

## DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DO PLANO DE CISALHAMENTO NO CORTE ORTOGONAL

### **Fernando Araujo Hofmeister**

CEFET/RJ, Centro Federal de Educação Tecnológica – Celso Suckow da Fonseca  
Av. Maracanã, 229 – Rio de Janeiro/RJ  
CEP 20271-110  
fahofmeister@yahoo.com.br

### **Daniel Gatto de Oliveira**

CEFET/RJ, Centro Federal de Educação Tecnológica – Celso Suckow da Fonseca  
danielgatt@ig.com.br

### **Jose Paulo Vogel**

CEFET/RJ, Centro Federal de Educação Tecnológica – Celso Suckow da Fonseca  
vogel@cefet-rj.br

### **Anna Carla Araujo**

CEFET/RJ, Centro Federal de Educação Tecnológica – Celso Suckow da Fonseca  
annaaraujo@cefet-rj.br

**Resumo:** *O propósito deste trabalho é determinar experimentalmente o plano de cisalhamento, possibilitando um método de determinação de forças envolvidas no corte. Sendo um método semi-empírico, utiliza principalmente as propriedades físicas dos materiais. A determinação do plano de cisalhamento é realizada experimentalmente usando um corpo de prova com dimensões controladas, o cavaco proveniente desta operação aferido e os resultados inseridos na modelagem analítica de Merchant.*

**Palavras-chave:** plano de cisalhamento, mecânica do corte ortogonal, usinagem.

## 1. INTRODUÇÃO

A determinação de forças presentes em um processo de usinagem é um assunto muito complexo e ainda pouco conclusivo. As fórmulas utilizadas na indústria partem de modelagens empíricas para determinação de forças de corte, fazendo com que cada variável da fórmula esteja associado a um valor experimental, muitas vezes não relacionado diretamente com as propriedades físicas do material da peça e da ferramenta. Isto faz com que para cada método diferente de determinação anexe muitas tabelas e informações adicionais.

Todavia, percebe-se um aumento nos métodos analíticos e numéricos de determinação das forças de corte. Estes métodos baseiam-se na análise física das interações peça-ferramenta. Os modelos analíticos tomam como base as propriedades físicas da ferramenta e da peça e os modelos numéricos utilizam métodos numéricos para resolução do problema de plasticidade, ainda longe de determinar com assertividade os fenômenos físicos que ocorrem.

Existem ainda métodos semiempíricos, que se baseiam em análises suportadas por experimentos. Estes métodos são mais confiáveis, apesar de ainda estarem em fase de desenvolvimento. Através deles é possível utilizar análises física e obter resultados confiáveis experimentalmente. Um dos métodos mais utilizados parte da mecânica do corte ortogonal, que é um modelo analítico, e insere variáveis experimentais.

A mecânica do corte ortogonal resume as interações de corte em duas forças ortogonais pertencentes ao plano que contem a velocidade de avanço e a velocidade de escoamento do cavaco. Podem ser escritas no referencial do plano de cisalhamento, pelas forças de cisalhamento e a força normal ao cisalhamento. A força de cisalhamento é a força que deforma o material plasticamente. Atua no plano de cisalhamento e é parte fundamental da determinação das forças de corte presentes.

Determinando precisamente o plano de cisalhamento, e tendo experimentalmente os valores da espessura de corte e espessura do cavaco, é possível determinar as forças na interação peça-ferramenta.

## 2. MODELAGEM DO TORNEAMENTO EM CORTE ORTOGONAL

A modelagem do processo de torneamento na interação peça-ferramenta pode ser resumida em corte ortogonal. A força resultante, ou de usinagem ( $F_u$ ), do processo pode ser representada por duas forças, a força na direção de corte ( $F_c$ ) e a força normal a direção de corte ( $F_f$ ), como é visto na Figura 1.

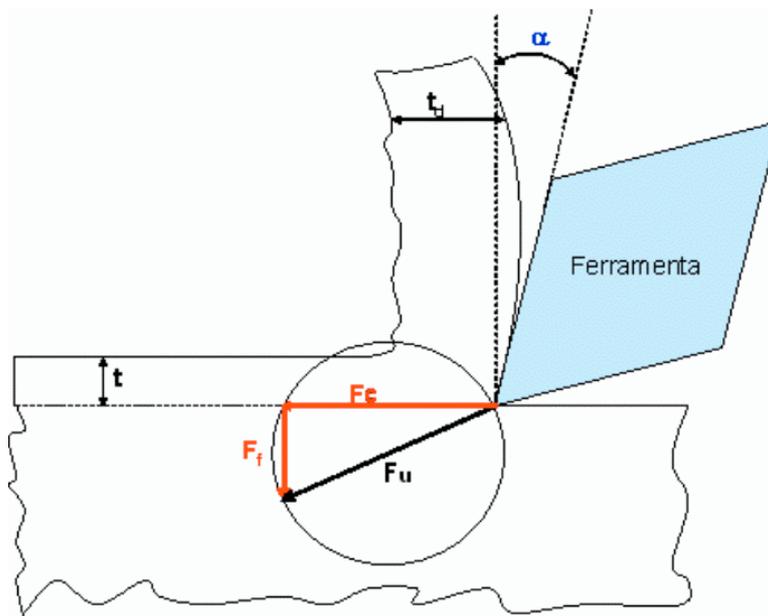


Figura 1: Modelagem do corte com força de corte e força de avanço.

Entretanto, sabe-se, pelo estudo do cavaco, que existe uma força que deforma o cavaco plasticamente. Essa força, chamada de força de cisalhamento ( $F_s$ ), se encontra no plano de cisalhamento. Para ficar equivalente à resultante, existe uma componente normal à ela, chamada de força de cisalhamento normal ( $F_{sN}$ ). O ângulo  $\alpha$  é inerente a geometria da ferramenta e é chamado de ângulo de saída. (Figura 2)

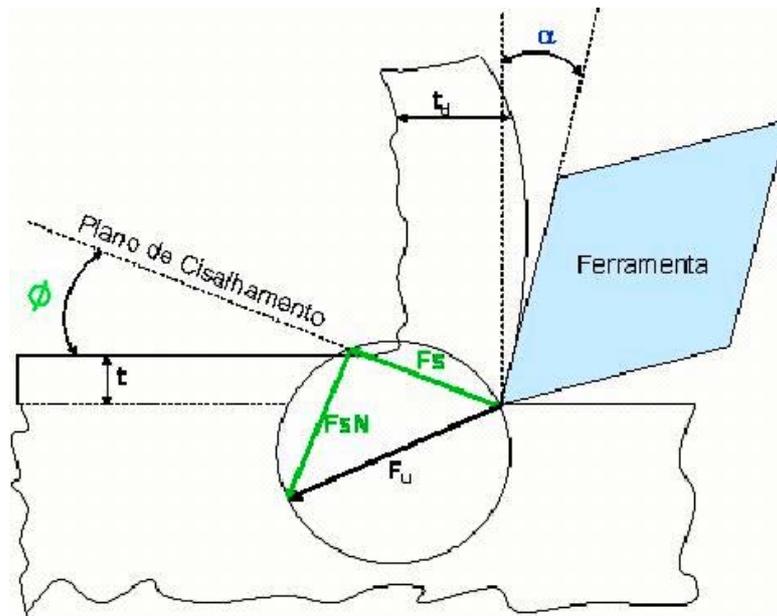


Figura 2: Modelagem do corte com força de cisalhamento e força de cisalhamento normal.

E ainda podem-se isolar as forças que atuam na superfície de saída da ferramenta (Figura 3). Logo se verifica que existe uma força de atrito ( $F_{at}$ ) na superfície de saída, e uma força de atrito normal ( $F_{atN}$ ), que é responsável por escoar o cavaco. O ângulo  $\beta$  representa a relação geométrica entre estas duas componentes da força.

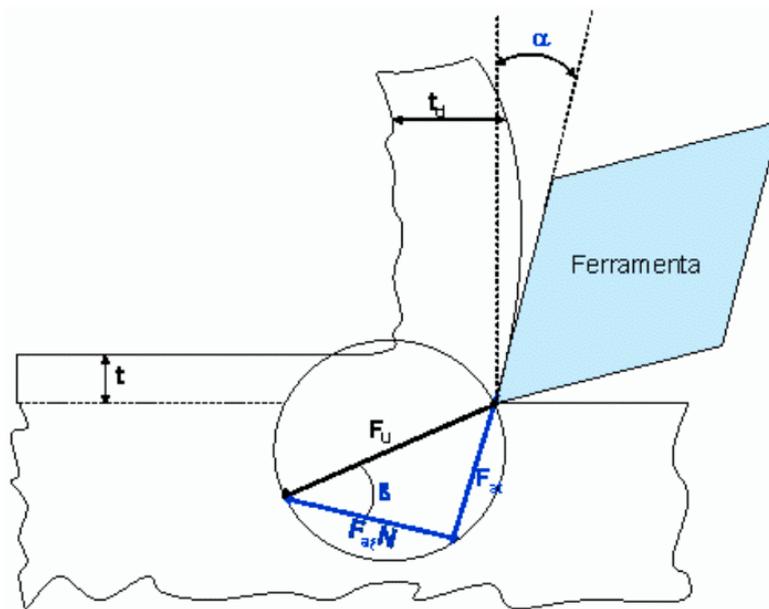


Figura 3: Modelagem de corte com força de atrito e força de atrito normal.

Por fim, colocando todas as forças no Círculo de Merchant, podemos obter facilmente as relações existentes entre elas, como pode ser observado na Figura 4.

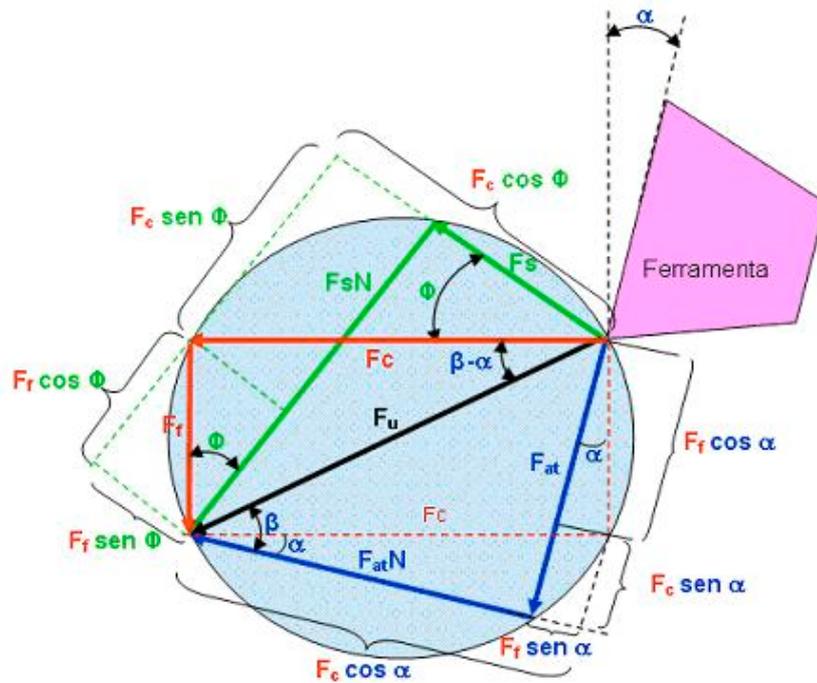


Figura 4: Círculo de Merchant com todas as forças atuantes no corte.

Assim pode-se escrever a relação entre a espessura do cavaco deformado  $t_d$  e do cavaco indeformado  $t$ .

$$r_a = \frac{t}{t_d} \quad (1)$$

E equacionar analiticamente o ângulo  $\phi$  em função de  $\alpha$  e  $r_a$ .

$$\tan \phi = \frac{r_a \cos \alpha}{1 - \sin \alpha} \quad (2)$$

A força de cisalhamento é escrita por:

$$F_s = \tau_s \cdot \frac{A}{\sin \phi} \quad (3)$$

e a força de usinagem por:

$$F_u = \frac{F_s}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (4)$$

A força  $F_c$ , na direção da velocidade de corte:

$$F_c = F_u \cdot \cos(\beta - \alpha) \quad (5)$$

Utilizando o método da mínima energia temos:

$$\beta = \frac{\pi}{2} + \alpha - 2\phi \quad (6)$$

### 3. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Foi realizado um torneamento cilíndrico externo em um corpo de prova com dimensões previamente determinadas e a seção de corte foi controlada para desenvolvimento do experimento.

#### 3.1 Maquinário

O maquinário utilizado foi um torno CNC modelo *Centur 30D* – ROMI MACH 9 observado na Figura 5.



Figura 5: Torno CNC utilizado para o experimento.

#### 3.2 Ferramenta

A ferramenta utilizada foi uma pastilha triangular de metal duro da Sandvik (Figura 6). O código do fabricante é TNMG 16 04 04 – PM P25 K20 4025. Mais detalhes nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Dimensões da pastilha.

Raio de Ponta	0,4 mm
Ângulo de Folga	0°
Ângulo de Saída ( $\alpha$ )	5°

$\alpha$  possui este valor devido à pequena espessura de corte.

Tabela 2: Propriedades de corte da pastilha.

f, avanço (mm/rot)	Vc, velocidade de corte (m/min)
0,1	475
0,4	325
0,8	225



Figura 6: Pastilha utilizada no experimento.

### 3.3 Corpo de Prova

O corpo de prova usinado foi um cilindro circular reto, de aço-carbono 1020. Os detalhes quanto às medidas podem ser observados na Figura 7 e na tabela 3.

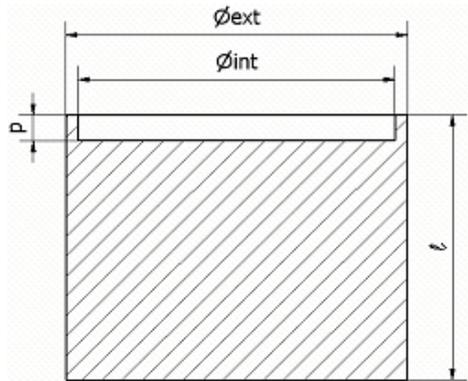


Figura 7: Vista em corte do corpo de prova.

Tabela 3: Dimensões do corpo de prova.

$\varnothing_{ext}$	37,98 mm
$\varnothing_{int}$	35,24 mm
$p$	2,92 mm
$R_{ext} - R_{int}$	1,37 mm

## 4. PROCESSO EXPERIMENTAL

A Figura 8 mostra uma foto do início do experimento, enquanto a figura 9 é uma modelagem 3D para melhor visualizar o que acontece.

Para a usinagem do corpo de prova foram escolhidos os mesmos parâmetros de avanço de Gorczyca (1987) para ter valores comparativos após o experimento. O avanço escolhido foi de 0,15 mm/rot. A peça foi submetida a duas fases de torneamento cilíndrico externo, sob mesmas condições.

O cavaco proveniente de cada fase foi retirado, separado e aferido, possibilitando assim uma melhor precisão nos resultados (Figura 10). Estes resultados foram inseridos nas fórmulas (1), (2), (3), (4), (5) e (6) para o cálculo das variáveis de corte.



Figura 8: Preparação para a usinagem.

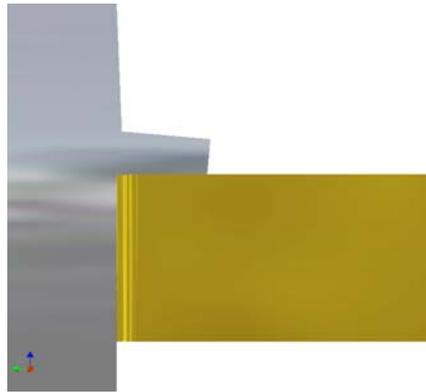


Figura 9: Plano ortogonal.

## 5. RESULTADOS

Os resultados encontrados foram listados na tabela 4.

Tabela 4: Resultados experimentais.

	Amostra 1	Amostra 2
Espessura 1 (t)	0,15 mm	0,15 mm
Espessura 2 (t <sub>d</sub> )	1,22 mm	1,19 mm
Razão entre espessuras (t/t <sub>d</sub> )	0,12	0,13
Ângulo do plano de cisalhamento (φ)	7,64°	7,83°



Figura 10: Cavaco do experimento.

No final do processo a peça apresentou uma rebarba considerável (Figura 11) que sugere que a relação do cavaco deformado e indeformado realmente deve ser alta, como mostrou o resultado experimental.



Figura 11: Rebarba ao final do experimento.

Através do plano de cisalhamento e da tensão de cisalhamento do material, torna-se possível o cálculo das forças envolvidas no corte. A tensão de cisalhamento foi calculada de acordo com a equação 7. Os resultados obtidos seguem na tabela 5.

$$\tau_s = \frac{\sigma_{ESCOAMENTO}}{\sqrt{3}} = \frac{210[MPa]}{\sqrt{3}} \cong 121,2[MPa] \quad (7)$$

Tabela 5: Resultados Analíticos

	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>
Ângulo $\beta$	79,72°	79,34°
Força de Cisalhamento ( $F_s$ )	1523 N	1450 N
Força normal ao plano de cisalhamento ( $F_{sN}$ )	<b>11358 N</b>	<b>10554 N</b>
Força na direção de corte ( $F_c$ )	3020 N	2873 N
Força normal a direção de corte ( $F_f$ )	<b>11055 N</b>	<b>10251 N</b>
Força normal ( $F_{atN}$ )	2045 N	1970 N
Força de atrito na superfície da ferramenta ( $F_{at}$ )	<b>11276 N</b>	<b>10462 N</b>
<b>Força de Usinagem (<math>F_U</math>) – Força total</b>	<b>11460 N</b>	<b>10646 N</b>

Através dos resultados obtidos no experimento é possível observar, que o enorme valor encontrado para a Força de Usinagem nas duas amostras, se deve aos grandes esforços de atrito entre o cavaco e a superfície da ferramenta, gerados pela utilização de um pequeno ângulo de cisalhamento ( $\phi$ ) e conseqüentemente um grande ângulo de atrito ( $\beta$ ).

## 6. CONCLUSÕES

O objeto central de estudo, o plano de cisalhamento é modelado de forma bastante participativa. Dentro desta fronteira estabelecida, o trabalho pode calcular a partir de dados experimentais a posição do plano de cisalhamento e comparar com o valor obtido analiticamente.

Em um próximo passo, a aquisição experimental das forças validaria o modelo analítico de forças de corte incluindo o valor do ângulo de cisalhamento obtido pelo procedimento detalhado neste trabalho.

## 7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos Professores Ézio, Milton e Cesar Ouro, por terem possibilitado o uso do laboratório de CNC para o experimento durante as aulas de Modelagem do Processo de Usinagem no CEFET-RJ. Ao Prof. Luis Roberto por ter permitido utilizar o laboratório de metrologia. Ao Prof. Etienne Beirão pela colaboração ao trabalho. Ao Prof. Jose Paulo Vogel pela orientação de iniciação científica. E à Prof. Anna Carla por norteado este trabalho.

## 8. REFERÊNCIAS

- Gorczyca, Fryderyk E., 1987, “Application of Metal Cutting Theory”, Industrial Press Inc.  
 Ferraresi, Dino, 1978, “Fundamento da Usinagem dos Metais”, Editora Edgard Blücher Ltda.  
 Helman, H. e Cetlin, P.R., 1993, “Conformação mecânica dos metais”, Editora Fundação Christiano Ottoni.  
 Brown, R. H. e Armarego, R. J. A., 1969, “The Machining of Metals”, Prentice-hall.

## **DETERMINING THE SHEAR PLANE ANGLE AT ORTHOGONAL CUTTING**

### **Fernando Araujo Hofmeister**

CEFET/RJ, Centro Federal de Educação Tecnológica – Celso Suckow da Fonseca  
Av. Maracanã, 229 – Rio de Janeiro/RJ  
CEP 20271-110  
fahofmeister@yahoo.com.br

### **Daniel Gatto de Oliveira**

CEFET/RJ, Centro Federal de Educação Tecnológica – Celso Suckow da Fonseca  
danielgatt@ig.com.br

### **Jose Paulo Vogel**

CEFET/RJ, Centro Federal de Educação Tecnológica – Celso Suckow da Fonseca  
vogel@cefet-rj.br

### **Anna Carla Araujo**

CEFET/RJ, Centro Federal de Educação Tecnológica – Celso Suckow da Fonseca  
annaaraujo@cefet-rj.br

**Abstract:** *The work purpose is to determine the shear plane experimentally, providing a methodology to determine the forces involved on cutting. This method is based on the material's physical properties and experimental results. The determination of the shear plane happened through experimental procedures, on which a work piece with known dimensions was cut. The chip obtained was measured and the values were inserted on the methods. Through them was possible to determine the shear plane on the Merchant's circle.*

**Keywords:** *shear angle, orthogonal cutting, machining.*