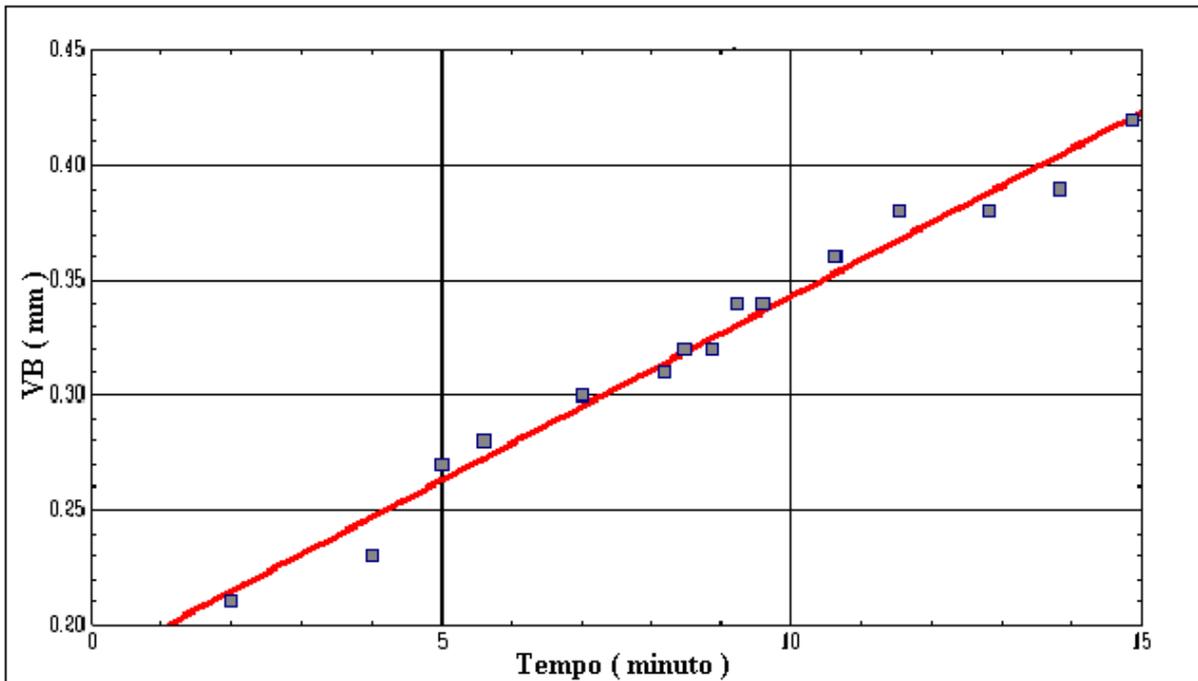


Figura 4.7 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 4 para o aço ABNT 1038.

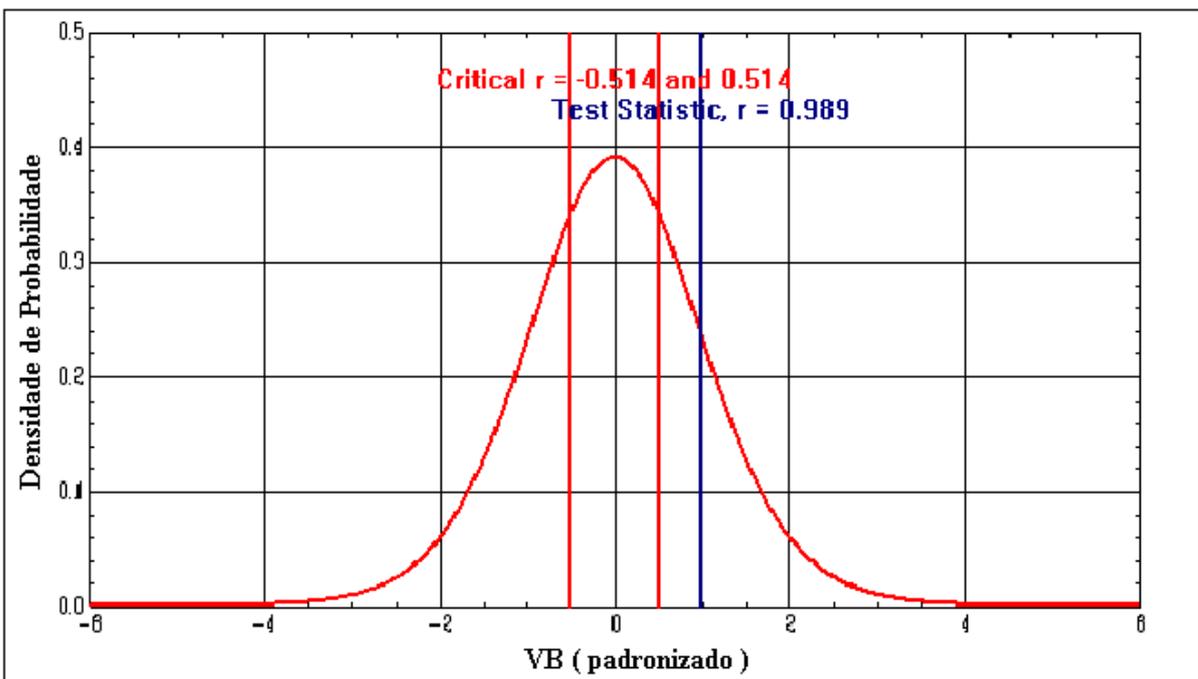


Figura 4.8 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 4 para o aço ABNT 1038.

A figura 4.9 mostra que os valores repousam muito próximos à linha reta que representa a equação de Taylor simples, isto é, não havendo uma variação maior da reta em relação aos pontos, por isso, o seu coeficiente de correlação é de aproximadamente 99%, veja tabela 4-11.

Percebe-se por este modelo que os valores reais (medidos) e os calculados pelo tiveram uma variação mínima.

A figura 4.10 mostra um gráfico de uma curva normal, para a realização de um teste de hipótese a fim de realizar um julgamento no modelo desenvolvido. De acordo com os pontos críticos  $r = -0,404$  e  $r = 0,404$ , calculados pelo STATDIK para um grau de significância de 5% ( $\delta = 0,05$ ), a estatística de teste  $r = 0,993$  caiu fora da região de aceitação. Portanto devesse rejeitar a Hipótese Nula, ou seja, “**não há variação em torno da reta de regressão**”, como mostra a figura 4.10. De acordo com a figura 4.10 o tipo de erro apresentado também é do Tipo I. Fazendo-se a padronização dos valores críticos temos:

$$z_1 = \frac{r_1 - r}{S} = \frac{-0,404 - 0}{0,1054} = -3,83$$

$$z_2 = \frac{r_2 - r}{S} = \frac{0,404 - 0}{0,1054} = 3,83$$

Aqui também o valor do desvio padrão “S” foi calculado a partir da raiz quadrada da variância da amostra indicada na tabela 4.11, que foi de 0,0111.

$$\alpha = P(Z < -3,83) + P(Z > 3,83) = 0,00$$

Assim o erro cometido ao se rejeitar a Hipótese Nula é, neste caso de 0%, como mostrado abaixo. Portanto com base no valor calculado do erro do tipo I caracteriza que o modelo desenvolvido descrito, mostrado na Tabela 4.5 ( $VB = 0,1504 + 0,0076T$ ) também descreve bem o desgaste da ferramenta de corte.

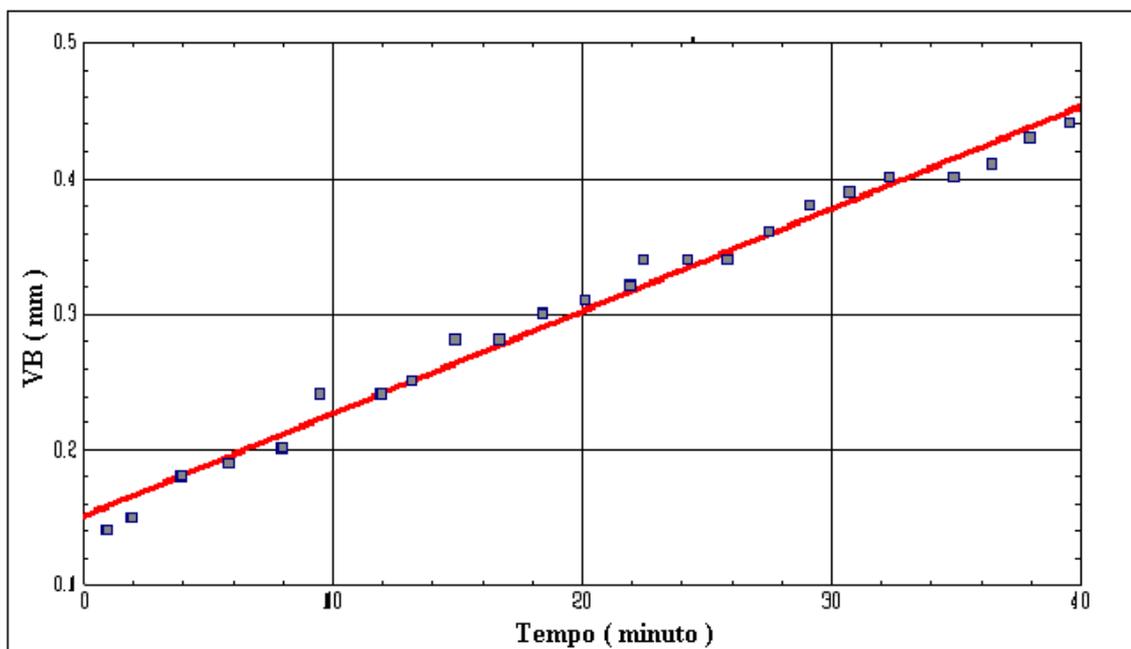


Figura 4.9 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 5 para o aço ABNT 1038.

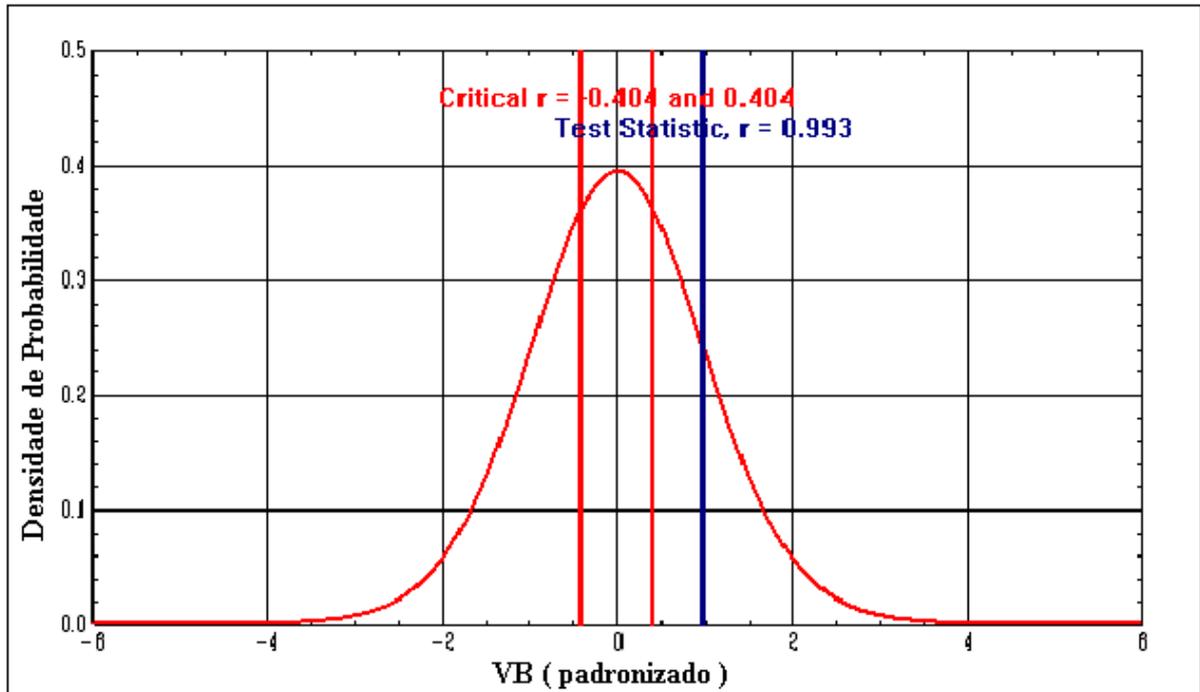


Figura 4.10 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 5 para o aço ABNT 1038

Tabela 4.11 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1038, na condição de corte 5.

<b>Sample Size, n</b>	<b>24</b>
<b>Degrees Freedom</b>	<b>22</b>
<b>Correlation Results:</b>	
<b>Correlation Coeff, r</b>	<b>0.9927</b>
<b>Critical r</b>	<b>±0.4044</b>
<b>Reject the Null Hypothesis</b>	
<b>Sample provides evidence that the populations are correlated</b>	
<b>Regression Results:</b>	
<b><math>Y = b_0 + b_1x</math></b>	
<b>Y intercept, <math>b_0</math></b>	<b>0.1504</b>
<b>Slope, <math>b_1</math></b>	<b>0.0076</b>
<b>Total Variation</b>	<b>0.1866</b>
<b>Explained Var</b>	<b>0.1839</b>
<b>Unexplained Var</b>	<b>0.0027</b>
<b>Standard Error</b>	<b>0.0111</b>
<b>Coeff of Det, <math>r^2</math></b>	<b>0.9855</b>

A figura 4.11 mostra que os valores repousam em torno da linha reta que representa a equação de Taylor simples, com desvios muito pequenos, havendo assim pouca variação da reta em relação aos pontos, por isso, o seu coeficiente de correlação é de aproximadamente 95%.

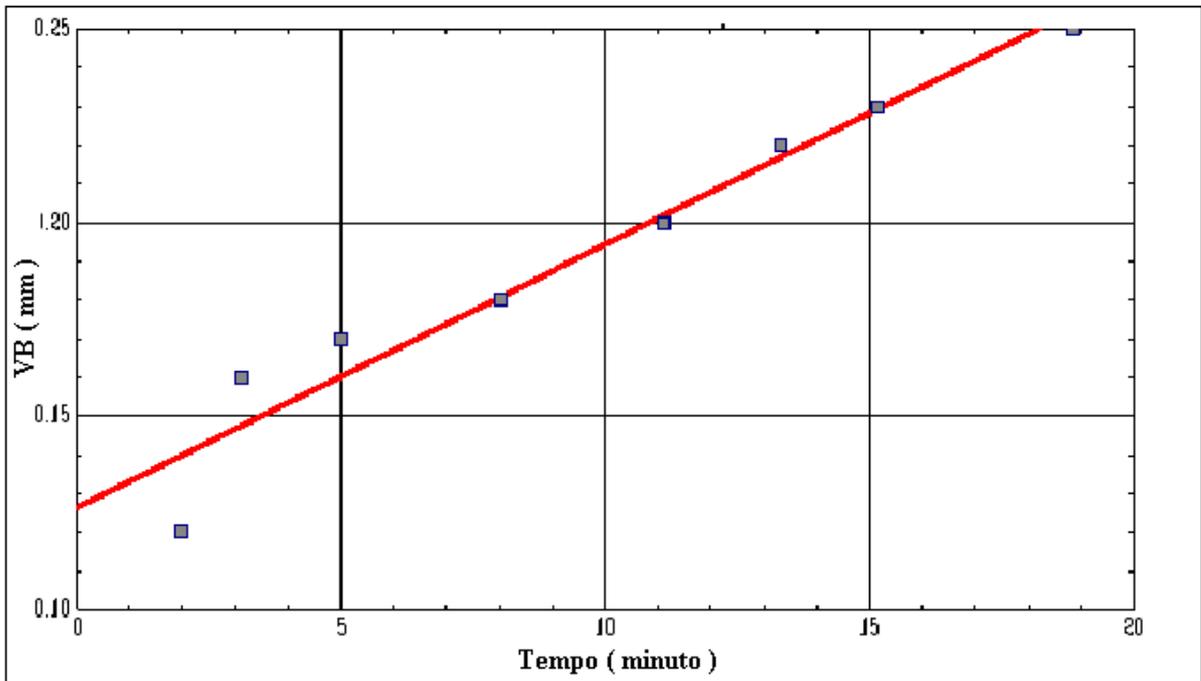


Figura 4.11 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 6, para o aço ABNT 1038.

A figura 4.12 mostra um gráfico de uma curva normal, para a realização de um teste de hipótese a fim de realizar um julgamento no modelo desenvolvido. De acordo com os pontos críticos  $r = -0,707$  e  $r = 0,707$ , calculados pelo STATDIK para um grau de significância de 5% ( $\delta = 0,05$ ), a estatística de teste  $r = 0,972$  caiu fora da região de aceitação. Portanto devesse rejeitar a Hipótese Nula, ou seja, “**não há variação em torno da reta de regressão**”, como mostra a figura 4.11 De acordo com a figura 4.12 o tipo de erro apresentado também é do Tipo I. Fazendo-se a padronização dos valores críticos temos:

$$z_1 = \frac{r_1 - r}{S} = \frac{-0,707 - 0}{0,1030} = -6,86$$

$$z_2 = \frac{r_2 - r}{S} = \frac{0,707 - 0}{0,1030} = 6,86$$

Aqui também o valor do desvio padrão “S” foi calculado a partir da raiz quadrada da variância da amostra indicada na tabela 4.12, que foi de 0,0106.

$$\alpha = P(Z < -6,86) + P(Z > 6,86) = 0,00$$

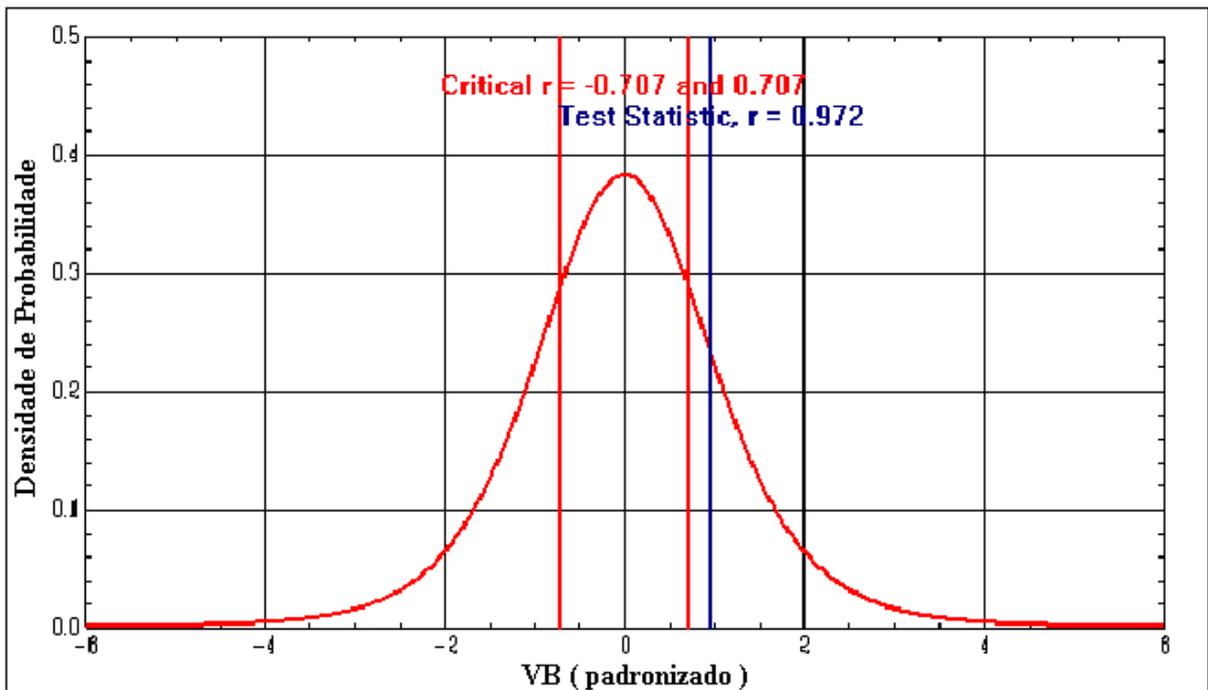


Figura 4.12 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 6 para o aço ABNT 1038.

Assim o erro cometido ao se rejeitar a Hipótese Nula é, neste caso de 0%, como mostrado abaixo. Portanto com base no valor calculado do erro do tipo I caracteriza que o modelo desenvolvido descrito, mostrado na Tabela 4.5 ( $VB = 0,1262 + 0,0068T$ ) também descreve bem o desgaste da ferramenta de corte.

Tabela 4.12 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1038, na a condição de corte 6.

<b>Sample Size, n</b>	<b>8</b>
<b>Degrees Freedom</b>	<b>6</b>
<b>Correlation Results:</b>	
<b>Correlation Coeff, r</b>	<b>0.9724</b>
<b>Critical r</b>	<b>±0.7067</b>
<b>Reject the Null Hypothesis</b>	
<b>Sample provides evidence that the populations are correlated</b>	
<b>Regression Results:</b>	
<b><math>Y = b_0 + b_1x</math></b>	
<b>Y intercept, <math>b_0</math></b>	<b>0.1262</b>
<b>Slope, <math>b_1</math></b>	<b>0.0068</b>
<b>Total Variation</b>	<b>0.0125</b>
<b>Explained Var</b>	<b>0.0118</b>
<b>Unexplained Var</b>	<b>0.0007</b>
<b>Standard Error</b>	<b>0.0106</b>
<b>Coeff of Det, <math>r^2</math></b>	<b>0.9456</b>

A figura 4.13 mostra que os valores repousam muito próximos à linha reta que representa a equação de Taylor simples, havendo pouca variação da reta em relação aos pontos, por isso o seu coeficiente de correlação é de aproximadamente 95%.

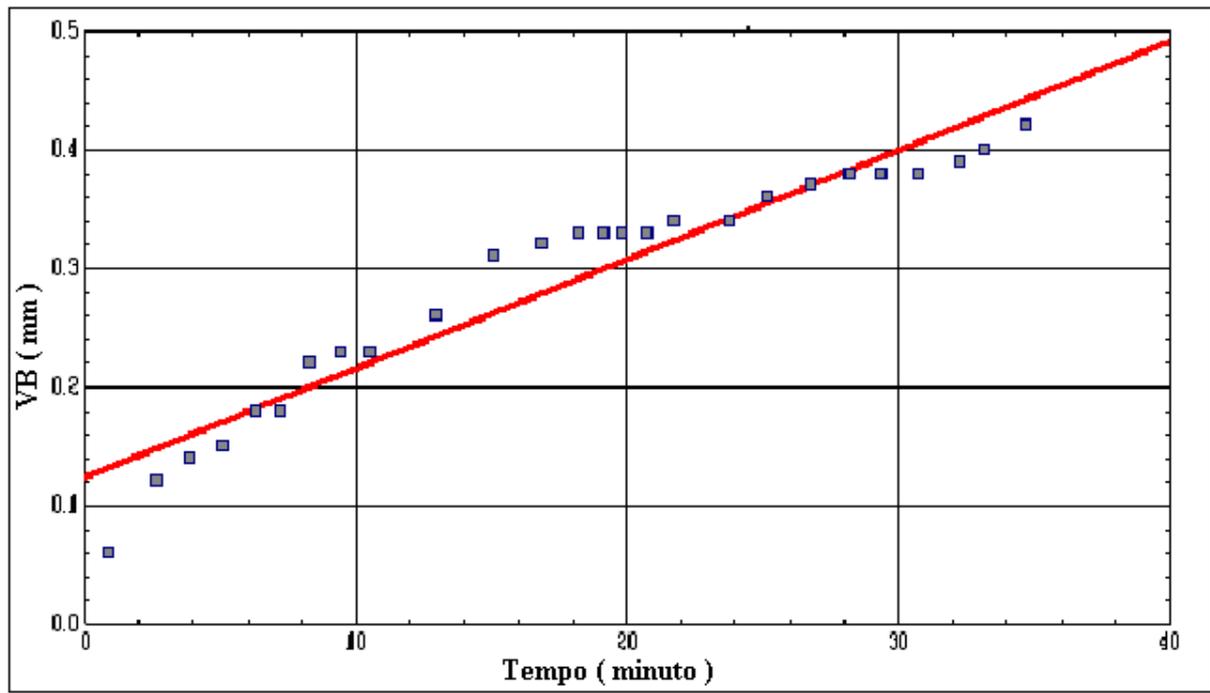


Figura 4.13 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 7, para o aço ABNT 1038.

A figura 4.14 mostra um gráfico de uma curva normal, para a realização de um teste de hipótese a fim de realizar um julgamento no modelo desenvolvido. De acordo com os pontos críticos  $r = -0,3882$  e  $r = 0,3882$ , calculados pelo STATDIK para um grau de significância de 5% ( $\delta = 0,05$ ), a estatística de teste  $r = 0,9616$  caiu fora da região de aceitação. Portanto devesse rejeitar a Hipótese Nula, ou seja, “**não há variação em torno da reta de regressão**”, como mostra a figura 4.13. De acordo com a figura 4.14 o tipo de erro apresentado também é do Tipo I. Fazendo-se a padronização dos valores críticos temos:

$$z_1 = \frac{r_1 - r}{S} = \frac{-0,3882 - 0}{0,1670} = -2,32$$

$$z_2 = \frac{r_2 - r}{S} = \frac{0,3883 - 0}{0,1670} = 2,32$$

Aqui também o valor do desvio padrão “S” foi calculado a partir da raiz quadrada da variância da amostra indicada na tabela 4.13, que foi de 0,0279.

$$\alpha = P(Z < -2,32) + P(Z > 2,32) = 0,01$$

Assim o erro cometido ao se rejeitar a Hipótese Nula é, neste caso de 1%, como mostrado acima. Portanto com base no valor calculado do erro do tipo I caracteriza que o modelo

desenvolvido descrito, mostrado na Tabela 4.5 ( $VB = 0,1233 + 0,0092T$ ), indica que pelo modelo de correlação descrito pela amostra demonstra a probabilidade de estar errado em dizer que o modelo descreva esta condição de corte.

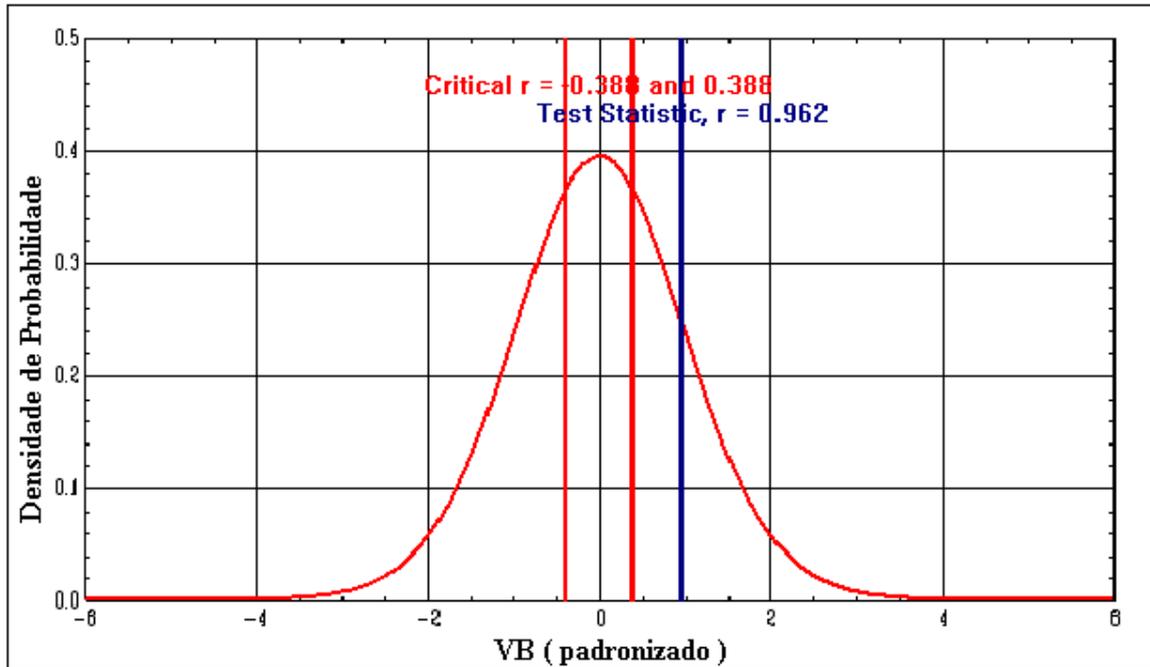


Figura 4.14 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 7, para o aço ABNT 1038.

A tabela 4.13 mostra os resultados da correlação simples para o aço ABNT 1038 na condição de corte número 7.

Tabela 4.13-Coefficientes de correlação simples para o aço 1038, na condição de corte 7.

<b>Sample Size, n</b>	<b>26</b>
<b>Degrees Freedom</b>	<b>24</b>
<b>Correlation Results:</b>	
<b>Correlation Coeff, r</b>	<b>0.9616</b>
<b>Critical r</b>	<b>±0.3882</b>
<b>Reject the Null Hypothesis</b>	
<b>Sample provides evidence that the populations are correlated</b>	
<b>Regression Results:</b>	
<b><math>Y = b_0 + b_1x</math></b>	
<b>Y intercept, <math>b_0</math></b>	<b>0.1233</b>
<b>Slope, <math>b_1</math></b>	<b>0.0092</b>
<b>Total Variation</b>	<b>0.2483</b>
<b>Explained Var</b>	<b>0.2296</b>
<b>Unexplained Var</b>	<b>0.0187</b>
<b>Standard Error</b>	<b>0.0279</b>
<b>Coeff of Det, <math>r^2</math></b>	<b>0.9247</b>

Portanto a estatística de teste é de 0,962, ou seja, é um valor maior do que 0,388, para esse tipo de amostra deve-se rejeitar a hipótese nula, ou seja, o valor do coeficiente de correlação vai ter uma variação.

A figura 4.15 mostra que os valores repousam de modo não razoável em relação a linha reta que representa a equação de Taylor simples, não tendo havido uma variação maior da reta em relação aos pontos, por isso o seu coeficiente de correlação é de aproximadamente 99%.

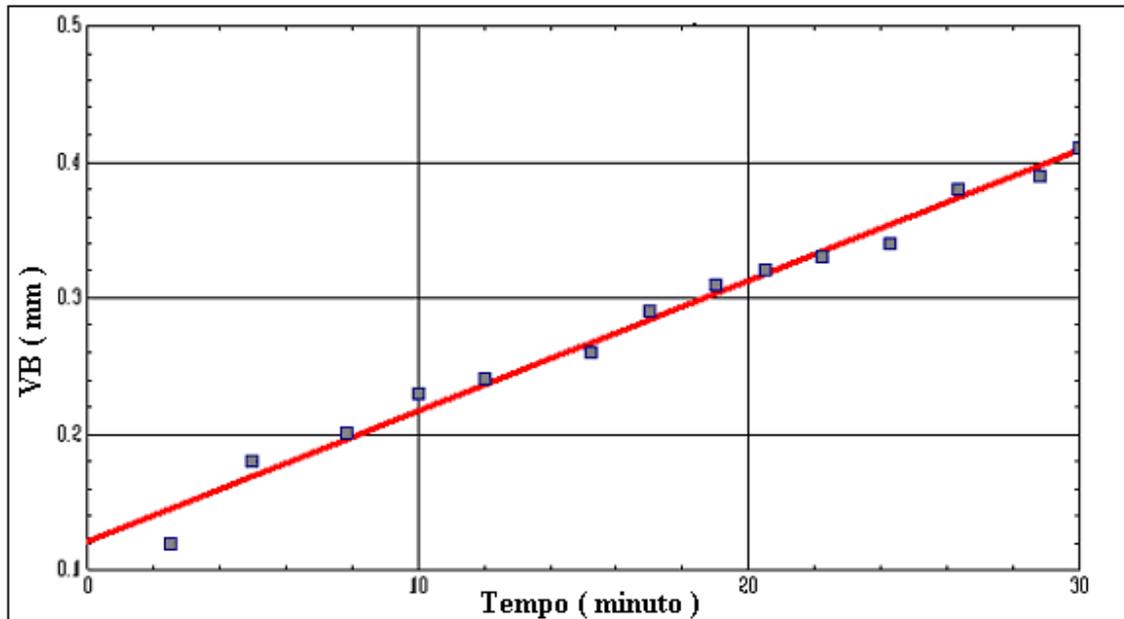


Figura 4.15 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 8, para o aço ABNT 1038.

A figura 4.16 mostra um gráfico de uma curva normal, para a realização de um teste de hipótese a fim de realizar um julgamento no modelo desenvolvido. De acordo com os pontos críticos  $r = -0,5324$  e  $r = 0,5324$ , calculados pelo STATDIK para um grau de significância de 5% ( $\delta = 0,05$ ), a estatística de teste  $r = 0,9926$  caiu fora da região de aceitação. Portanto devesse rejeitar a Hipótese Nula, ou seja, **“não há variação em torno da reta de regressão”**, como mostra a figura 4.15. De acordo com a figura 4.16 o tipo de erro apresentado também é do Tipo I. Fazendo-se a padronização dos valores críticos temos:

$$z_1 = \frac{r_1 - r}{S} = \frac{-0,5324 - 0}{0,1034} = -5,14$$

$$z_2 = \frac{r_2 - r}{S} = \frac{0,5324 - 0}{0,1034} = 5,14$$

Aqui também o valor do desvio padrão “S” foi calculado a partir da raiz quadrada da variância da amostra indicada na tabela 4.14, que foi de 0,0107.

$$\alpha = P(Z < -5,14) + P(Z > 5,14) = 0,00$$

Assim o erro cometido ao se rejeitar a Hipótese Nula é, neste caso de 0%, como mostrado abaixo. Portanto com base no valor calculado do erro do tipo I caracteriza que o modelo desenvolvido descrito, mostrado na Tabela 4.5 ( $VB = 0,1210 + 0,0096T$ ) também descreve bem o desgaste da ferramenta de corte.

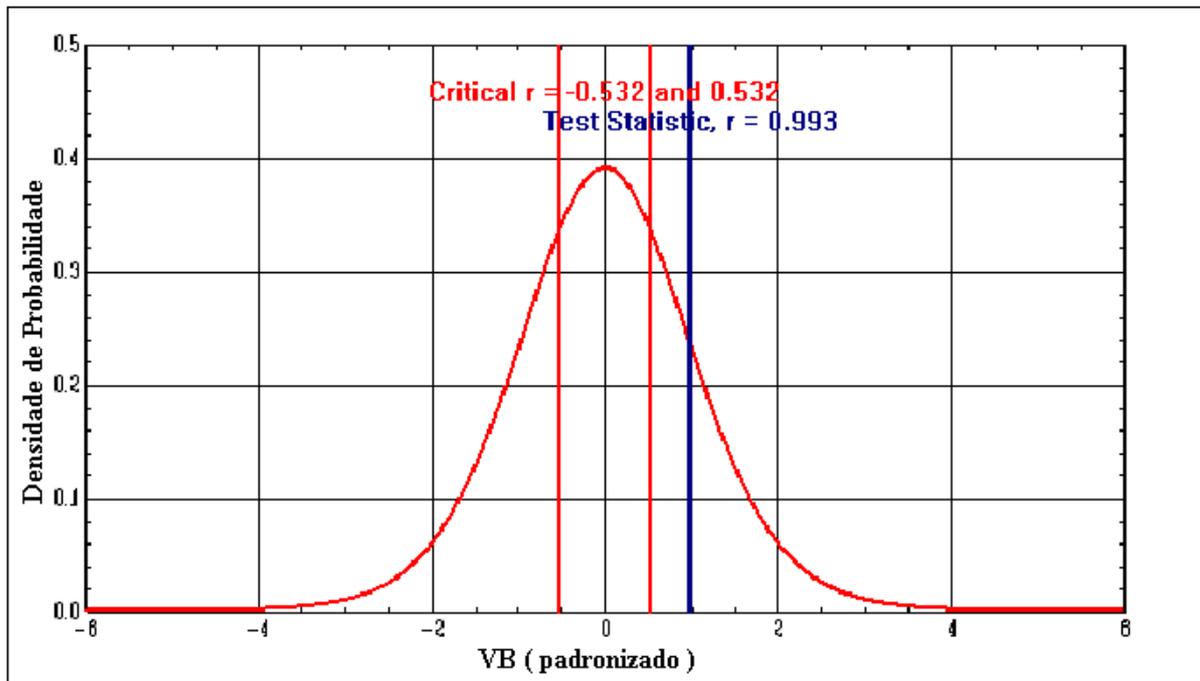


Figura 4.16 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 8, para o aço ABNT 1038.

Tabela 4.14 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1038, na condição de corte 8.

<b>Sample Size, n</b>	<b>14</b>
<b>Degrees Freedom</b>	<b>12</b>
<b>Correlation Results:</b>	
<b>Correlation Coeff, r</b>	<b>0.9926</b>
<b>Critical r</b>	<b>±0.5324</b>
<b>Reject the Null Hypothesis</b>	
<b>Sample provides evidence that the populations are correlated</b>	
<b>Regression Results:</b>	
<b><math>Y = b_0 + b_1x</math></b>	
<b>Y intercept, <math>b_0</math></b>	<b>0.1210</b>
<b>Slope, <math>b_1</math></b>	<b>0.0096</b>
<b>Total Variation</b>	<b>0.0937</b>
<b>Explained Var</b>	<b>0.0924</b>
<b>Unexplained Var</b>	<b>0.0014</b>
<b>Standard Error</b>	<b>0.0107</b>
<b>Coeff of Det, <math>r^2</math></b>	<b>0.9853</b>

Portanto a estatística de teste é de 0,993, ou seja, é um valor maior do que 0,532, para esse tipo de amostra deve-se rejeitar a hipótese nula, ou seja, o valor do coeficiente de correlação vai ter uma variação.

A tabela 4.6 (página 15) mostrou as equações simples de Taylor para o aço ABNT 1045. Em seguida serão mostrados os resultados numéricos da regressão linear, a reta de regressão e o resultado do teste de hipótese, calculados através do programa STATDISK, para cada uma das condições de ensaio.

A tabela 4.15 mostra os resultados da regressão linear entre a velocidade de corte e o tempo de corte da ferramenta. A figura 4.17 apresenta a curva de regressão dos valores do desgaste da ferramenta de corte em função do tempo de corte, para a primeira condição de corte dos ensaios do aço ABNT 1045. Os eixos desta figura estão em escalas logarítmicas, assim como foram calculados para o aço ABNT 1038, a curva de regressão que representa a equação simples de Taylor é uma reta. O eixo das abscissas representa os tempos de corte e o eixo das ordenadas representa o desgaste da ferramenta. Assim o modelo de regressão utilizado pelo STATDISK mostra que os pontos repousam aleatoriamente dispersos sobre o modelo desenvolvido pelo programa. Com base na figura 4.17 o modelo desenvolvido para esta condição de corte, descreve o modelo de modo não razoável, ou seja, modela muito bem o acontecimento; confirmado assim pelo o coeficiente de determinação (**Coeff. or Dt.  $r^2$** ), que é aproximadamente 99 % como mostrado na tabela 4.15 a seguir:

Tabela 4.15 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1045, na a condição de corte 1.

<b>Sample Size, n</b>	<b>16</b>
<b>Degrees Freedom</b>	<b>14</b>
<b>Correlation Results:</b>	
<b>Correlation Coeff, r</b>	<b>0.9936</b>
<b>Critical r</b>	<b>±0.4973</b>
<b>Reject the Null Hypothesis</b>	
<b>Sample provides evidence that the populations are correlated</b>	
<b>Regression Results:</b>	
<b><math>Y = b_0 + b_1x</math></b>	
<b>Y intercept, <math>b_0</math></b>	<b>0.1281</b>
<b>Slope, <math>b_1</math></b>	<b>0.0183</b>
<b>Total Variation</b>	<b>0.1098</b>
<b>Explained Var</b>	<b>0.1084</b>
<b>Unexplained Var</b>	<b>0.0014</b>
<b>Standard Error</b>	<b>0.0100</b>
<b>Coeff of Det, <math>r^2</math></b>	<b>0.9873</b>

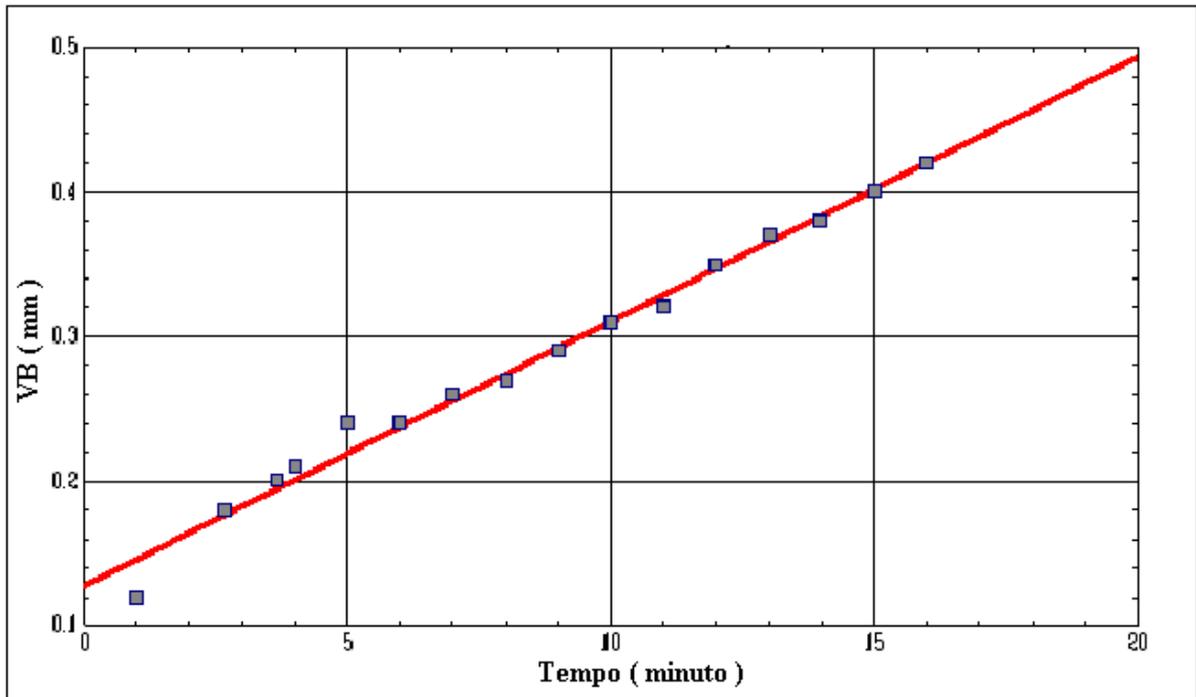


Figura 4.17 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 1 para o aço ABNT 1045.

A figura 4.18 mostra um gráfico de uma curva normal, para a realização de um teste de hipótese a fim de realizar um julgamento do modelo desenvolvido. De acordo com os pontos críticos  $r = -0,4973$  e  $r = 0,4973$ , calculados pelo STATDIK para um grau de significância de 5% ( $\delta = 0,05$ ), a estatística de teste  $r = 0,9936$  caiu fora da região de aceitação.

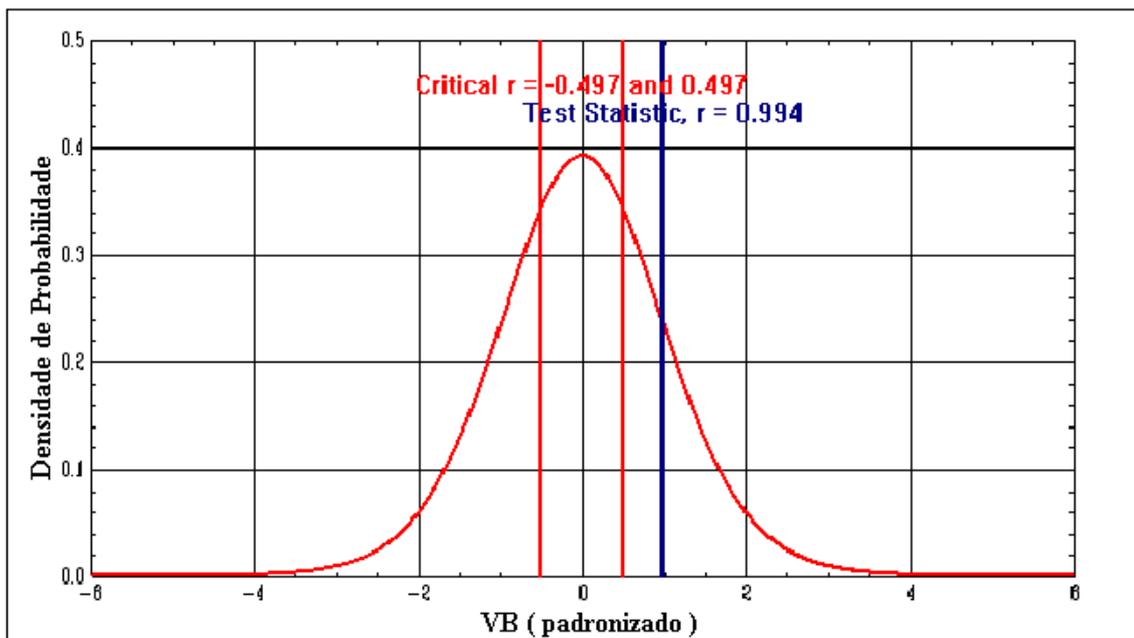


Figura 4.18 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 1, para o aço ABNT 1045.

Portanto deve-se rejeitar a Hipótese Nula, ou seja, “**não há variação em torno da reta de regressão**”, como mostra a figura 4.18. O erro apresentado também é do Tipo I. Fazendo-se a padronização dos valores críticos temos:

$$z_1 = \frac{r_1 - r}{S} = \frac{-0,4973 - 0}{0,1} = -4,97$$

$$z_2 = \frac{r_2 - r}{S} = \frac{0,4973 - 0}{0,1} = 4,97$$

Aqui também o valor do desvio padrão “S” foi calculado a partir da raiz quadrada da variância da amostra indicada na tabela 4.15, que foi de 0,0100.

$$\alpha = P(Z < -4,97) + P(Z > 4,97) = 0,00$$

Assim o erro cometido ao se rejeitar a Hipótese Nula é, neste caso de 0%, como mostrado acima. Portanto, com base no valor calculado do erro do tipo I, que o modelo desenvolvido mostra na Tabela 4.7 (VB= 0,1281+0,0183T), pode-se afirmar que ele descreve bem o fenômeno. Para os demais ensaios serão abordados os resultados dos testes e uma pequena análise dos resultados obtidos.

A tabela 4.16, as figuras 4.19 e 4.20 mostram resultados semelhantes para a segunda condição de ensaio do aço ABNT 1045.

Tabela 4.16 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1045, na a condição de corte 2.

<b>Sample Size, n</b>	<b>29</b>
<b>Degrees Freedom</b>	<b>27</b>
<b>Correlation Results:</b>	
<b>Correlation Coeff, r</b>	<b>0.9931</b>
<b>Critical r</b>	<b>±0.3673</b>
<b>Reject the Null Hypothesis</b>	
<b>Sample provides evidence that the populations are correlated</b>	
<b>Regression Results:</b>	
<b>Y = b<sub>0</sub> + b<sub>1</sub>x</b>	
<b>Y intercept, b<sub>0</sub></b>	<b>0.1072</b>
<b>Slope, b<sub>1</sub></b>	<b>0.0079</b>
<b>Total Variation</b>	<b>0.2141</b>
<b>Explained Var</b>	<b>0.2111</b>
<b>Unexplained Var</b>	<b>0.0029</b>
<b>Standard Error</b>	<b>0.0104</b>
<b>Coeff of Det, r<sup>2</sup></b>	<b>0.9863</b>

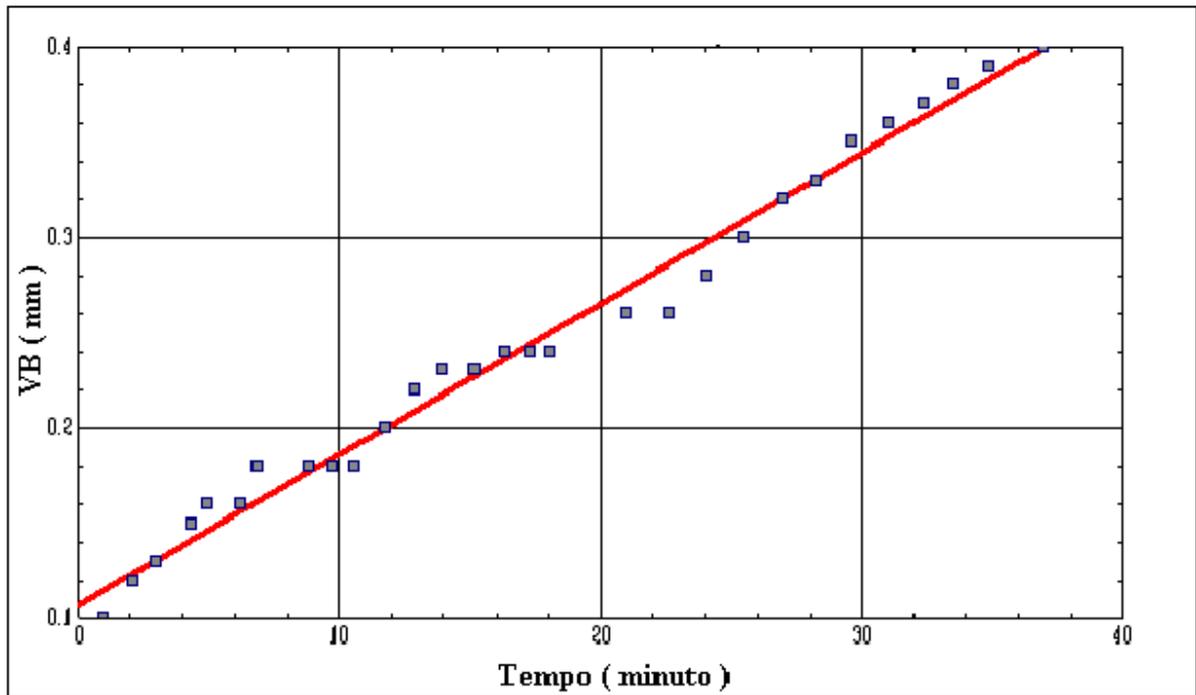


Figura 4.19 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 2 para o aço ABNT 1045.

Os escores da normal padronizada são:

$$z_1 = \frac{r_1 - r}{S} = \frac{-0,3673 - 0}{0,1021} = -3,59$$

$$z_2 = \frac{r_2 - r}{S} = \frac{0,3673 - 0}{0,1021} = 3,59$$

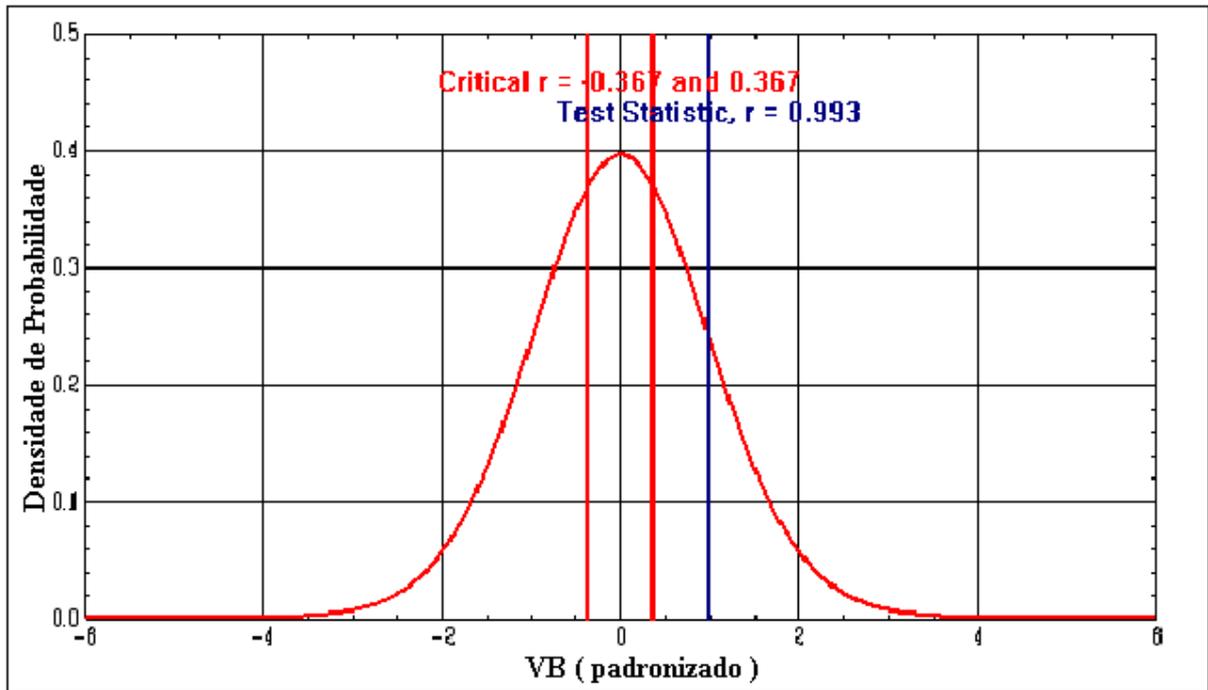


Figura 4.20 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 2 para o aço ABNT 1045.

A tabela 4.17, as figuras 4.21 e 4.22 mostram resultados semelhantes para a terceira condição de ensaio do aço ABNT 1045.

Tabela 4.17 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1045, na a condição de corte 3.

<b>Sample Size, n</b>	<b>23</b>
<b>Degrees Freedom</b>	<b>21</b>
<b>Correlation Results:</b>	
<b>Correlation Coeff, r</b>	<b>0.9645</b>
<b>Critical r</b>	<b>±0.4132</b>
<b>Reject the Null Hypothesis</b>	
<b>Sample provides evidence that the populations are correlated</b>	
<b>Regression Results:</b>	
<b><math>Y = b_0 + b_1x</math></b>	
<b>Y intercept, <math>b_0</math></b>	<b>0.1098</b>
<b>Slope, <math>b_1</math></b>	<b>0.0134</b>
<b>Total Variation</b>	<b>0.1229</b>
<b>Explained Var</b>	<b>0.1143</b>
<b>Unexplained Var</b>	<b>0.0086</b>
<b>Standard Error</b>	<b>0.0202</b>
<b>Coeff of Det, <math>r^2</math></b>	<b>0.9303</b>

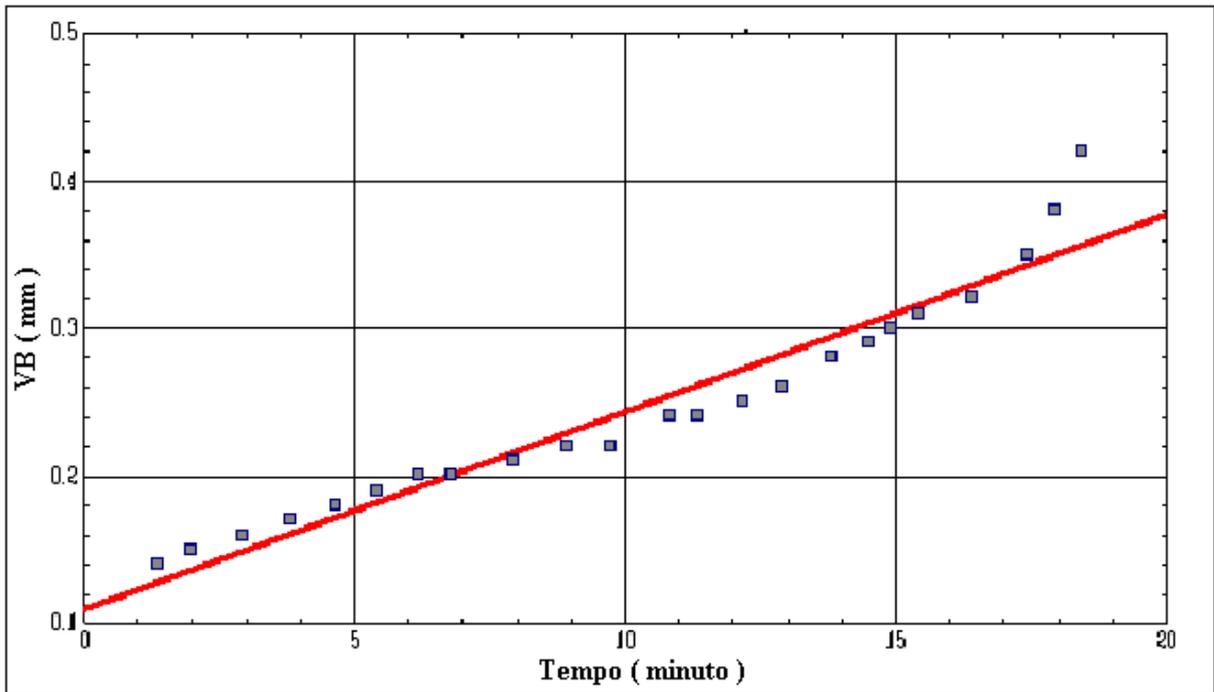


Figura 4.21 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 3 para o aço ABNT 1045.

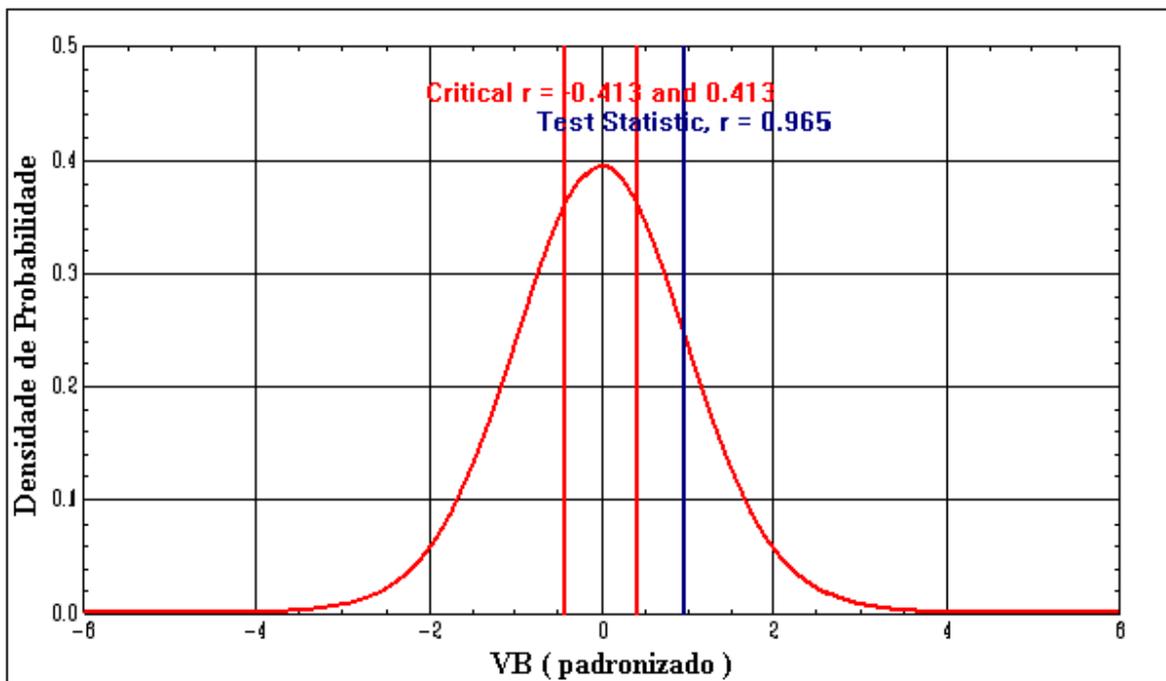


Figura 4.22 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 3 para o aço ABNT 1045.

Os valores padronizados estão descritos logo abaixo:

$$z_1 = \frac{r_1 - r}{S} = \frac{-0,4132 - 0}{0,1421} = -2,91$$

$$z_2 = \frac{r_2 - r}{S} = \frac{0,4132 - 0}{0,1421} = 2,91$$

A tabela 4.18, as figuras 4.23 e 4.24 mostram resultados semelhantes para a quarta condição de ensaio do aço ABNT 1045.

Tabela 4.18 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1045, na Condição de Corte 4.

<b>Sample Size, n</b>	<b>10</b>
<b>Degrees Freedom</b>	<b>8</b>
<b>Correlation Results:</b>	
<b>Correlation Coeff, r</b>	<b>0.9837</b>
<b>Critical r</b>	<b>±0.6319</b>
<b>Reject the Null Hypothesis</b>	
<b>Sample provides evidence that the populations are correlated</b>	
<b>Regression Results:</b>	
<b>Y = b<sub>0</sub> + b<sub>1</sub>x</b>	
<b>Y intercept, b<sub>0</sub></b>	<b>0.1487</b>
<b>Slope, b<sub>1</sub></b>	<b>0.0161</b>
<b>Total Variation</b>	<b>0.0620</b>
<b>Explained Var</b>	<b>0.0600</b>
<b>Unexplained Var</b>	<b>0.0020</b>
<b>Standard Error</b>	<b>0.0158</b>
<b>Coeff of Det, r<sup>2</sup></b>	<b>0.9677</b>

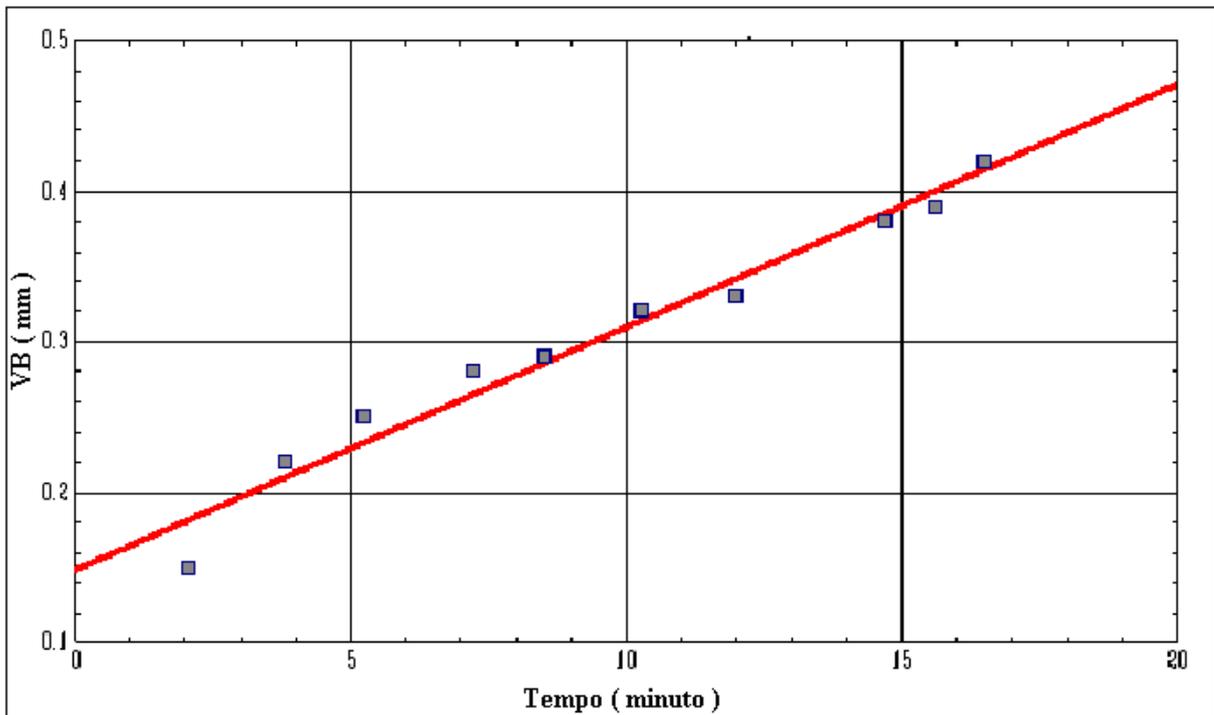


Figura 4.23 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 4 para o aço ABNT 1045.

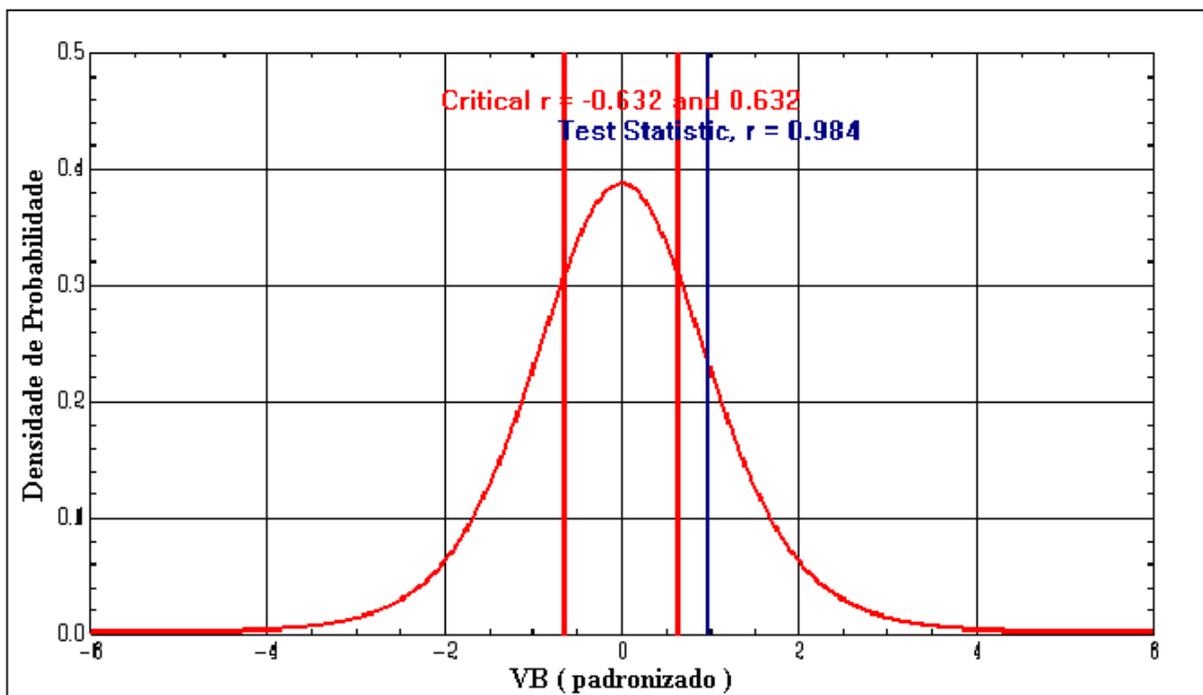


Figura 4.24 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 4 para o aço ABNT 1045.

Os escores para a normal padronizada são:

$$z_1 = \frac{r_1 - r}{S} = \frac{-0,6319 - 0}{0,1257} = -5,02$$

$$z_2 = \frac{r_2 - r}{S} = \frac{0,6319 - 0}{0,1257} = 5,02$$

A tabela 4.19, as figuras 4.25 e 4.26 mostram resultados semelhantes para a quinta condição de ensaio do aço ABNT 1045.

Tabela 4.19 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1045, na Condição de Corte 5

<b>Sample Size, n</b>	<b>20</b>
<b>Degrees Freedom</b>	<b>18</b>
<b>Correlation Results:</b>	
<b>Correlation Coeff, r</b>	<b>0.9537</b>
<b>Critical r</b>	<b>±0.4438</b>
<b>Reject the Null Hypothesis</b>	
<b>Sample provides evidence that the populations are correlated</b>	
<b>Regression Results:</b>	
<b>Y = b<sub>0</sub> + b<sub>1</sub>x</b>	
<b>Y intercept, b<sub>0</sub></b>	<b>0.1006</b>
<b>Slope, b<sub>1</sub></b>	<b>0.0130</b>
<b>Total Variation</b>	<b>0.1047</b>
<b>Explained Var</b>	<b>0.0952</b>
<b>Unexplained Var</b>	<b>0.0095</b>
<b>Standard Error</b>	<b>0.0229</b>
<b>Coeff of Det, r<sup>2</sup></b>	<b>0.9096</b>

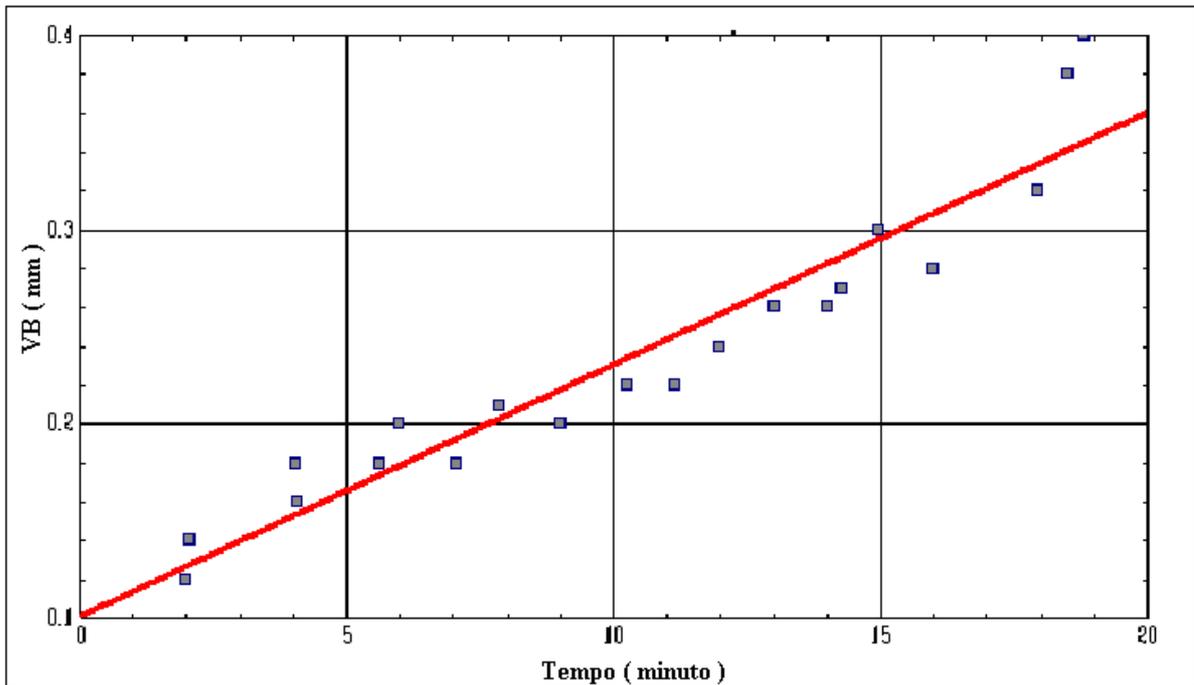


Figura 4.25 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 5 para o aço ABNT 1045.

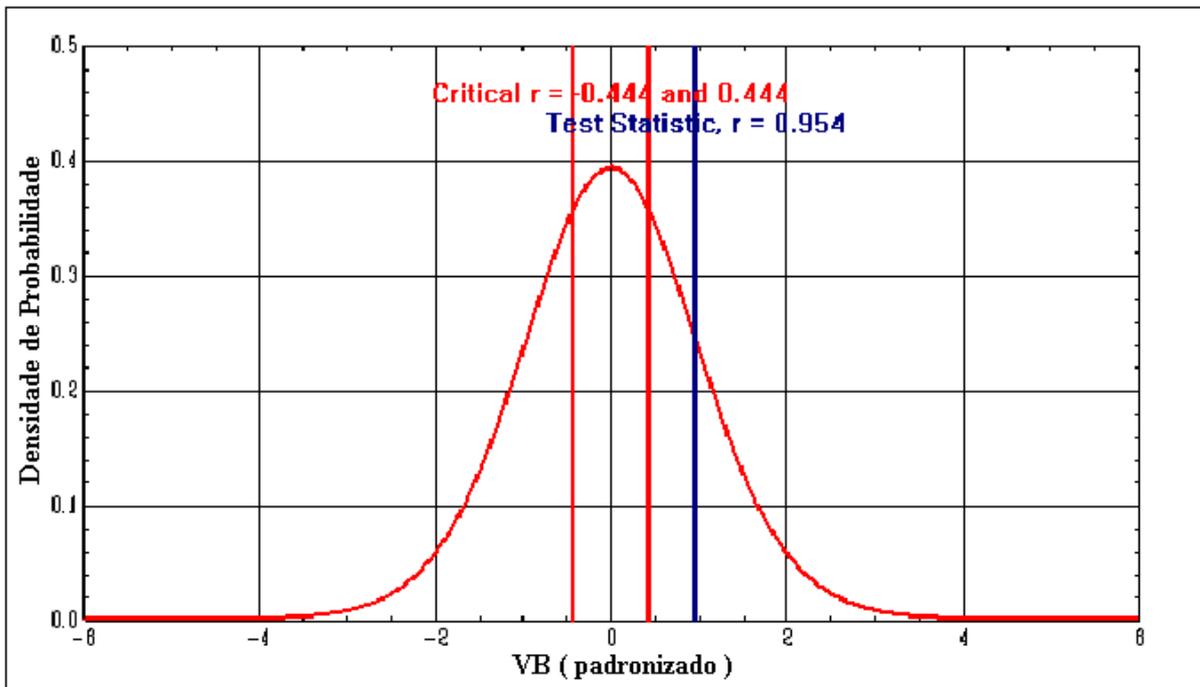


Figura 4.26 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 5 para o aço ABNT 1045.

Os valores padronizados estão descritos logo abaixo:

$$z_1 = \frac{r_1 - r}{S} = \frac{-0,4438 - 0}{0,1513} = -2,93$$

$$z_2 = \frac{r_2 - r}{S} = \frac{0,4438 - 0}{0,1513} = 2,93$$

A tabela 4.20, as figuras 4.27 e 4.28 mostram resultados semelhantes para a sexta condição de ensaio do aço ABNT 1045.

Tabela 4.19 – Coeficientes de correlação simples para o aço 1045, na Condição de Corte 6.

<b>Sample Size, n</b>	<b>12</b>
<b>Degrees Freedom</b>	<b>10</b>
<b>Correlation Results:</b>	
<b>Correlation Coeff, r</b>	<b>0.9912</b>
<b>Critical r</b>	<b>±0.5760</b>
<b>Reject the Null Hypothesis</b>	
<b>Sample provides evidence that the populations are correlated</b>	
<b>Regression Results:</b>	
<b><math>Y = b_0 + b_1x</math></b>	
<b>Y intercept, <math>b_0</math></b>	<b>0.1008</b>
<b>Slope, <math>b_1</math></b>	<b>0.0126</b>
<b>Total Variation</b>	<b>0.0789</b>
<b>Explained Var</b>	<b>0.0775</b>
<b>Unexplained Var</b>	<b>0.0014</b>
<b>Standard Error</b>	<b>0.0118</b>
<b>Coeff of Det, <math>r^2</math></b>	<b>0.9824</b>

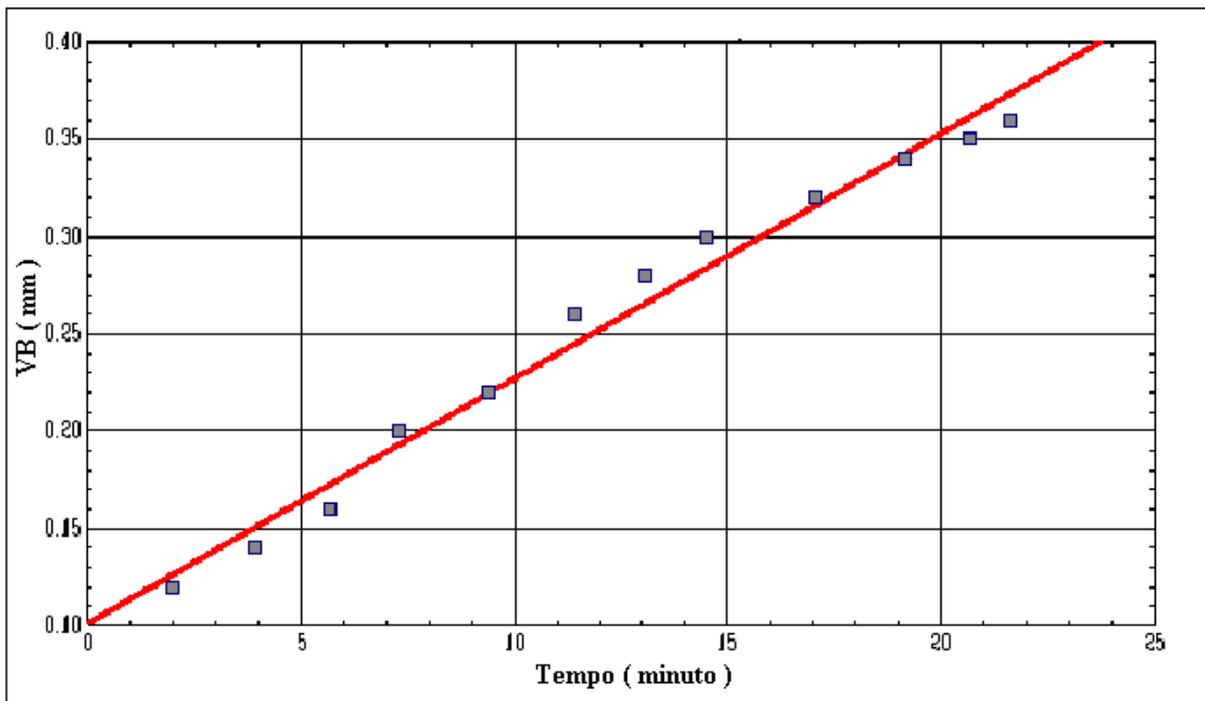


Figura 4.27 - Gráfico da equação de Taylor simples na condição de corte 6 para o aço ABNT 1045.

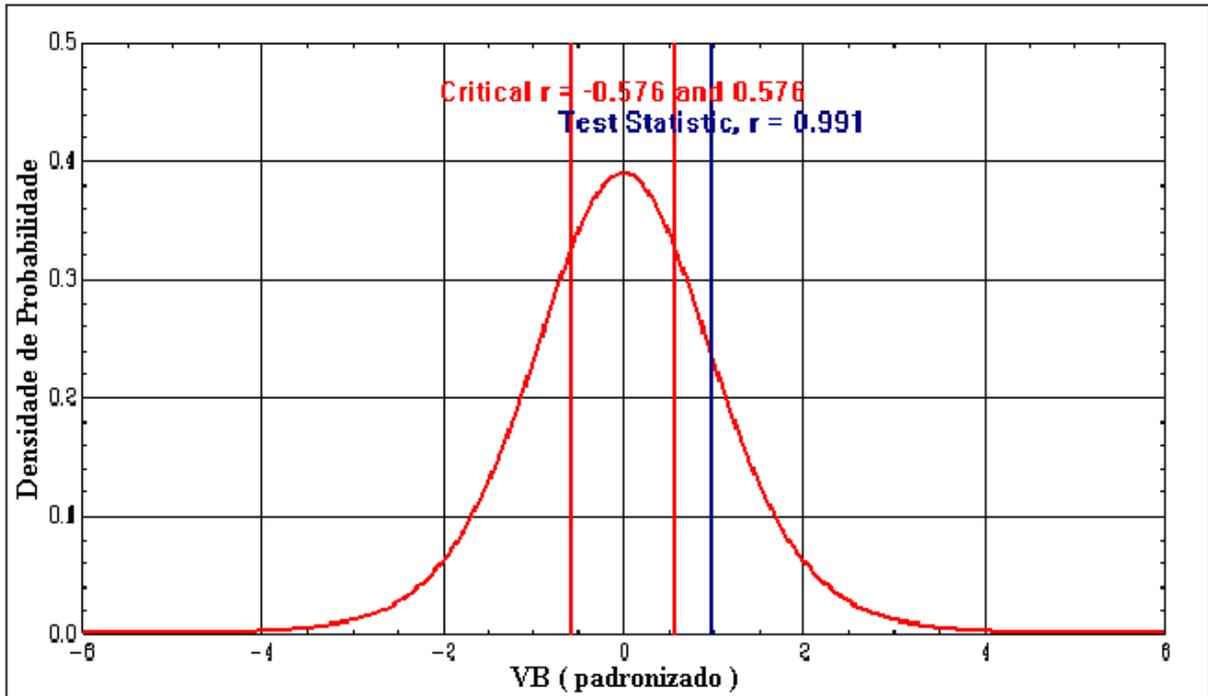


Figura 4.28 – Gráfico para o teste de hipótese, condição de corte 6 para o aço ABNT 1045.

Os valores padronizados estão descritos logo abaixo:

$$z_1 = \frac{r_1 - r}{S} = \frac{-0,5760 - 0}{0,1086} = -5,30$$

$$z_2 = \frac{r_2 - r}{S} = \frac{0,5760 - 0}{0,1086} = 5,30$$

## **5. COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE TAYLOR EXPANDIDA E TAYLOR SIMPLES A PARTIR DOS VALORES MEDIDOS.**

A partir dos valores de desgaste da ferramenta de corte, calculados pelas equações de Taylor simples e de Taylor expandida, foi feita uma comparação gráfica com os valores medidos nos experimentos de usinagem (anexo I), em cada uma das condições de corte para os aços ABNT 1038 e ABNT 1045. Assim é possível se analisar o comportamento do modelo proposto em comparação com a Taylor simples e os valores medidos, para os dois aços.

### **5.1 Comparação dos Modelos de Taylor para o Aço ABNT 1038**

Para o aço ABNT 1038, foram utilizadas oito condições de cortes. Os valores dos desgastes foram calculados, tanto pela equação de Taylor simples quanto pela equação de Taylor expandida, para o mesmo tempo de corte em que as medições dos desgastes ocorreram nos experimentos. Assim as figuras 5.1 até 5.8 mostram como foi o comportamento desses modelos em relação aos valores medidos do aço ABNT 1038.

A figura 5.1 mostra a comparação realizada nos modelos de Taylor expandida e simples com os valores medidos, para a primeira condição de ensaio. No início da usinagem no intervalo de 2 a 7 minutos percebe-se que os valores dos desgastes calculados desviam um pouco em relação aos valores reais. Supõe-se que isso ocorreu devido ao fato de que com o microscópio de ferramentaria utilizado nas medições dos desgastes, sendo o desgaste muito pequeno para tempos de corte baixos, a mensuração do mesmo foi mais difícil. Com o decorrer do tempo percebe-se que os valores calculados se ajustam bem aos valores medidos. Logo para esta condição de corte, o modelo proposto descreve bem a evolução do desgaste com o tempo de corte, como já constatado pelos cálculos realizados pelo STATDISK.

A figura 5.2 também mostra a comparação feita entre os modelos de Taylor expandida e simples com os valores medidos, para a condição de corte 2. O comportamento das curvas durante o período de usinagem teve uma série de desvios. Percebe-se logo no início da usinagem no intervalo de 2,00 a 7,68 minutos que os valores dos desgastes calculados desviam um pouco em relação aos valores medidos. Como já relatado na figura anterior, o desgaste a ser mensurado no início do ensaio foi realizado com certa dificuldade. Além do desgaste de flanco ser pequeno para um tempo de corte pequeno, o microscópio de ferramentaria também não apresenta um contraste grande entre a região desgastada e a afetada termicamente na superfície de folga da ferramenta, dificultando, portanto, a identificação da região onde o desgaste terminava. É importante ressaltar aqui que, para a condição de corte de ensaio 2, o tempo total do ensaio foi relativamente pequeno ( $T=11,5$  min), em comparação com o tempo total de ensaio da condição 1 ( $T=35$  min). Observa-se também que um avanço de 0,6 mm/volta e uma profundidade de corte de 5 mm, é um corte relativamente pesado e muito provavelmente deve ter havido uma vibração maior da ferramenta, em comparação com as condições do ensaio 1 onde o avanço foi de 0,3 mm/volta e a profundidade de corte foi de 3mm. De um modo geral as equações de Taylor tiveram uma boa aproximação entre elas e a dispersão delas com os desgastes medidos tiveram uma que variaram mais, no entanto observa-se que para um tempo de corte superior a 8,68 min o desgaste medido ficou entre os calculados pelos dois modelos.

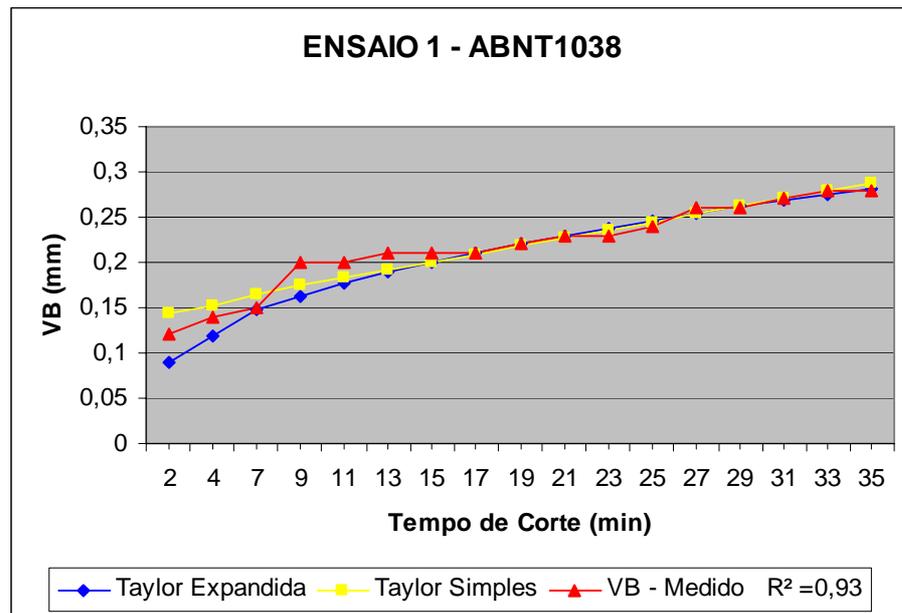


Figura. 5.1 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 1, do aço ABNT 1038, ( $V=100$  m/min,  $f=0,3$ mm/volta,  $ap=3$ mm).

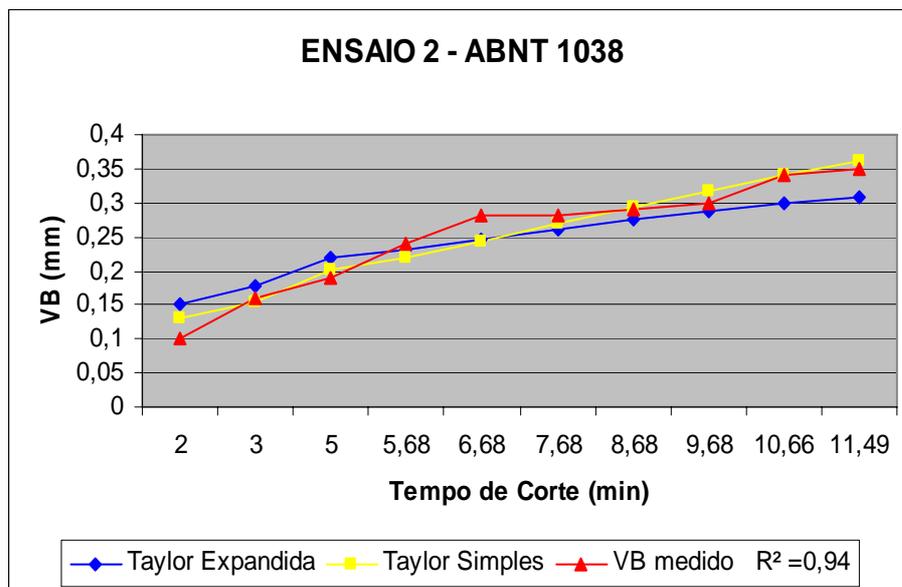


Figura. 5.2 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 2 do aço ABNT 1038 ( $V=140$ m/min,  $f=0,6$  mm/volta,  $ap=5$ mm)

A figura 5.3 mostra o comportamento dos desgastes da ferramenta de corte, calculados através das equações de Taylor, em relação aos dados dos desgastes medidos nos experimentos. Aqui se observa que, de um modo geral, a equação simples de Taylor se ajustou melhor aos pontos medidos do que os valores de desgaste calculados pela Taylor expandida. A equação expandida de Taylor, entre os tempos de 9 a 15 minutos, se ajustou bem tanto aos pontos medidos quanto aos calculados pela Taylor simples. A dispersão apresentada pela Taylor expandida, que

não é grande, acontece no início e no final do ensaio. A maior dispersão foi de apenas de 0,06 mm para um tempo de 19,46 min.

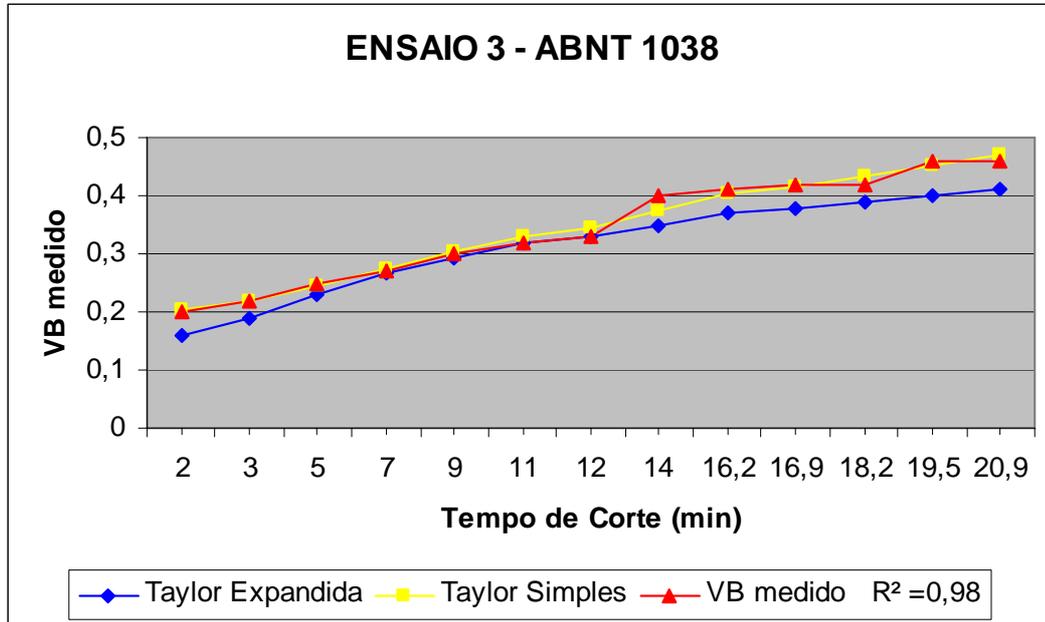


Figura. 5.3 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 3 do aço ABNT 1038 ( $V=180$  m/min,  $f=0,4$  mm/volta,  $ap=3$  mm).

A figura 5.4 mostra os resultados para a condição de ensaio 4, onde houve uma boa correlação entre as três curvas.

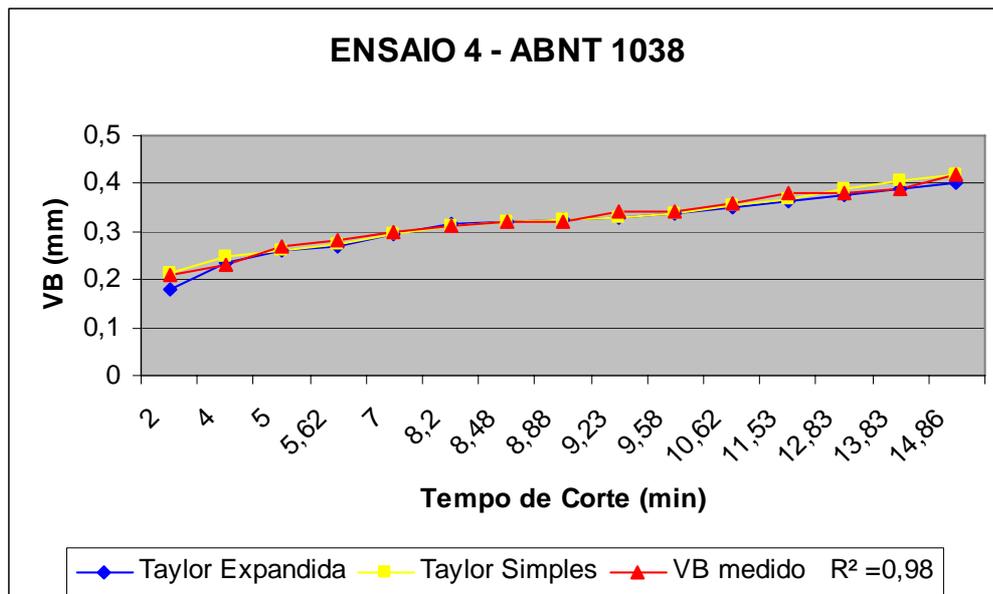


Figura. 5.4 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 4 do aço ABNT 1038 ( $V=220$  m/min,  $f=0,3$  mm/volta,  $ap=5$  mm).

Para a condição de ensaio 5, houve uma leve dispersão da Taylor expandida em relação a Taylor simples e aos valores medidos entre os tempos de 13,18 a 29,13 minutos, figura 5.5.

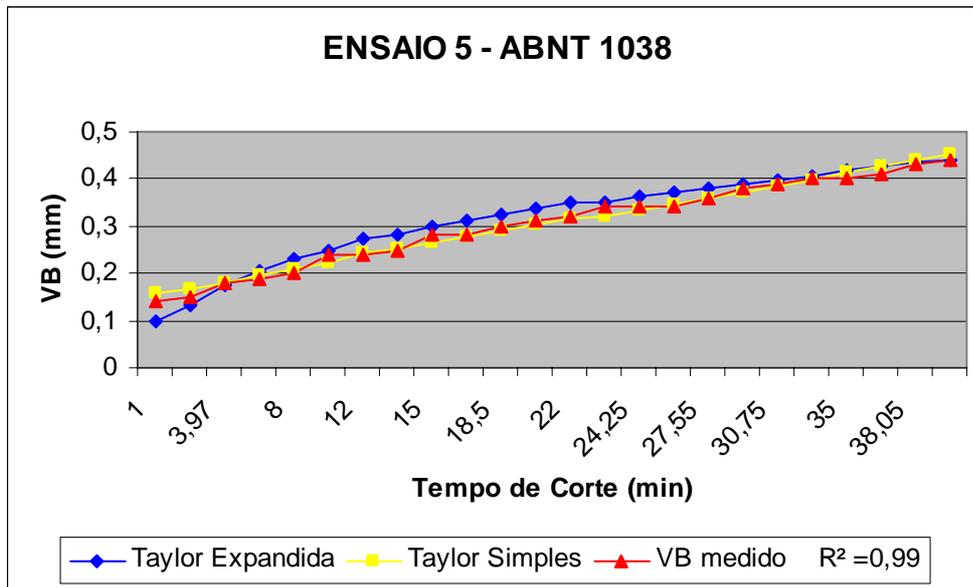


Figura. 5.5 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 5 do aço ABNT 1038 ( $V=140$  m/min,  $f=0,5$  mm/volta,  $ap=1,5$  mm).

Para a condição de ensaio 6, onde a área da seção de corte voltou ser grande ( $f=0,6$  mm/volta e  $ap=5$  mm) a maior dispersão da Taylor expandida (0,03 mm) aconteceu para o tempo de corte de 15,17 minutos, figuras 5.6.

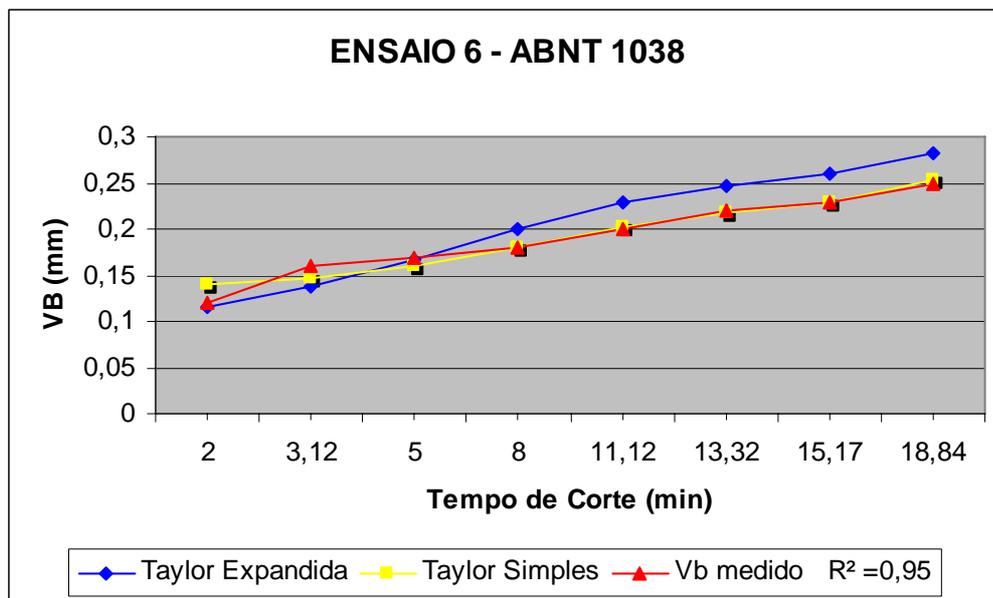


Figura.5.6 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 6 do aço ABNT 1038 ( $V=100$  m/min,  $f=0,6$  mm/volta,  $ap=5$  mm).

A figura 5.7 mostra os resultados para a condição de ensaio 4, onde houve uma boa correlação entre as três curvas.

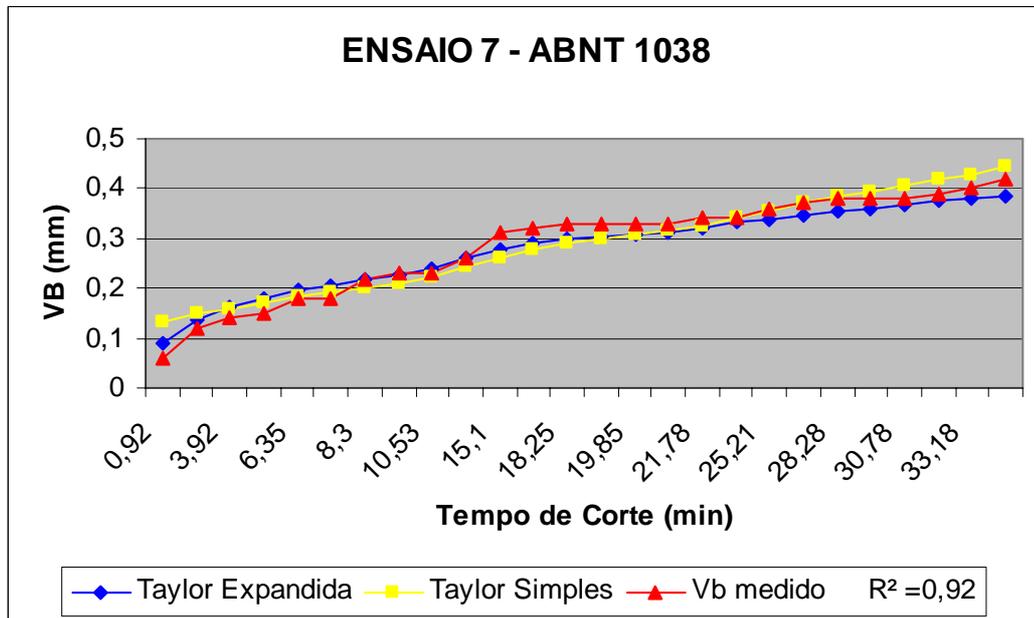


Figura. 5.7 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 7 do aço ABNT 1038 ( $V=140$  m/min,  $f=0,3$  mm/volta,  $a_p=5$  mm).

Percebe-se pela figura 5.8 que os modelos de Taylor e os valores medidos se ajustam bem ao fenômeno, existindo uma pequena variação entre os tempos de corte de 5 e 22,2 minutos.

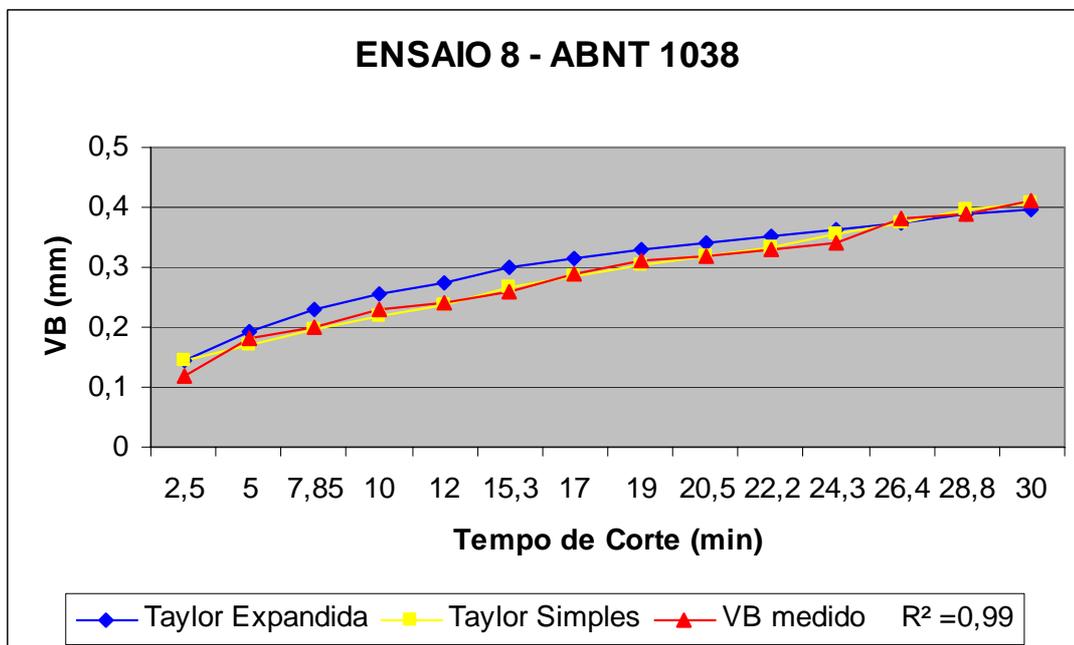


Figura. 5.8 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 8 do aço ABNT 1038 ( $V=180$  m/min,  $f=0,2$  mm/volta,  $a_p=5$  mm).

## 5.2 Comparação dos Modelos de Taylor para o Aço ABNT 1045

Os gráficos das figuras 5.9 a 5.14 apresentam os resultados dos valores medidos e calculados, pela equação simples e expandida de Taylor, do desgastes das ferramentas de corte em função do tempo de corte, para todas as condições dos ensaios do aço ABNT 1045.

A figura 5.9 apresenta os resultados para a condição de ensaio 1 do aço ABNT1045. Neste ensaio houve um leve desvio no intervalo de tempo de 13 a 16 minuto da equação de Taylor expandida em relação a Taylor simples e aos valores medidos do desgaste.

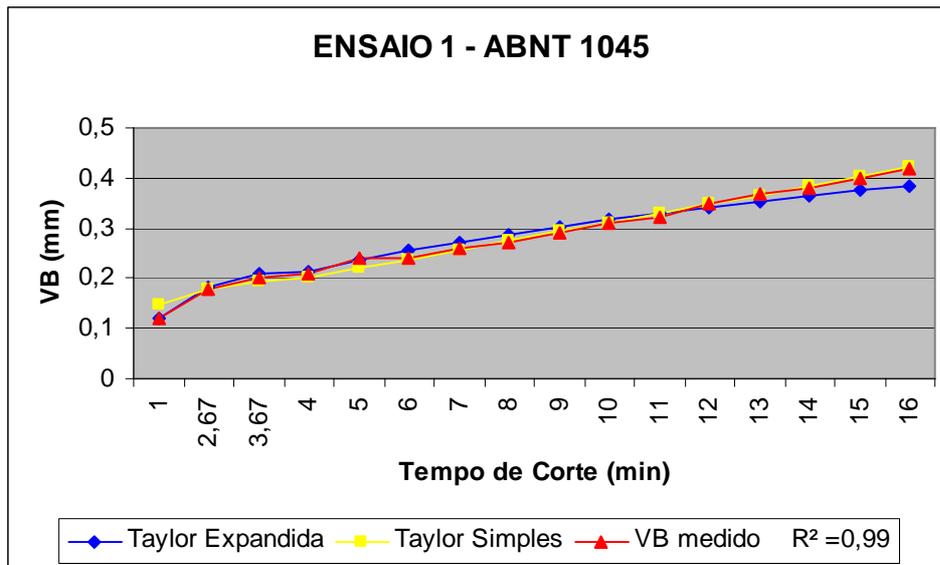


Figura. 5.9 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 1 do aço ABNT 1045 ( $V = 240$  m/min,  $f = 0,3$  mm/volta,  $ap = 2$ mm).

A figura 5.10 apresenta os resultados para a condição de ensaio 2 do aço ABNT1045. Neste ensaio para um tempo de corte superior a 30 minutos há um pequeno desvio da Taylor expandida em relação aos outros valores.

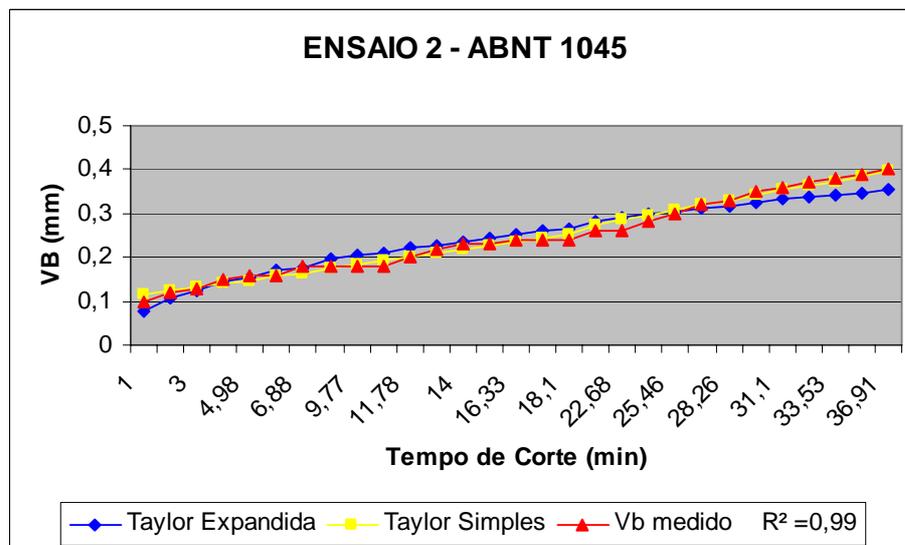


Figura. 5.10 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 2 do aço ABNT 1045 ( $V = 150$  m/min,  $f = 0,4$  mm/volta,  $ap = 5$ mm).

Nas figuras 5.11 5.12 as curvas tiveram comportamentos semelhantes o que mostra que os modelos representam bem a descrição do fenômeno.

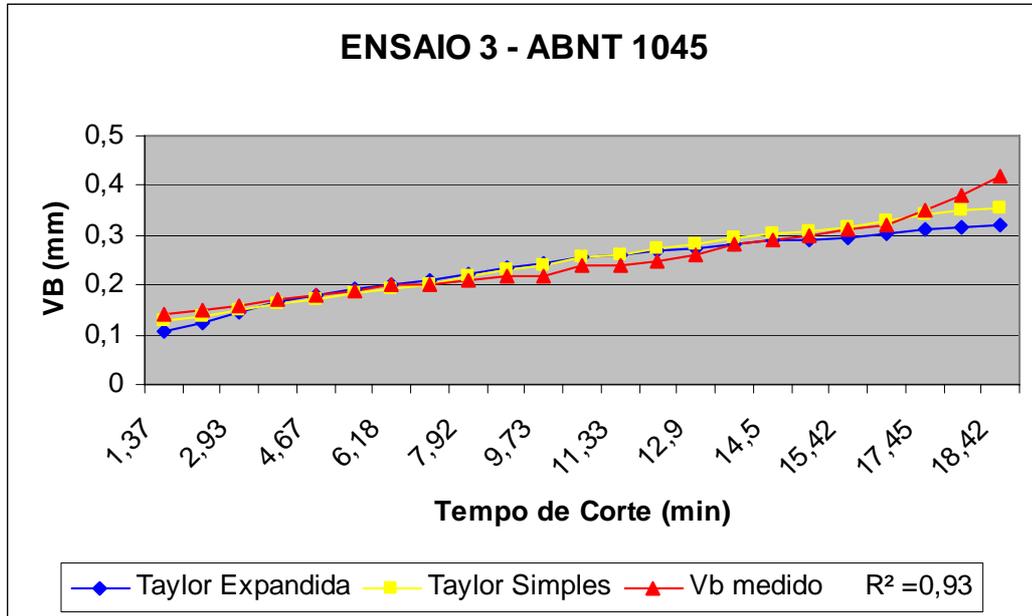


Figura 5.11 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 3 do aço ABNT 1045 ( $V = 190$  m/min,  $f = 0,6$  mm/volta,  $ap = 2$ mm).

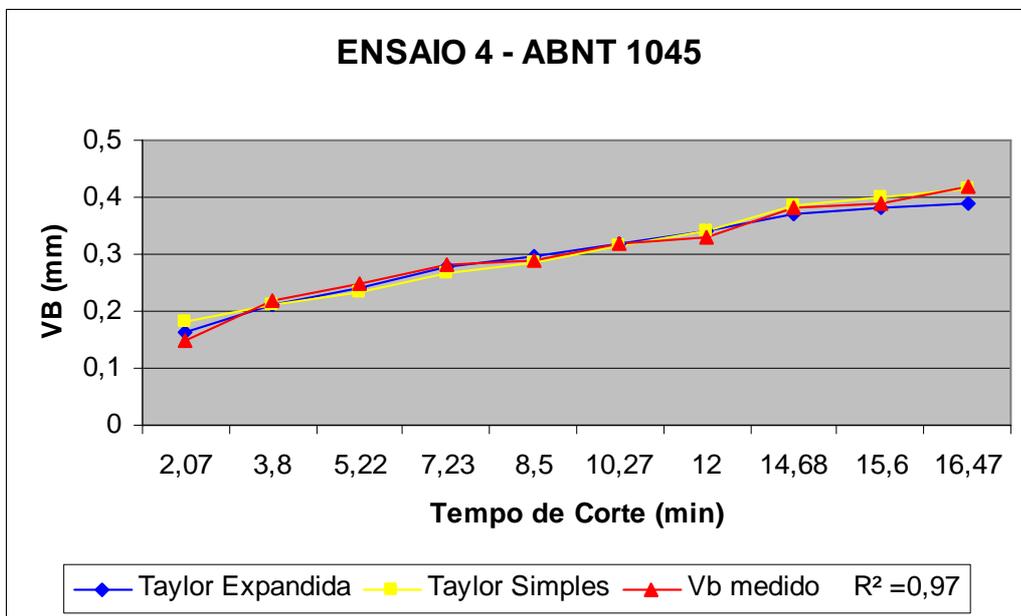


Figura 5.12 – Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 4 do aço ABNT 1045, ( $V = 240$  m/min,  $f = 0,3$  mm/volta,  $ap = 2$ mm).

As figuras 5.13 e 5.14 apresentam os resultados dos desgastes da ferramenta de corte para as seguintes condições de corte: velocidade de corte de 190 m/min, avanço de 0,6 mm/volta e

profundidade de corte de 2 mm. Esta condição de corte foi a de número cinco, que teve o ensaio foi repetido. Para ambas as figuras 5.13 e 5.14 os valores de Taylor simples e expandida ficaram acima dos valores medidos, no meio do ensaio. Observa-se que o avanço aqui foi de 0,6 mm/volta o que é um avanço relativamente grande e que deve ter sido a causa do desvio. Para a figura 5.14 os desgastes medidos ficaram acima dos estimados pelas equações de Taylor, para os dois pontos finais. Para estes dois ensaios o maior desvio aconteceu no último ponto da figura 5.14 e foi de 0,11 mm para a fórmula de Taylor expandida.

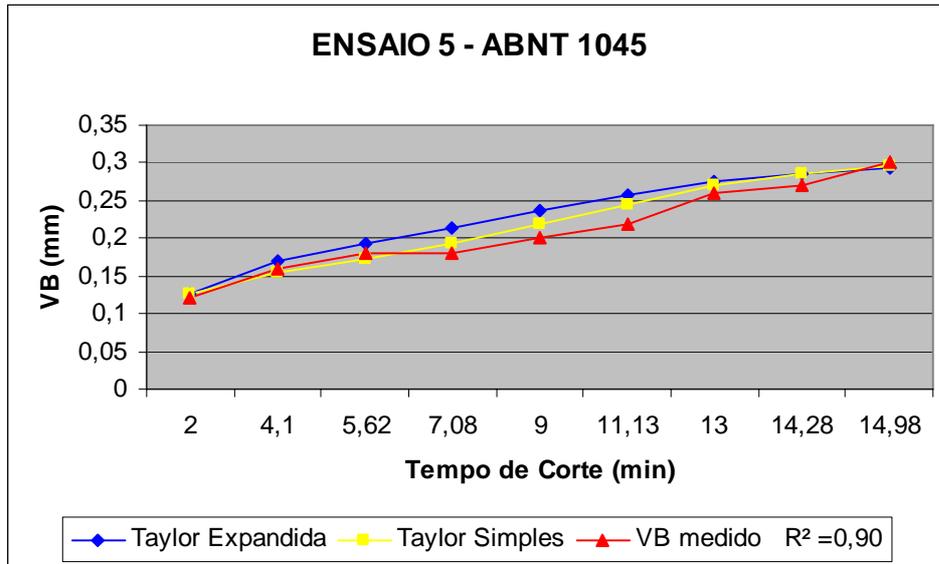


Figura 5.13 – Gráfico de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 5 do aço ABNT 1045, ( $V = 190$  m/min,  $f = 0,6$  mm/volta,  $ap = 2$  mm).

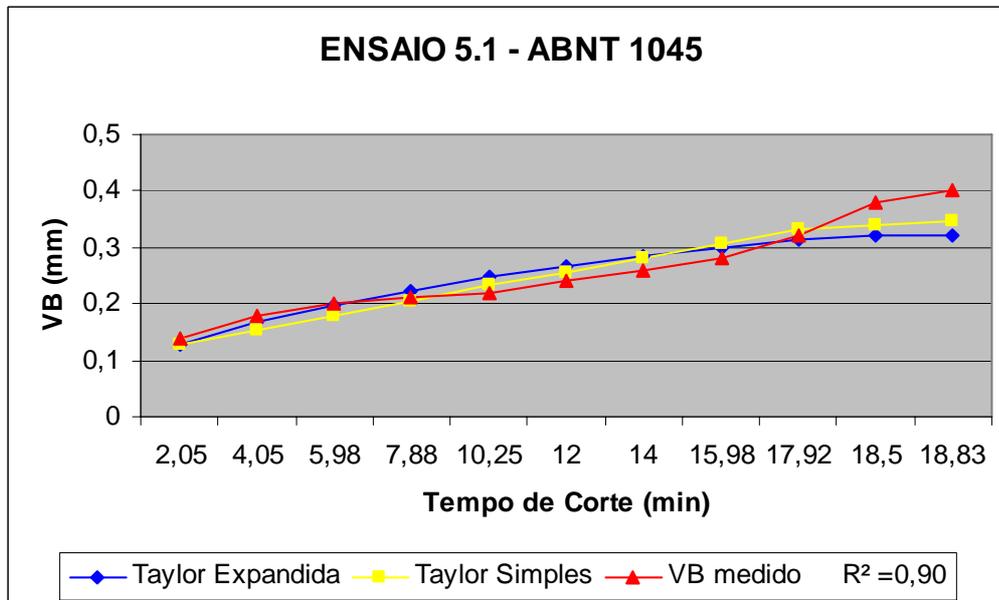


Figura 5.14 - Gráfico de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 5.1 do aço ABNT 1045, ( $V = 190$  m/min,  $f = 0,6$  mm/volta,  $ap = 2$  mm).

Para a última condição de corte do aço ABNT 1045, os modelos pouco variaram em torno dos dados medidos, assim eles descrevem bem o fenômeno físico de desgaste da ferramenta de corte.

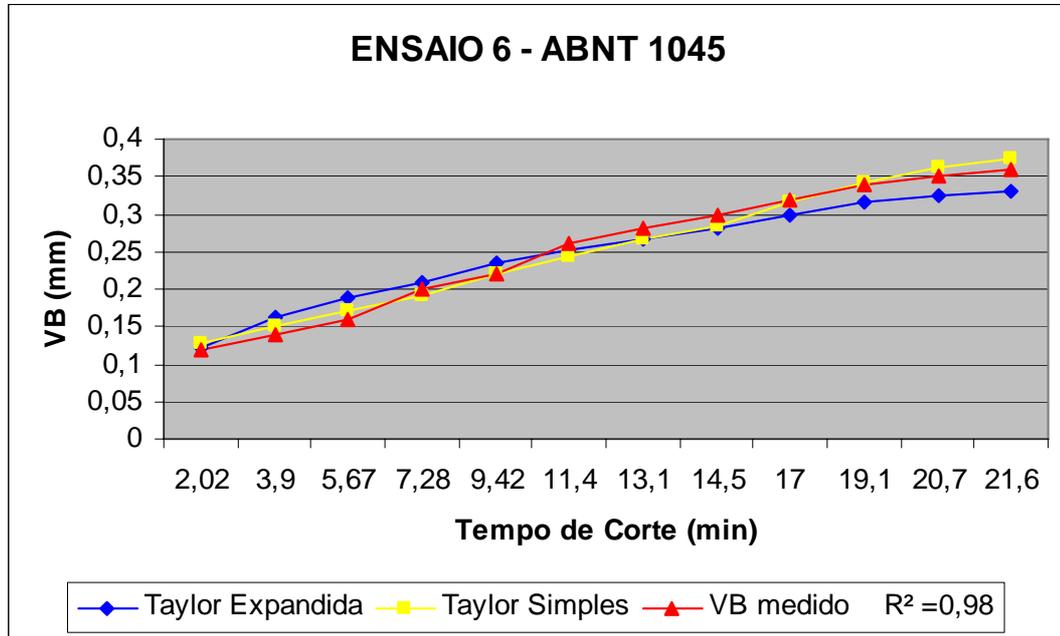


Figura 5.15. Gráficos de comparação dos modelos de Taylor simples e expandida e os desgastes calculados para a condição 6 do aço ABNT 1045, ( $V = 210$  m/min,  $f = 0,2$  mm/volta,  $a_p = 2$  mm).

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo apresentar e avaliar um novo modelo algébrico para descrever o desgaste da ferramenta de corte, no processo de usinagem de torneamento. Neste novo modelo o desgaste de flanco é a variável independente, uma vez que assim acontece na realidade, pois, o desgaste é função da velocidade de corte, do avanço, da profundidade de corte e do tempo de corte. Anteriormente vários pesquisadores expressaram algebricamente a relação entre as variáveis do processo de usinagem, mas se desconhece que alguém tenha expressado o desgaste como a variável dependente.

Para se obter os parâmetros do modelo proposto foi inicialmente necessário lineariza-lo e transforma-lo num sistema de equações de cinco variáveis a cinco equações. Usando-se os dados experimentais do trabalho de Mesquita (1980) para os aços ABNT 1038 e 1045, foi possível se calcular os parâmetros da Taylor expandida modificada. Para solução deste sistema de equações foi usado o programa STATDISK. Os resultados dos parâmetros obtidos indicaram uma forte correlação entre os dados experimentais e os analíticos calculados pela fórmula de Taylor simples e pelo modelo algébrico proposto, comprovando que o mesmo descreve de forma bastante satisfatória o fenômeno em questão, que é o desgaste da ferramenta de corte.

Mesquita (1981) em seu trabalho concluiu que os desvios da fórmula Expandida de Taylor eram maiores que os da fórmula simples de Taylor, porém esta conclusão não chegou a ser pontualmente quantificada. Os desvios apresentados pela fórmula de Taylor expandida modificada foram pontualmente quantificados neste trabalho e não são tão grandes como se imaginava antes. Os valores algébricos obtidos pela Taylor expandida modificada quando comparados entre os 237 valores medidos nos ensaios de usinagem, para os dois aços sob diferentes condições de corte, apresentaram desvios relativamente pequenos, tendo o valor máximo ocorrido no ensaio 5-1 do aço ABNT 1045, no qual o avanço utilizado foi de 0,6 mm/volta, sendo o desvio igual a 0,11 mm. Para o aço ABNT 1038 o maior desvio, entre o valor algébrico calculado pelo modelo proposto e o desgaste medido, ficou na ordem de 0,06 mm e ocorreu no ensaio 3, que teve as seguintes condições de corte:  $V=180$  m/min,  $f=0,4$  mm/volta,  $ap=3$  mm. Os maiores desvios apareceram nos ensaios onde a área da seção de corte, ou o avanço eram grandes. Observou-se também que para pequenos desgastes, no início dos ensaios para um tempo de corte pequeno, houve também uma pequena dispersão dos três valores do desgaste (desgastes calculados pela Taylor simples, pela Taylor expandida modificada e os desgastes medidos).

Na correlação múltipla para determinação dos parâmetros da Taylor expandida modificada, o coeficiente de determinação dado pelo STATDISK foi de 0,91, para o aço ABNT 1038. Para o aço ABNT 1045 este mesmo coeficiente foi de 0,92. Na correlação linear usada para a determinação dos parâmetros da Taylor simples os coeficientes de determinação ficaram entre 0,90 e 0,99.

Com os novos recursos hoje disponíveis, tais como, microscópio eletrônico de varredura, dinamômetros ligados a microcomputadores com aquisição contínua de medição de forças de corte, entre outros a facilidade de se realizar ensaios de usinagem ficou bem maior. O contraste que o microscópio eletrônico de varredura oferece, facilita muito a mensuração dos desgastes de flanco, podendo com isto os desvios entre os valores medidos e calculados se tornar ainda menores.

## **7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.**

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se:

- Levantar os parâmetros da Taylor expandida modificada para outros materiais e processos de usinagem;
- Levantar os parâmetros da Taylor expandida modificada para o desgaste de cratera, que apesar de não ter uma influência direta na dimensão da peça usinada, como é o caso do desgaste de flanco, tem influência direta no tipo de cavaco formado e não deve evoluir a ponto de vir provocar a quebra da ponta da ferramenta.
- Otimizar as condições de corte a partir da fórmula de Taylor modificada.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ASTME**, *Tool Engineers Handbook*, New York, McGraw-Hill Book Co.1959.

**AWF-158**, Richtwerte für das Drehen mit Schellarbeitsstahl und Hartmetalwerkzeug – Kurzausgabe, Berlin, 1949.

**Bernstein, P. L.** *Against the Gods – The Remarkable Story of Risk*, John Wiley & Sons, Inc. Nova York, 1996.

**Bickel, P.J; Doksum, K.A;** *Mathematical Statistic*, Prentice Hall, New Jersey, 2001. V.1

**Boehs, L.**, “Projeto e Implantação de um Sistema Computadorizado de Banco de Dados de Usinagem (CINFUS), Tese de Doutorado da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1988.

**Christmann, R.** *Estatística Aplicada* , São Paulo, Edgar Blücher, 1992.

**Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L.** *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*, MM Editora, São Paulo, 1999.

**Evaristo, J; Perdigão, E.**, *Introdução à Álgebra Abstrata*, Edufal - Editora da Universidade de Alagoas, Maceió, 2002.

**Ferraresi, D.** “Fundamento da Usinagem dos Metais, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1977.

**James, B;** *Probabilidade: Um curso Intermediário*, Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada –IMPA, Rio de Janeiro,1996, Segunda Edição.

**Kreyzig, E.** *Statistische Methoden und ihre Anwendungen*, Vanderhoeck & Ruprecht Verlag, Götting, 1975

**Kronenberg, M.** *Machining Science and Application*, Oxford, Pergamon Press, 1966,

**Larson M. J;** *Introduction to Probability Theory and Statistic Inference*, Chapman & Hall – CH, New York, 1982, Third Edition.

**Lehmann, E.L; Romano, J. P;** *Testing Statistical Hypotheses*, Springer, New York, 2005.Third Edition.

**Lima, E. L;** *Curso de Analise*, Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada –IMPA, Rio de Janeiro,2006, volume 1.

**Lima, E. L;** *Curso de Analise*, Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada –IMPA, Rio de Janeiro,2006, volume 2.

**Lima, E.L;** *Elementos de Topologia Geral*, Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada – IMPA, Rio de Janeiro,1969, volume 1.

- Lima, E.L;** *Elementos de Topologia Geral*, Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada – IMPA, Rio de Janeiro, 1969, volume 2.
- Mal'cev A.I,** *Contemporary Mathematics, Proceeding of the International Conference on Algebra*, United States, American Mathematical Society, 1992, Part 1.
- Mendenhal,W.** *Probabilidade e Estatística*. Rio de Janeiro, Campus, 1985, Volume 1.
- Mesquita. N. G.M.** “Determinação dos Parâmetros da Fórmula de Taylor Expandida”, Dissertação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1980.
- Montgomery, D.C; Runger G.C.** *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. Rio de Janeiro, LTC, 2003, Segunda Edição.
- Ramirez, R.M;** *Introdução a Geometria Ergódica*, Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada –IMPA, Rio de Janeiro, 1979.
- Ross, S.M;** *Introduction to Probability models*, Academic Press- AP, New York, 1997, Sixth Edition.
- Silva, N. N.** *Amostragem Probabilística*, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- Stemmer, C. E.** *Ferramentas de Corte I*, Editora da UFSC, Florianópolis 1995.
- Tangora, M.C.** *Contemporary Mathematic , Algebraic Topology*, Mexico, American Mathematical Society, 1991.
- Taqqui, G.S;** *Stable Non-gaussian Ranon Processes*, Chapman & Hall- CH, New York, 1994
- Triola, M. F.** *Introdução à Estatística*, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2005
- Widia, \*\*\*\*\***

## ANEXO I

Tabela dos dados experimentais de usinagem para o aço ABNT 1038 (Mesquita, 1981).

Observação	V (m/min)	f (mm/volta)	ap ( mm)	T (min)	VB (mm)
01	100	0,3	3,0	2,00	0,12
02	100	0,3	3,0	4,00	0,14
03	100	0,3	3,0	7,00	0,15
04	100	0,3	3,0	9,00	0,20
05	100	0,3	3,0	11,00	0,20
06	100	0,3	3,0	13,00	0,21
07	100	0,3	3,0	15,00	0,21
08	100	0,3	3,0	17,00	0,21
09	100	0,3	3,0	19,00	0,22
10	100	0,3	3,0	21,00	0,23
11	100	0,3	3,0	23,00	0,23
12	100	0,3	3,0	25,00	0,24
13	100	0,3	3,0	27,00	0,26
14	100	0,3	3,0	29,00	0,26
15	100	0,3	3,0	31,00	0,27
16	100	0,3	3,0	33,00	0,28
17	100	0,3	3,0	35,00	0,28
18	140	0,6	5,0	2,00	0,10
19	140	0,6	5,0	3,00	0,16
20	140	0,6	5,0	5,00	0,19
21	140	0,6	5,0	5,68	0,24
22	140	0,6	5,0	6,68	0,28
23	140	0,6	5,0	7,68	0,28
24	140	0,6	5,0	8,68	0,29
25	140	0,6	5,0	9,68	0,30
26	140	0,6	5,0	10,66	0,34
27	140	0,6	5,0	11,49	0,35
28	180	0,4	3,0	2,00	0,20
29	180	0,4	3,0	3,00	0,22
30	180	0,4	3,0	5,00	0,25
31	180	0,4	3,0	7,00	0,27
32	180	0,4	3,0	9,00	0,30
33	180	0,4	3,0	11,00	0,32
34	180	0,4	3,0	12,00	0,33
35	180	0,4	3,0	13,98	0,40
36	180	0,4	3,0	16,20	0,41
37	180	0,4	3,0	16,87	0,42
38	180	0,4	3,0	18,19	0,42
39	180	0,4	3,0	19,46	0,46
40	180	0,4	3,0	20,94	0,46
41	220	0,3	5,0	2,00	0,21
42	220	0,3	5,0	4,00	0,23
43	220	0,3	5,0	5,00	0,27

Continuação (Tabela dos dados experimentais de usinagem para o aço ABNT 1038 (Mesquita, 1981))

Observação	V (m/min)	f (mm/volta)	ap ( mm)	T (min)	VB (mm)
44	220	0,3	5,0	5,62	0,28
45	220	0,3	5,0	7,00	0,30
46	220	0,3	5,0	8,20	0,31
47	220	0,3	5,0	8,48	0,32
48	220	0,3	5,0	8,88	0,32
49	220	0,3	5,0	9,23	0,34
50	220	0,3	5,0	9,58	0,34
51	220	0,3	5,0	10,62	0,36
52	220	0,3	5,0	11,53	0,38
53	220	0,3	5,0	12,83	0,38
54	220	0,3	5,0	13,83	0,39
55	220	0,3	5,0	14,86	0,42
56	140	0,5	1,5	1,00	0,14
57	140	0,5	1,5	2,00	0,15
58	140	0,5	1,5	3,97	0,18
59	140	0,5	1,5	5,88	0,19
60	140	0,5	1,5	8,00	0,20
61	140	0,5	1,5	9,58	0,24
62	140	0,5	1,5	12,00	0,24
63	140	0,5	1,5	13,18	0,25
64	140	0,5	1,5	15,00	0,28
65	140	0,5	1,5	16,72	0,28
66	140	0,5	1,5	18,50	0,30
67	140	0,5	1,5	20,17	0,31
68	140	0,5	1,5	22,00	0,32
69	140	0,5	1,5	22,55	0,34
70	140	0,5	1,5	24,25	0,34
71	140	0,5	1,5	25,90	0,34
72	140	0,5	1,5	27,55	0,36
73	140	0,5	1,5	29,13	0,38
74	140	0,5	1,5	30,75	0,39
75	140	0,5	1,5	32,35	0,40
76	140	0,5	1,5	35,00	0,40
77	140	0,5	1,5	36,52	0,41
78	140	0,5	1,5	38,05	0,43
79	140	0,6	1,5	39,65	0,44
80	100	0,6	5,0	2,00	0,12
81	100	0,6	5,0	3,12	0,16
82	100	0,6	5,0	5,00	0,17
83	100	0,6	5,0	8,00	0,18
84	100	0,6	5,0	11,12	0,20
85	100	0,6	5,0	13,32	0,22
86	100	0,6	5,0	15,17	0,23
87	100	0,6	5,0	18,84	0,25

Continuação (Tabela dos dados experimentais de usinagem para o aço ABNT 1038 (Mesquita, 1981))

Observação	V (m/min)	f (mm/volta)	ap ( mm)	T (min)	V B (mm)
88	140	0,3	5,0	0,92	0,06
89	140	0,3	5,0	2,67	0,12
90	140	0,3	5,0	3,92	0,14
91	140	0,3	5,0	5,08	0,15
92	140	0,3	5,0	6,35	0,18
93	140	0,3	5,0	7,28	0,18
94	140	0,3	5,0	8,30	0,22
95	140	0,3	5,0	9,45	0,23
96	140	0,3	5,0	10,53	0,23
97	140	0,3	5,0	12,98	0,26
98	140	0,3	5,0	15,10	0,31
99	140	0,3	5,0	16,85	0,32
100	140	0,3	5,0	18,25	0,33
101	140	0,3	5,0	19,17	0,33
102	140	0,3	5,0	19,85	0,33
103	140	0,3	5,0	20,78	0,33
104	140	0,3	5,0	21,78	0,34
105	140	0,3	5,0	23,78	0,34
106	140	0,3	5,0	25,21	0,36
107	140	0,3	5,0	26,78	0,37
108	140	0,3	5,0	28,28	0,38
109	140	0,3	5,0	29,36	0,38
110	140	0,3	5,0	30,78	0,38
111	140	0,3	5,0	32,28	0,39
112	140	0,3	5,0	33,18	0,40
113	140	0,3	5,0	34,70	0,42
114	180	0,2	5,0	2,50	0,12
115	180	0,2	5,0	5,00	0,18
116	180	0,2	5,0	7,85	0,20
117	180	0,2	5,0	10,00	0,23
118	180	0,2	5,0	12,00	0,24
119	180	0,2	5,0	15,25	0,26
120	180	0,2	5,0	17,00	0,29
121	180	0,2	5,0	19,00	0,31
122	180	0,2	5,0	20,50	0,32
123	180	0,2	5,0	22,23	0,33
124	180	0,2	5,0	24,25	0,34
125	180	0,2	5,0	26,35	0,38
126	180	0,2	5,0	28,80	0,39
127	180	0,2	5,0	30,00	0,41

## ANEXO II

Tabela dos dados experimentais de usinagem para o aço ABNT 1045 (Mesquita, 1981).

Obsevação	V (m/min)	f (mm/volta)	ap ( mm)	T (min)	VB (mm)
1	240	0.30	2.0	1,00	0,12
2	240	0.30	2.0	2,67	0,18
3	240	0.30	2.0	3,67	0,2
4	240	0.30	2.0	4,00	0,21
5	240	0.30	2.0	5,00	0,24
6	240	0.30	2.0	6,00	0,24
7	240	0.30	2.0	7,00	0,26
8	240	0.30	2.0	8,00	0,27
9	240	0.30	2.0	9,00	0,29
10	240	0.30	2.0	10,00	0,31
11	240	0.30	2.0	11,00	0,32
12	240	0.30	2.0	12,00	0,35
13	240	0.30	2.0	13,00	0,37
14	240	0.30	2.0	13,97	0,38
15	240	0.30	2.0	15,00	0,4
16	240	0.30	2.0	16,00	0,42
17	150	0.40	5.0	1,00	0,1
18	150	0.40	5.0	2,17	0,12
19	150	0.40	5.0	3,00	0,13
20	150	0.40	5.0	4,33	0,15
21	150	0.40	5.0	4,98	0,16
22	150	0.40	5.0	6,27	0,16
23	150	0.40	5.0	6,88	0,18
24	150	0.40	5.0	8,83	0,18
25	150	0.40	5.0	9,77	0,18
26	150	0.40	5.0	10,63	0,18
27	150	0.40	5.0	11,78	0,2
28	150	0.40	5.0	12,87	0,22
29	150	0.40	5.0	14,00	0,23
30	150	0.40	5.0	15,22	0,23
31	150	0.40	5.0	16,33	0,24
32	150	0.40	5.0	17,33	0,24
33	150	0.40	5.0	18,10	0,24
34	150	0.40	5.0	20,99	0,26
35	150	0.40	5.0	22,68	0,26
36	150	0.40	5.0	24,01	0,28
37	150	0.40	5.0	25,46	0,3
38	150	0.40	5.0	27,01	0,32
39	150	0.40	5.0	28,26	0,33
40	150	0.40	5.0	29,65	0,35
41	150	0.40	5.0	31,10	0,36
42	150	0.40	5.0	32,33	0,37
43	150	0.40	5.0	33,53	0,38
44	150	0.40	5.0	34,90	0,39
45	150	0.40	5.0	36,91	0,4
46	190	0.60	2.0	1,37	0,14
47	190	0.60	2.0	2,00	0,15
48	190	0.60	2.0	2,93	0,16
49	190	0.60	2.0	3,82	0,17
50	190	0.60	2.0	4,67	0,18
51	190	0.60	2.0	5,43	0,19
52	190	0.60	2.0	6,18	0,2

Continuação (Tabela dos dados experimentais de usinagem para o aço ABNT 1045 (Mesquita, 1981)).

Obsevação	V (m/min)	f (mm/volta)	ap ( mm)	T (min)	VB (mm)
53	190	0.60	2.0	6,80	0,2
54	190	0.60	2.0	7,92	0,21
55	190	0.60	2.0	8,92	0,22
56	190	0.60	2.0	9,73	0,22
57	190	0.60	2.0	10,85	0,24
58	190	0.60	2.0	11,33	0,24
59	190	0.60	2.0	12,18	0,25
60	190	0.60	2.0	12,90	0,26
61	190	0.60	2.0	13,80	0,28
62	190	0.60	2.0	14,50	0,29
63	190	0.60	2.0	14,92	0,3
64	190	0.60	2.0	15,42	0,31
65	190	0.60	2.0	16,42	0,32
66	190	0.60	2.0	17,45	0,35
67	190	0.60	2.0	17,92	0,38
68	190	0.60	2.0	18,42	0,42
69	240	0.30	2.0	2,07	0,15
70	240	0.30	2.0	3,80	0,22
71	240	0.30	2.0	5,22	0,25
72	240	0.30	2.0	7,23	0,28
73	240	0.30	2.0	8,50	0,29
74	240	0.30	2.0	10,27	0,32
75	240	0.30	2.0	12,00	0,33
76	240	0.30	2.0	14,68	0,38
77	240	0.30	2.0	15,60	0,39
78	240	0.30	2.0	16,47	0,42
79	190	0.60	2.0	2,00	0,12
80	190	0.60	2.0	4,10	0,16
81	190	0.60	2.0	5,62	0,18
82	190	0.60	2.0	7,08	0,18
83	190	0.60	2.0	9,00	0,2
84	190	0.60	2.0	11,13	0,22
85	190	0.60	2.0	13,00	0,26
86	190	0.60	2.0	14,28	0,27
87	190	0.60	2.0	14,98	0,3
88	190	0.60	2.0	2,05	0,14
89	190	0.60	2.0	4,05	0,18
90	190	0.60	2.0	5,98	0,2
91	190	0.60	2.0	7,88	0,21
92	190	0.60	2.0	10,25	0,22
93	190	0.60	2.0	12,00	0,24
94	190	0.60	2.0	14,00	0,26
95	190	0.60	2.0	15,98	0,28
96	190	0.60	2.0	17,92	0,32
97	190	0.60	2.0	18,50	0,38
98	190	0.60	2.0	18,83	0,4
99	210	0.20	2.0	2,02	0,12
100	210	0.20	2.0	3,90	0,14
101	210	0.20	2.0	5,67	0,16
102	210	0.20	2.0	7,28	0,2
103	210	0.20	2.0	9,42	0,22
104	210	0.20	2.0	11,38	0,26
105	210	0.20	2.0	13,08	0,28

Continuação (Tabela dos dados experimentais de usinagem para o aço ABNT 1045 (Mesquita, 1981)).

106	210	0.20	2.0	14,52	0,3
107	210	0.20	2.0	17,03	0,32
108	210	0.20	2.0	19,13	0,34
109	210	0.20	2.0	20,67	0,35

## ANEXO III

Tabela dos valores logarítmicos dos dados experimentais para o aço ABNT 1038.

Observação	ln(V)	ln(f)	ln(ap)	ln(T)	ln(Vb)
1	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	0,693147181	-2,120263536
2	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	1,386294361	-1,966112856
3	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	1,945910149	-1,897119985
4	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	2,197224577	-1,609437912
5	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	2,397895273	-1,609437912
6	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	2,564949357	-1,560647748
7	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	2,708050201	-1,560647748
8	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	2,833213344	-1,560647748
9	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	2,944438979	-1,514127733
10	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	3,044522438	-1,46967597
11	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	3,135494216	-1,46967597
12	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	3,218875825	-1,427116356
13	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	3,295836866	-1,347073648
14	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	3,36729583	-1,347073648
15	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	3,433987204	-1,30933332
16	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	3,496507561	-1,272965676
17	4,605170186	-1,203972804	1,098612289	3,555348061	-1,272965676
18	4,941642423	-0,510825624	1,609437912	0,693147181	-2,302585093
19	4,941642423	-0,510825624	1,609437912	1,098612289	-1,832581464
20	4,941642423	-0,510825624	1,609437912	1,609437912	-1,660731207
21	4,941642423	-0,510825624	1,609437912	1,736951233	-1,427116356
22	4,941642423	-0,510825624	1,609437912	1,899117988	-1,272965676
23	4,941642423	-0,510825624	1,609437912	2,038619547	-1,272965676
24	4,941642423	-0,510825624	1,609437912	2,161021529	-1,237874356
25	4,941642423	-0,510825624	1,609437912	2,270061901	-1,203972804
26	4,941642423	-0,510825624	1,609437912	2,366498419	-1,078809661
27	4,941642423	-0,510825624	1,609437912	2,441477092	-1,049822124
28	5,192956851	-0,916290732	1,098612289	0,693147181	-1,609437912
29	5,192956851	-0,916290732	1,098612289	1,098612289	-1,514127733
30	5,192956851	-0,916290732	1,098612289	1,609437912	-1,386294361
31	5,192956851	-0,916290732	1,098612289	1,945910149	-1,30933332
32	5,192956851	-0,916290732	1,098612289	2,197224577	-1,203972804
33	5,192956851	-0,916290732	1,098612289	2,397895273	-1,139434283
34	5,192956851	-0,916290732	1,098612289	2,48490665	-1,108662625
35	5,192956851	-0,916290732	1,098612289	2,637627737	-0,916290732
36	5,192956851	-0,916290732	1,098612289	2,785011242	-0,891598119
37	5,192956851	-0,916290732	1,098612289	2,825536897	-0,867500568
38	5,192956851	-0,916290732	1,098612289	2,900871993	-0,867500568
39	5,192956851	-0,916290732	1,098612289	2,968361077	-0,776528789
40	5,192956851	-0,916290732	1,098612289	3,041661205	-0,776528789
41	5,393627546	-1,203972804	1,609437912	0,693147181	-1,560647748
42	5,393627546	-1,203972804	1,609437912	1,386294361	-1,46967597
43	5,393627546	-1,203972804	1,609437912	1,609437912	-1,30933332

Obsevação	$\ln(V)$	$\ln(f)$	$\ln(ap)$	$\ln(T)$	$\ln(Vb)$
44	5,393627546	-1,203972804	1,609437912	1,726331664	-1,272965676
45	5,393627546	-1,203972804	1,609437912	1,945910149	-1,203972804
46	5,393627546	-1,203972804	1,609437912	2,104134154	-1,171182982
47	5,393627546	-1,203972804	1,609437912	2,13771045	-1,139434283
48	5,393627546	-1,203972804	1,609437912	2,183801557	-1,139434283
49	5,393627546	-1,203972804	1,609437912	2,222459049	-1,078809661
50	5,393627546	-1,203972804	1,609437912	2,259677592	-1,078809661
51	5,393627546	-1,203972804	1,609437912	2,362739016	-1,021651248
52	5,393627546	-1,203972804	1,609437912	2,444952334	-0,967584026
53	5,393627546	-1,203972804	1,609437912	2,551786179	-0,967584026
54	5,393627546	-1,203972804	1,609437912	2,626840146	-0,94160854
55	5,393627546	-1,203972804	1,609437912	2,698673039	-0,867500568
56	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	0	-1,966112856
57	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	0,693147181	-1,897119985
58	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	1,378766095	-1,714798428
59	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	1,771556762	-1,660731207
60	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	2,079441542	-1,609437912
61	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	2,259677592	-1,427116356
62	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	2,48490665	-1,427116356
63	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	2,578700529	-1,386294361
64	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	2,708050201	-1,272965676
65	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	2,816605608	-1,272965676
66	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	2,917770732	-1,203972804
67	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	3,004196352	-1,171182982
68	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	3,091042453	-1,139434283
69	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	3,115735066	-1,078809661
70	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	3,188416617	-1,078809661
71	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	3,254242969	-1,078809661
72	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	3,316002536	-1,021651248
73	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	3,371768571	-0,967584026
74	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	3,425889994	-0,94160854
75	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	3,476614021	-0,916290732
76	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	3,555348061	-0,916290732
77	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	3,597860056	-0,891598119
78	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	3,638901084	-0,84397007
79	4,941642423	-0,693147181	0,405465108	3,680090948	-0,820980552
80	4,605170186	-0,510825624	1,609437912	0,693147181	-2,120263536
81	4,605170186	-0,510825624	1,609437912	1,137833002	-1,832581464
82	4,605170186	-0,510825624	1,609437912	1,609437912	-1,771956842
83	4,605170186	-0,510825624	1,609437912	2,079441542	-1,714798428
84	4,605170186	-0,510825624	1,609437912	2,408745289	-1,609437912
85	4,605170186	-0,510825624	1,609437912	2,589266665	-1,514127733
86	4,605170186	-0,510825624	1,609437912	2,719319793	-1,46967597
87	4,605170186	-0,510825624	1,609437912	2,935982269	-1,386294361
88	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	-0,083381609	-2,813410717
89	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	0,982078472	-2,120263536

Observação	$\ln(V)$	$\ln(f)$	$\ln(ap)$	$\ln(T)$	$\ln(Vb)$
90	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	1,366091654	-1,966112856
91	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	1,625311262	-1,897119985
92	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	1,848454813	-1,714798428
93	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	1,985130862	-1,714798428
94	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	2,116255515	-1,514127733
95	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	2,246014742	-1,46967597
96	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	2,354228326	-1,46967597
97	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	2,563409711	-1,347073648
98	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	2,714694744	-1,171182982
99	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	2,824350657	-1,139434283
100	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	2,90416508	-1,108662625
101	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	2,953346557	-1,108662625
102	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	2,988204007	-1,108662625
103	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	3,033990986	-1,108662625
104	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	3,080992118	-1,078809661
105	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	3,168844891	-1,078809661
106	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	3,227240741	-1,021651248
107	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	3,28765534	-0,994252273
108	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	3,342154841	-0,967584026
109	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	3,379633204	-0,967584026
110	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	3,426865128	-0,967584026
111	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	3,474447843	-0,94160854
112	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	3,501947285	-0,916290732
113	4,941642423	-1,203972804	1,609437912	3,546739687	-0,867500568
114	5,192956851	-1,609437912	1,609437912	0,916290732	-2,120263536
115	5,192956851	-1,609437912	1,609437912	1,609437912	-1,714798428
116	5,192956851	-1,609437912	1,609437912	2,060513532	-1,609437912
117	5,192956851	-1,609437912	1,609437912	2,302585093	-1,46967597
118	5,192956851	-1,609437912	1,609437912	2,48490665	-1,427116356
119	5,192956851	-1,609437912	1,609437912	2,724579503	-1,347073648
120	5,192956851	-1,609437912	1,609437912	2,833213344	-1,237874356
121	5,192956851	-1,609437912	1,609437912	2,944438979	-1,171182982
122	5,192956851	-1,609437912	1,609437912	3,020424886	-1,139434283
123	5,192956851	-1,609437912	1,609437912	3,101442728	-1,108662625
124	5,192956851	-1,609437912	1,609437912	3,188416617	-1,078809661
125	5,192956851	-1,609437912	1,609437912	3,271468275	-0,967584026
126	5,192956851	-1,609437912	1,609437912	3,360375387	-0,94160854
127	5,192956851	-1,609437912	1,609437912	3,401197382	-0,891598119

## ANEXO IV

Tabela dos valores logarítmicos dos dados experimentais para o aço ABNT 1045.

Observação	ln(V)	ln(f)	ln(ap)	ln(T)	ln(Vb)
1	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	0	-2,120263536
2	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	0,982078472	-1,714798428
3	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	1,300191662	-1,609437912
4	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	1,386294361	-1,560647748
5	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	1,609437912	-1,427116356
6	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	1,791759469	-1,427116356
7	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	1,945910149	-1,347073648
8	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	2,079441542	-1,30933332
9	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	2,197224577	-1,237874356
10	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	2,302585093	-1,171182982
11	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	2,397895273	-1,139434283
12	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	2,48490665	-1,049822124
13	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	2,564949357	-0,994252273
14	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	2,636912173	-0,967584026
15	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	2,708050201	-0,916290732
16	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	2,772588722	-0,867500568
17	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	0	-2,302585093
18	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	0,774727168	-2,120263536
19	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	1,098612289	-2,040220829
20	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	1,465567542	-1,897119985
21	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	1,605429891	-1,832581464
22	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	1,835776355	-1,832581464
23	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	1,928618652	-1,714798428
24	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	2,178155015	-1,714798428
25	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	2,279316466	-1,714798428
26	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	2,363680192	-1,714798428
27	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	2,466403178	-1,609437912
28	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	2,554899022	-1,514127733
29	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	2,63905733	-1,46967597
30	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	2,722610352	-1,46967597
31	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	2,793003907	-1,427116356
32	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	2,852439104	-1,427116356
33	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	2,895911938	-1,427116356
34	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	3,044046134	-1,347073648
35	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	3,121483479	-1,347073648
36	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	3,17847041	-1,272965676
37	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	3,237108593	-1,203972804
38	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	3,296207168	-1,139434283
39	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	3,341447377	-1,108662625
40	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	3,389462125	-1,049822124
41	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	3,437207819	-1,021651248
42	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	3,475995592	-0,994252273
43	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	3,51244056	-0,967584026

Observação	ln(V)	ln(f)	ln(ap)	ln(T)	ln(Vb)
44	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	3,552486829	-0,94160854
45	5,010635294	-0,916290732	1,609437912	3,608482517	-0,916290732
46	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	0,31481074	-1,966112856
47	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	0,693147181	-1,897119985
48	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	1,075002423	-1,832581464
49	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	1,340250423	-1,771956842
50	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	1,541159072	-1,714798428
51	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	1,691939134	-1,660731207
52	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	1,821318271	-1,609437912
53	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	1,916922612	-1,609437912
54	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,069391206	-1,560647748
55	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,188295947	-1,514127733
56	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,275213896	-1,514127733
57	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,38416508	-1,427116356
58	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,427454075	-1,427116356
59	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,499795262	-1,386294361
60	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,557227311	-1,347073648
61	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,624668592	-1,272965676
62	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,674148649	-1,237874356
63	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,702702595	-1,203972804
64	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,735665368	-1,171182982
65	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,798500104	-1,139434283
66	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,859339649	-1,049822124
67	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,885917408	-0,967584026
68	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,913437031	-0,867500568
69	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	0,727548607	-1,897119985
70	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	1,335001067	-1,514127733
71	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	1,652497402	-1,386294361
72	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	1,978239036	-1,272965676
73	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	2,140066163	-1,237874356
74	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	2,329227024	-1,139434283
75	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	2,48490665	-1,108662625
76	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	2,686486023	-0,967584026
77	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	2,747270914	-0,94160854
78	5,480638923	-1,203972804	0,693147181	2,801540544	-0,867500568
79	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	0,693147181	-2,120263536
80	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	1,410986974	-1,832581464
81	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	1,726331664	-1,714798428
82	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	1,957273908	-1,714798428
83	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,197224577	-1,609437912
84	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,409644165	-1,514127733
85	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,564949357	-1,347073648
86	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,658859957	-1,30933332
87	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,706715978	-1,203972804
88	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	0,717839793	-1,966112856
89	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	1,398716881	-1,714798428

Observação	$\ln(V)$	$\ln(f)$	$\ln(ap)$	$\ln(T)$	$\ln(Vb)$
90	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	1,788420568	-1,609437912
91	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,064327904	-1,560647748
92	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,327277706	-1,514127733
93	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,48490665	-1,427116356
94	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,63905733	-1,347073648
95	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,77133794	-1,272965676
96	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,885917408	-1,139434283
97	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,917770732	-0,967584026
98	5,247024072	-0,510825624	0,693147181	2,935451343	-0,916290732
99	5,347107531	-1,609437912	0,693147181	0,703097511	-2,120263536
100	5,347107531	-1,609437912	0,693147181	1,360976553	-1,966112856
101	5,347107531	-1,609437912	0,693147181	1,735189118	-1,832581464
102	5,347107531	-1,609437912	0,693147181	1,985130862	-1,609437912
103	5,347107531	-1,609437912	0,693147181	2,242835089	-1,514127733
104	5,347107531	-1,609437912	0,693147181	2,431857429	-1,347073648
105	5,347107531	-1,609437912	0,693147181	2,571084346	-1,272965676
106	5,347107531	-1,609437912	0,693147181	2,675527009	-1,203972804
107	5,347107531	-1,609437912	0,693147181	2,834976495	-1,139434283
108	5,347107531	-1,609437912	0,693147181	2,951257783	-1,078809661
109	5,347107531	-1,609437912	0,693147181	3,028683374	-1,049822124
110	5,347107531	-1,609437912	0,693147181	3,073618812	-1,021651248

## ANEXO V

Ensaio 1 do aço ABNT 1038

Equação simples de Taylor:

$$VB=0.1344+0.0044T.$$

(V=100 m/min, f=0,3mm/volta, ap = 3mm).

T (min)	VB (mm)
2	0,1432
4	0,152
7	0,1652
9	0,174
11	0,1828
13	0,1916
15	0,2004
17	0,2092
19	0,218
21	0,2268
23	0,2356
25	0,2444
27	0,2532
29	0,262
31	0,2708
33	0,2796
35	0,2884

Ensaio 3 do aço ABNT 1038

Equação simples de Taylor:

$$VB=0.1742+0.0142T$$

(V=180 m/min, f=0,4 mm/volta, ap=3 mm)

T (min)	VB (mm)
2	0,1289
3	0,1535
5	0,2027
5,68	0,219428
6,68	0,244028
7,68	0,268628
8,68	0,293228
9,68	0,317828
10,66	0,341936
11,49	0,362354

Ensaio 2 do aço ABNT 1038

Equação simples de Taylor:

$$VB=0.1742+0.0142T$$

(V=140m/min, f=0,6 mm/volta, ap=5mm)

T (min)	VB (mm)
2	0,2026
3	0,2168
5	0,2452
7	0,2736
9	0,302
11	0,3304
12	0,3446
13,98	0,372716
16,2	0,40424
16,87	0,413754
18,19	0,432498
19,46	0,450532
20,94	0,471548

Ensaio 4 do aço ABNT 1038

Equação simples de Taylor:

$$VB=0.1827+0.0160T$$

(V=220 m/min, f=0,3 mm/volta, ap=5 mm)

T (min)	VB (mm)
2	0,2147
4	0,2467
5	0,2627
5,62	0,27262
7	0,2947
8,2	0,3139
8,48	0,31838
8,88	0,32478
9,23	0,33038
9,58	0,33598
10,62	0,35262
11,53	0,36718
12,83	0,38798
13,83	0,40398
14,86	0,42046

## Continuação do ANEXO V

Ensaio 5 do aço ABNT 1038

Equação simples de Taylor:

$$VB=0.1504+0.0076T$$

(V=140 m/min, f=0,5 mm/volta, ap=1,5 mm).

T (min)	VB (mm)
1	0,158
2	0,1656
3,97	0,180572
5,88	0,195088
8	0,2112
9,58	0,223208
12	0,2416
13,18	0,250568
15	0,2644
16,72	0,277472
18,5	0,291
20,17	0,303692
22	0,3176
22,55	0,32178
24,25	0,3347
25,9	0,34724
27,55	0,35978
29,13	0,371788
30,75	0,3841
32,35	0,39626
35	0,4164
36,52	0,427952
38,05	0,43958
39,65	0,45174

Ensaio 7 do aço ABNT 1038

Equação simples de Taylor:

$$VB=0.1233+0.0092T$$

(V=140 m/min, f=0,3 mm/volta, ap=5 mm).

T (min)	VB (mm)
0,92	0,131764
2,67	0,147864
3,92	0,159364
5,08	0,170036
6,35	0,18172
7,28	0,190276
8,3	0,19966
9,45	0,21024
10,53	0,220176
12,98	0,242716
15,1	0,26222
16,85	0,27832
18,25	0,2912
19,17	0,299664
19,85	0,30592
20,78	0,314476
21,78	0,323676
23,78	0,342076
25,21	0,355232
26,78	0,369676
28,28	0,383476
29,36	0,393412
30,78	0,406476
32,28	0,420276
33,18	0,428556
34,7	0,44254

Ensaio 6 do aço ABNT 1038

Equação simples de Taylor:

$$VB=0.1262+0.0068T$$

(V=100 m/min, f=0,6 mm/volta, ap=5 mm).

T (min)	VB (mm)
2	0,1398
3,12	0,147416
5	0,1602
8	0,1806
11,12	0,201816
13,32	0,216776
15,17	0,229356
18,84	0,254312

Ensaio 8 do aço ABNT 1038

Equação simples de Taylor:

$$VB=0.1210+0.0096T$$

(V=180 m/min, f=0,2 mm/volta, ap=5 mm).

T (min)	VB (mm)
2,5	0,145
5	0,169
7,85	0,19636
10	0,217
12	0,2362
15,25	0,2674
17	0,2842
19	0,3034
20,5	0,3178
22,23	0,334408
24,25	0,3538
26,35	0,37396
28,8	0,39748
30	0,409

## ANEXO VI

Ensaio 1 do Aço ABNT 1045

Equação simples de Taylor:

$$VB = 0,1281 + 0,0183T$$

T (min)	VB (mm)
1	0,1464
2,67	0,176961
3,67	0,195261
4	0,2013
5	0,2196
6	0,2379
7	0,2562
8	0,2745
9	0,2928
10	0,3111
11	0,3294
12	0,3477
13	0,366
13,97	0,383751
15	0,4026
16	0,4209

Ensaio 2 do Aço ABNT 1045

Equação simples de Taylor:

$$VB = 0,1072 + 0,0079T$$

T (min)	VB (mm)
1,00	0,1151
2,17	0,124343
3,00	0,1309
4,33	0,141407
4,98	0,146542
6,27	0,156733
6,88	0,161552
8,83	0,176957
9,77	0,184383
10,63	0,191177
11,78	0,200262
12,87	0,208873
14,00	0,2178
15,22	0,227438
16,33	0,236207
17,33	0,244107
18,10	0,25019
20,99	0,273021
22,68	0,286372
24,01	0,296879
25,46	0,308334
27,01	0,320579
28,26	0,330454
29,65	0,341435
31,10	0,35289
32,33	0,362607
33,53	0,372087
34,90	0,38291
36,91	0,398789

Ensaio 3 do Aço ABNT 1045

Equação simples de Taylor:

$$VB = 0,1098 + 0,0134T$$

T (min)	VB (mm)
1,37	0,128158
2	0,1366
2,93	0,149062
3,82	0,160988
4,67	0,172378
5,43	0,182562
6,18	0,192612
6,8	0,20092
7,92	0,215928
8,92	0,229328
9,73	0,240182
10,85	0,25519
11,33	0,261622
12,18	0,273012
12,9	0,28266
13,8	0,29472
14,5	0,3041
14,92	0,309728
15,42	0,316428
16,42	0,329828
17,45	0,34363
17,92	0,349928
18,42	0,356628

Ensaio 4 do Aço ABNT 1045

Equação simples de Taylor:

$$VB = 0,1487 + 0,0161T$$

T (min)	VB (mm)
2,07	0,182027
3,80	0,20988
5,22	0,232742
7,23	0,265103
8,50	0,28555
10,27	0,314047
12,00	0,3419
14,68	0,385048
15,60	0,39986
16,47	0,413867

## Continuação (ANEXO VI)

Ensaio 5 do Aço ABNT 1045

Equação simples de Taylor:

$$VB = 0,1006 + 0,013T$$

T (min)	VB (mm)
2,00	0,1266
4,10	0,1539
5,62	0,17366
7,08	0,19264
9,00	0,2176
11,13	0,24529
13,00	0,2696
14,28	0,28624
14,98	0,29534

Ensaio 5-1 do Aço ABNT 1045

Equação simples de Taylor:

$$VB = 0,1006 + 0,013T$$

T (min)	VB (mm)
2,05	0,12725
4,05	0,15325
5,98	0,17834
7,88	0,20304
10,25	0,23385
12	0,2566
14	0,2826
15,98	0,30834
17,92	0,33356
18,5	0,3411
18,83	0,34539

Ensaio 6 do Aço ABNT 1045

Equação simples de Taylor:

$$VB = 0,1008 + 0,0126T$$

T (min)	VB (mm)
2,02	0,126252
3,90	0,14994
5,67	0,172242
7,28	0,192528
9,42	0,219492
11,38	0,244188
13,08	0,265608
14,52	0,283752
17,03	0,315378
19,13	0,341838
20,67	0,361242
21,62	0,373212

## ANEXO VII

Ensaio 1 do aço ABNT 1038

Equação de Taylor expandida modificada:

T (min)	VB (mm)
2	0,089146172
4	0,117849427
7	0,147638254
9	0,163362126
11	0,177111497
13	0,189436171
15	0,200673427
17	0,211047251
19	0,220715073
21	0,229792383
23	0,238366774
25	0,246506491
27	0,254265892
29	0,261689075
31	0,268812384
33	0,275666176
35	0,282276107

Ensaio 3 do aço ABNT 1038

Equação de Taylor expandida modificada:

T (min)	VB (mm)
2	0,159943496
3	0,188312233
5	0,231322046
5,68	0,264888305
6,68	0,293099625
7,68	0,31776835
8,68	0,329100159
9,68	0,349975419
10,66	0,371375715
11,49	0,377486172

Ensaio 2 do aço ABNT 1038

Equação de Taylor expandida modificada:

T (min)	VB (mm)
2	0,152046803
3	0,179014926
5	0,219901268
7	0,231488056
9	0,247109814
11	0,261389102
12	0,274596126
13,98	0,286922443
16,2	0,298284262
16,87	0,307427978
18,19	0,152046803
19,46	0,179014926
20,94	0,219901268

Ensaio 4 do aço ABNT 1038

Equação de Taylor expandida modificada:

T (min)	VB (mm)
2	0,178853899
4	0,236441219
5	0,258671661
5,62	0,271139285
7	0,296206519
8,2	0,315694103
8,48	0,319991647
8,88	0,325986438
9,23	0,331100897
9,58	0,336100782
10,62	0,350343428
11,53	0,362136495
12,83	0,378056323
13,83	0,389657216
14,86	0,401093484

## Continuação (ANEXO VII)

Ensaio 5 do aço ABNT 1038

Equação de Taylor expandida modificada:

T (min)	VB (mm)
1	0,100402753
2	0,132730399
3,97	0,174935744
5,88	0,204915056
8	0,231963663
9,58	0,249425878
12	0,273106419
13,18	0,283619153
15	0,29878416
16,72	0,312135286
18,5	0,325114002
20,17	0,336628347
22	0,348609512
22,55	0,352093278
24,25	0,362550942
25,9	0,372290055
27,55	0,381665223
29,13	0,390333237
30,75	0,398933814
32,35	0,407166458
35	0,420282997
36,52	0,427540007
38,05	0,43466477
39,65	0,441934751

Ensaio 6 do aço ABNT 1038

Equação de Taylor expandida modificada:

T (min)	VB (mm)
2	0,114581061
3,12	0,137051602
5	0,165715557
8	0,200245331
11,12	0,228641183
13,32	0,245881533
15,17	0,259102112
18,84	0,282724301

Ensaio 7 do aço ABNT 1038

Equação de Taylor expandida modificada:

T (min)	VB (mm)
0,92	0,089463617
2,67	0,137399508
3,92	0,160378222
5,08	0,178024761
6,35	0,194762829
7,28	0,205782956
8,3	0,216941102
9,45	0,228578555
10,53	0,238759686
12,98	0,259743575
15,1	0,276059763
16,85	0,28852329
18,25	0,297947435
19,17	0,303907221
19,85	0,308203277
20,78	0,313938771
21,78	0,319937392
23,78	0,33145884
25,21	0,339345801
26,78	0,347702979
28,28	0,355418354
29,36	0,360823202
30,78	0,36775185
32,28	0,374866495
33,18	0,379040846
34,7	0,385939983

Ensaio 8 do aço ABNT 1038

Equação de Taylor expandida modificada:

T (min)	VB (mm)
2,5	0,145531012
5	0,192389041
7,85	0,230711435
10	0,254334402
12	0,273710461
15,25	0,301444854
17	0,31492482
19	0,32935115
20,5	0,339584914
22,23	0,350846889
24,25	0,363352814
26,35	0,375710614
28,8	0,389405843
30	0,395860198

## ANEXO VIII

Ensaio 1 do Aço ABNT 1045

Equação de Taylor expandida modificada:

T (min)	VB (mm)
1	0,120038079
2,67	0,181455363
3,67	0,207442243
4	0,215095021
5	0,236267711
6	0,255105117
7	0,27219894
8	0,287929405
9	0,302557542
10	0,316271483
11	0,329211983
12	0,341487516
13	0,353183719
13,97	0,364040847
15	0,37510154
16	0,385426597

Ensaio 2 do Aço ABNT 1045

Equação de Taylor expandida modificada:

T (min)	VB (mm)
1,00	0,078009651
2,17	0,10807139
3,00	0,123849087
4,33	0,144525636
4,98	0,153285581
6,27	0,168885155
6,88	0,175612785
8,83	0,195053068
9,77	0,203534279
10,63	0,210888533
11,78	0,220202921
12,87	0,228556471
14,00	0,23679438
15,22	0,245266739
16,33	0,252639559
17,33	0,259036928
18,10	0,263818517
20,99	0,280784526
22,68	0,290083447
24,01	0,297122754
25,46	0,304544389
27,01	0,312211876
28,26	0,318211565
29,65	0,324705375
31,10	0,3312942
32,33	0,336745149
33,53	0,341948555
34,90	0,347758895
36,91	0,35604926

Ensaio 3 do Aço ABNT 1045

Equação de Taylor expandida modificada:

T (min)	VB (mm)
1,37	0,106971128
2	0,125429095
2,93	0,147289904
3,82	0,164679883
4,67	0,179205644
5,43	0,190942693
6,18	0,201624782
6,8	0,209900398
7,92	0,22380674
8,92	0,235288168
9,73	0,244051912
10,85	0,255499687
11,33	0,260195856
12,18	0,268237168
12,9	0,274797802
13,8	0,282706957
14,5	0,288654122
14,92	0,292142874
15,42	0,296222769
16,42	0,304158491
17,45	0,31204475
17,92	0,315553728
18,42	0,319228643

Ensaio 4 do Aço ABNT 1045

Equação de Taylor expandida modificada:

T (min)	VB (mm)
2,07	0,16302744
3,80	0,21050275
5,22	0,24058716
7,23	0,27592671
8,50	0,29536816
10,27	0,31983663
12,00	0,34148752
14,68	0,37171366
15,60	0,38134273
16,47	0,39015027

## Continuação (ANEXO VIII)

Ensaio 5 do Aço ABNT 1045

Equação de Taylor expandida modificada:

T (min)	VB (mm)
2,00	0,125429095
4,10	0,16965471
5,62	0,193725788
7,08	0,213494392
9,00	0,236173724
11,13	0,258253402
13,00	0,275692067
14,28	0,286803291
14,98	0,292636602

Ensaio 5-1 do Aço ABNT 1045

Equação de Taylor expandida modificada:

T (min)	VB (mm)
2,05	0,126739
4,05	0,168781
5,98	0,198853
7,88	0,22333
10,25	0,249457
12	0,266562
14	0,284424
15,98	0,300702
17,92	0,315554
18,5	0,319811
18,83	0,322199

Ensaio 6 do Aço ABNT 1045

Equação de Taylor expandida modificada:

T (min)	VB (mm)
2,02	0,122155667
3,90	0,161110888
5,67	0,188583229
7,28	0,209495065
9,42	0,23348712
11,38	0,252814588
13,08	0,268066434
14,52	0,280108814
17,03	0,299545128
19,13	0,314564578
20,67	0,324980607
21,62	0,331183198