

**DANIEL FERNANDES DA CUNHA**

**Influência do Teor de Silício na Usinabilidade  
da Liga de Alumínio 6351 - Avaliada Através de  
Força de Corte e Acabamento Superficial**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2012

**DANIEL FERNANDES DA CUNHA**

**Influência do Teor de Silício na Usinabilidade  
da Liga de Alumínio 6351 - Avaliada Através de  
Força de Corte e Acabamento Superficial**

**Dissertação** apresentada ao programa  
de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal de Uberlândia, como  
parte dos requisitos para obtenção do título de  
**Mestre em Engenharia Mecânica.**

Área de concentração: Materiais e  
Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

Uberlândia - MG

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

---

C972i Cunha, Daniel Fernandes da, 1985-  
Influência do teor de silício na usinabilidade da liga de alumínio  
6351 – avaliada através de força de corte e acabamento superficial /  
Daniel Fernandes da Cunha. - 2012.  
85 f. : il.

Orientador: Márcio Bacci da Silva.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Liga de alumínio - Teses. Metais - Usinabilidade - Teses. I. Silva, Márcio Bacci da, 1964- II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

---

CDU: 621

# Agradecimentos

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC – UFU) pela realização de um curso de qualidade que contribui para nosso crescimento e aperfeiçoamento pessoal e profissional.

À minha família e amigos pelo apoio e compreensão ao longo dessa experiência, afinal sem a ajuda de todos nada disso seria possível.

Aos técnicos da oficina mecânica da UFU, Reginaldo, Eurípedes e Lázaro e outros de diferentes departamentos pela colaboração e amizade durante esse tempo.

Ao meu orientador, professor Dr. Márcio Bacci da Silva e demais integrantes do grupo do LEPU que além de companheiros de pesquisa muitos se mostraram verdadeiros amigos, dentro e fora desse mesmo ambiente.

À CBA pelo material fornecido para pesquisa, especialmente aos engenheiros Ricardo do Carmo Fernandes, PhD, e Douglas Morirs Baker pelo interesse no desenvolvimento de pesquisas e pelo apoio técnico.

À CAPES pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do trabalho, CNPq e FAPEMIG pelos projetos de auxílio e interesse em desenvolvimento de pesquisa.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE SIMBOLOS.....</b>	<b>XIV</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XVI</b>
<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1 A IMPORTÂNCIA DO ALUMÍNIO NO BRASIL .....	6
2.2 PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO .....	7
2.3 LIGAS DE ALUMÍNIO.....	10
2.3.1 Nomenclatura das ligas de alumínio .....	11
2.3.2 Função dos elementos de liga .....	14
2.4 FABRICAÇÃO POR REMOÇÃO DE MATERIAL .....	16
2.4.1 Torneamento.....	17
2.4.2 Formação do cavaco .....	18
2.4.3 Formas do cavaco do alumínio .....	19
2.5 DESGASTE E VIDA DE FERRAMENTA NA USINAGEM DE ALUMÍNIO .....	20
2.6 FORÇAS DE USINAGEM.....	23
2.7 ACABAMENTO SUPERFICIAL E INTEGRIDADE DA PEÇA USINADA.....	25
2.7.1 Superfície de ligas de alumínio usinadas .....	27
2.8 USINABILIDADE .....	30
<b>CAPÍTULO III - METODOLOGIA .....</b>	<b>4</b>
3.2 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS .....	34
3.3 ENSAIOS NÃO RELACIONADOS À USINAGEM (PARA CARACTERIZAÇÃO) DOS MATERIAIS E DOS CORPOS DE PROVA .....	35
3.4 ENSAIO DE USINAGEM UTILIZANDO-SE O PLANEJAMENTO 2 <sup>3</sup> .....	37
3.4.1 Ensaio de força .....	38
3.4.2 Ensaio de rugosidade superficial .....	39
<b>CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>34</b>
4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	34
4.1.1 Ensaio de tração .....	34
4.1.2 Ensaio de dureza .....	44
4.1.3 Análise microestrutural .....	45
4.2 ENSAIOS DE FORÇA DE CORTE.....	47
4.2.1 Ensaio de força de corte a baixas velocidades de corte a seco..	52
4.2.1.1 Ensaios com baixos valores de avanço .....	52
4.2.1.2 Ensaios com altos valores de avanço .....	55

4.2.2 Ensaio de força de corte a baixas velocidades de corte com MQF .....	57
4.2.3 Ensaio de força de corte a baixas velocidades de corte com jorro .....	59
4.2.4 Ensaio de força de corte a altas velocidades de corte a seco... 60	
4.2.4.1 Ensaio de força de corte a baixas velocidades de corte com jorro .....	60
4.2.4.2 Ensaio de força de corte a altas velocidades de corte com MQF .....	62
4.2.5 Ensaio de força de corte a altas velocidades de corte com MQF .....	63
4.2.6 Ensaio de força de corte a altas velocidades de corte com jorro .....	65
4.3 ENSAIOS DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL.....	66
4.3.1 Ensaio de rugosidade a baixas velocidades de corte a seco.....	70
4.3.1.1 Ensaio de rugosidade a baixas velocidades de corte com jorro .....	70
4.3.1.2 Ensaio de rugosidade a altas velocidades de corte com MQF .....	72
4.3.2 Ensaio de rugosidade a baixas velocidades na usinagem com MQF .....	73
4.3.3 Ensaio de rugosidade a baixas velocidades de corte com jorro ..	75
4.3.4 Ensaio de rugosidade a altas velocidades de corte a seco.....	76
4.3.4.1 Ensaio de rugosidade a baixas velocidades de corte com jorro .....	76
4.3.4.2 Ensaio de rugosidade a altas velocidades de corte com MQF ..	78
4.3.5 Ensaio de rugosidade a altas velocidades de corte com MQF..	78
4.3.6 Ensaio de rugosidade a altas velocidades de corte com jorro ..	79
<b>CAPÍTULO V – CONCLUSÕES .....</b>	<b>42</b>
<b>CAPÍTULO VI – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>42</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>85</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Denominação das ligas de alumínio .....	12
Figura 2.2 - Exemplo de um torneamento. DINIZ et al (1999) - modificado.....	18
Figura 2.3 - Formação do cavaco (adaptado FERRARESI, 1977).....	19
Figura 2.4 - Desgastes de Ferramentas. DINIZ et al (1999) adaptado. .....	21
Figura 2.5 - Curva de Taylor (Jawahir et al. 1995, modificado) .....	22
Figura 2.6 - Força $F_u$ de usinagem (Ferraresi, 1977) .....	24
Figura 2.7 - Componentes da Força de usinagem no torneamento (Ferraresi, 1977) .....	25
Figura 2.8 - Comportamento da rugosidade com a velocidades de corte (Johne, 1994). .....	28
Figura 2.9 - Aresta postíça de corte (TRENT, 1963) .....	29
Figura 2.10 - Regiões da qualidade da superfície e velocidade de corte para usinagem de alumínio (Johne, 1994).....	30
Figura 3.1 - Torno CNC Multiplic 35D .....	37
Figura 3.2 - Esquema da ferramenta usada nos ensaios .....	38
Figura 3.3 - Dinamômetro KISTLER.....	39
Figura 3.4 - Equipamento para aquisição da força de corte .....	39
Figura 4.1 - Corpo de prova utilizado nos ensaios de tração.....	42
Figura 4.2 - Comparação do alongamento das amostras.....	43
Figura 4.3 - Efeito médio da variação do teor de silício no limite de resistência à tração .....	44
Figura 4.4 - Efeito médio da variação do teor de silício na dureza do material .....	45
Figura 4.5 - Microestrutura amostra 1,1% Si aumento 100x.....	46
Figura 4.6 - Microestrutura amostra 1,2% Si aumento 100x.....	46

Figura 4.7 - Microestrutura amostra 1,3% Si aumento 100x.....	47
Figura 4.8 - Sinal da força de corte adquirido .....	48
Figura 4.9 - Média dos valores de força de corte.....	48
Figura 4.10 - Força de corte versus velocidade de corte, avanço 0,2 m/volta, Ap 2mm, usinagem a seco.....	49
Figura 4.11 - Força de corte versus velocidade de corte, avanço 0,15 m/volta, Ap 2mm, usinagem a seco.....	49
Figura 4.12 - Força de corte versus velocidade de corte, avanço 0,1 m/volta, Ap 2mm, usinagem a seco.....	50
Figura 4.13 - Força de corte versus velocidade de corte, avanço 0,35 m/volta, usinagem com MQF .....	51
Figura 4.14 - Força de corte versus velocidade de corte, avanço 0,35 m/volta, usinagem com jorro.....	51
Figura 4.15 - Quantificação dos efeitos significantes na força de corte a baixas velocidade e valores de avanço na usinagem a seco .....	53
Figura 4.16 - Efeito médio da profundidade de corte na força de corte com baixos valores de avanço na usinagem a seco .....	54
Figura 4.17 - Efeito médio da variação do avanço na força de corte com baixos valores de avanço na usinagem a seco. ....	54
Figura 4.18 - Efeito médio do teor de silício na força de corte com baixos valores de avanço na usinagem a seco .....	55
Figura 4.19 - Quantificação dos efeitos significantes na força de corte a baixas velocidade e altos valores de avanço na usinagem a seco ..	55
Figura 4.20 - Efeito médio do avanço na força de corte com altos valores de avanço na usinagem a seco.....	56
Figura 4.21 - Efeito médio da velocidade de corte na força de corte com altos valores avanço na usinagem a seco.....	56
Figura 4.22 - Efeito médio do teor de silício na força de corte com altos valores de avanço na usinagem a seco .....	57
Figura 4.23 - Quantificação dos efeitos significantes na força de corte a baixas velocidade e altos valores de avanço na usinagem com MQF .....	58



Figura 4.24 - Efeito médio do teor de silício na força de corte com altos valores de avanço na usinagem com MQF.....	58
Figura 4.25 - Quantificação dos efeitos significantes na força de corte a baixas velocidade e altos valores de avanço na usinagem com jorro .....	59
Figura 4.26 - Efeito médio do teor de silício na força de corte com altos valores de avanço na usinagem com jorro .....	60
Figura 4.27 - - Estimativa de efeitos significantes na força de corte a altas velocidade de corte e baixos valores de avanço na usinagem a seco .....	61
Figura 4.28 - Superfície de resposta da $F_c$ em função do teor de silício e da profundidade de corte ( $A_p$ ) na usinagem a seco.....	61
Figura 4.29 - Superfície de resposta da $F_c$ em função do teor de silício e do avanço ( $f$ ) na usinagem a seco.....	62
Figura 4.30 - Superfície de resposta da $F_c$ em função do teor de silício e da velocidade de corte ( $V_c$ ) na usinagem a seco.....	62
Figura 4.31 - Estimativa de efeitos significantes na força de corte a altas velocidade de corte e altos valores de avanço a seco .....	63
Figura 4.32 - Estimativa de efeitos significantes na força de corte a altas velocidade de corte e altos valores de avanço na usinagem com MQF .....	64
Figura 4.33 - Superfície de resposta da $F_c$ em função do teor de silício e da velocidade de corte ( $V_c$ ) na usinagem com MQF .....	64
Figura 4.34 - Superfície de resposta da $F_c$ em função do teor de silício e do avanço ( $f$ ) na usinagem com MQF.....	65
Figura 4.35 - Estimativa de efeitos significantes na força de corte a altas velocidade de corte e altos valores de avanço na usinagem com jorro.....	66
Figura 4.36 - Rugosidade superficial versus velocidade de corte, avanço 0,2 m/volta, $A_p$ 1mm, usinagem a seco.....	67
Figura 4.37 - Rugosidade superficial versus velocidade de corte, avanço 0,2 m/volta, $A_p$ 1,5mm, usinagem a seco .....	67

Figura 4.38 - Rugosidade superficial versus velocidade de corte, avanço 0,2 m/volta, $A_p$ 2mm, usinagem a seco.....	68
Figura 4.39 - Rugosidade superficial versus velocidade de corte, avanço 0,2 m/volta, profundidade de corte 2 mm, usinagem a seco .....	69
Figura 4.40 - Rugosidade superficial versus velocidade de corte, avanço 0,2 m/volta, profundidade de corte 2 mm, fluido na forma MQF .....	69
Figura 4.41 - Rugosidade superficial versus velocidade de corte, avanço 0,2 m/volta, profundidade de corte 2 mm, fluido na forma de jorro.....	70
Figura 4.42 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a baixas velocidades de corte e baixos valores de avanço na usinagem a seco.....	71
Figura 4.43 - Efeito médio do teor de silício na rugosidade com baixas velocidades de corte, baixos valores de avanço na usinagem a seco	71
Figura 4.44 - Superfície de resposta da rugosidade em função do teor de silício e do avanço (f) na usinagem a seco .....	72
Figura 4.45 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a baixas velocidades de corte e altos valores de avanço na usinagem a seco .....	72
Figura 4.46 - Efeito médio do teor de silício na rugosidade com baixas velocidades de corte, altos valores de avanço na usinagem a seco...	73
Figura 4.47 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a baixas velocidades de corte e altos valores de avanço na usinagem com MQF.....	74
Figura 4.48 - Efeito médio do teor de silício na rugosidade com baixas velocidades de corte, altos valores de avanço na usinagem com MQF .....	74
Figura 4.49 - Superfície de resposta da rugosidade em função do teor de silício e do avanço (f) na usinagem com MQF .....	75
Figura 4.50 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a baixas velocidades de corte e altos valores de avanço na usinagem com jorro.....	76

Figura 4.51 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a altas velocidades de corte e baixos valores de avanço na usinagem a seco .....	77
Figura 4.52 - $R_q$ x velocidade de corte, $A_p$ 2 mm .....	77
Figura 4.53 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a altas velocidades de corte e altos valores de avanço na usinagem a seco.	78
Figura 4.54 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a altas velocidades de corte e altos valores de avanços na usinagem com MQF .....	79
Figura 4.55 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a altas velocidades de corte e altos valores de avanços na usinagem com jorro.....	80
Figura 4.56 - Efeito médio do teor de silício na dureza ao longo do raio da amostra. ....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Produção brasileira de alumínio primário .....	7
Tabela 2.2 - Parâmetros de consumo da alumina.....	9
Tabela 2.3 - Insumo para produção de alumínio primário .....	10
Tabela 3.1 - Composição química das amostras .....	34
Tabela 3.2 - Matriz de experimento 3 <sup>k</sup> , seco .....	35
Tabela 3.3 - Matriz de experimento 3 <sup>k</sup> , ap 2 mm .....	35
Tabela 3.4 - Dados da ferramenta de corte .....	38
Tabela 4.1 - Estricção percentual total na ruptura .....	42
Tabela 4.2 - Limite máximo de resistência à tração.....	43
Tabela 4.3 - Teste de hipótese unilateral de significância do teor de silício no limite de resistência à tração.....	44
Tabela 4.4 - Teste de hipótese influência do silício na dureza das ligas de alumínio .....	45
Tabela 4.5 - Valores de dureza ao longo do raio.....	80
Tabela 4.6 - Teste de hipótese para verificação da influência do silício ao longo do raio da amostra. ....	81

# LISTA DE SIMBOLOS

°C.....	Graus Celcius
ap.....	Profundidade de corte
APC.....	Aresta postiça de corte
CBA.....	Companhia Brasileira de Alumínio
CFC.....	Cúbica de face centrada
f.....	Avanço
Fc.....	Força de corte
Ff.....	Força de avanço
Fp.....	Força passiva
Ft.....	Força ativa
Fu.....	Força de usinagem
g/cm <sup>3</sup> .....	Gramas por centímetro cúbico
IACS.....	International Annealed Cooper Standard
mm.....	Milímetro
MPa.....	Mega-pascal
MQF.....	Mínima quantidade de fluido
MRN.....	Mineração Rio Norte S.A.
Si.....	Silício
t.....	Toneladas
V.....	Volts
VB.....	Desgaste de Flanco
Vc.....	Velocidade de corte

DA CUNHA, D. F. **Influência do Teor de Silício na Usinabilidade da Liga de Alumínio 6351 Avaliada Através da Força de Corte e Acabamento Superficial**. 2012. 86 folhas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Resumo

O objetivo deste trabalho é a verificação da influência do teor de silício na composição da liga de alumínio 6351 da empresa CBA (Compania Brasileira de Alumínio) na usinabilidade avaliada através da medição da força de corte e do acabamento superficial. Em uma primeira etapa foi analisado estatisticamente o efeito dos parâmetros de corte, profundidade de corte ( $a_p$ ), velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f$ ) e porcentagem de silício (% Si) na força de corte e rugosidade superficial durante ensaios de torneamento cilíndrico externo sem aplicação do fluido de corte. Em uma segunda etapa dos ensaios utilizou-se fluido de corte aplicado através de MQF (60l/h) e jorro, mantendo constante a profundidade de corte e variando velocidade de corte e avanço. Para cada uma das combinações de parâmetros de corte foram adquiridos valores de força de corte e rugosidade superficial com duas réplicas para cada ensaio, adotando um planejamento fatorial  $3^k$ . Análise estatística de variância (ANOVA) mostrou que a porcentagem de silício exerce influência significativa nos parâmetros de usinabilidade avaliados da liga estudada quando comparado com avanço, velocidade de corte e profundidade de corte.

Palavras chave: Usinabilidade, Força, Rugosidade, Liga de Alumínio 6351, Teor de silício.

DA CUNHA, D. F. **Influence of the Silicon Content in the Machinability of the 6351 Aluminium Alloy – Analysed through Cutting Force and Surface Finish**. 2012. 86 pages. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

### Abstract

The aim of this work is to study the effect of silicon content in the machinability of CBA's (Compania Brasileira de Aluminio) 6351 aluminum alloy measured through cutting force and surface finish. In a first moment the effect of depth of cut ( $a_p$ ), cutting speed ( $v_c$ ), feed rate ( $f$ ) and silicon content (% Si) on the machinability were investigated. The machining process used was turning operation with no cutting fluid. In a second part of the tests it was used MQF (60 l/h) and over head flood in experimental tests with constant depth of cut. For each set of parameters it was acquired values of cutting forces and surface roughness with two repetitions, adopting a  $3^k$  design of experiments. The results showed that the silicon content has significant effect in the machinability of the studied alloy compared to the others parameters investigated.

**Keywords:** Machinability, Cutting Force, Surface Roughness, 6351 Aluminum Alloy.

# **CAPÍTULO I**

## **Introdução**

As pesquisas em processos de fabricação com remoção de cavaco têm sua grande importância no fato de que estes representam a classe mais largamente empregada dentro da cadeia de fabricação de produtos mecânicos no mundo moderno industrializado. O seu impacto econômico é bastante significativo, uma vez que representam mais de 15% do valor total de todos os produtos industrializados, quer sejam ou não mecânicos (Merchant, 1998).

Segundo Machado e Silva (1999), a usinagem transforma em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais e emprega dezenas de milhares de pessoas. A demanda por pesquisas nesta área surge em razão dos desafios enfrentados pelas indústrias quanto à produtividade, qualidade, flexibilidade e compatibilidade com o meio ambiente.

O aumento de produtividade de ligas a serem usinadas não é responsabilidade somente das empresas de fabricação do produto em si, mas também das empresas de fabricação da própria liga metálica, que nem sempre é a mesma que produz o produto final do mercado.

Atualmente em um mercado competitivo não basta uma empresa ter domínio unicamente nos processos por ela executados, existe a necessidade de conhecimento em todos os processos que envolvem a fabricação de um produto, desde a produção da liga até o produto acabado.



O alumínio vem ocupando consideravelmente o mercado por sua utilização diversificada tanto em aplicações pesadas como a construção civil, indústria automobilística, aeronáutica ou as mais simples como embalagens e revestimento de superfícies. Vários produtos passam além do processo de conformação por processos de acabamento ou fabricação.

Visando este conhecimento necessário para o mercado do atual mundo globalizado, o proposto trabalho vem verificar a influência, especificamente, do teor do elemento silício (Si) na composição das ligas de alumínio, nas forças de usinagem e acabamento superficial no processo de torneamento cilíndrico externo.

# CAPÍTULO II

## Revisão Bibliográfica

O alumínio é amplamente utilizado pela indústria de diversas maneiras. Tal versatilidade se deve às suas propriedades e excelente desempenho na maioria das aplicações. Suas técnicas de fabricação permitem a manufatura do produto acabado a preços competitivos. Cada segmento utiliza o metal na forma mais adequada às suas finalidades, de acordo com os diferenciais e propriedades de cada produto. Obviamente, as duas principais propriedades do alumínio e suas ligas, que determinam suas aplicações são a boa condutividade térmica e elétrica e a baixa relação peso/resistência mecânica. A liga de alumínio tem uma condutividade média de 62% da *International Annealed Cooper Standard* (IACS), mas, por causa de sua densidade, pode transportar mais de duas vezes mais eletricidade com um peso equivalente ao do cobre. Assim, para uma proporção muito grande de sobrecarga e alta voltagem, as linhas de energia utilizam alumínio em vez de cobre como condutor, por razões de peso. Algumas ligas de alumínio são também,

tecnicamente, uma boa alternativa para substituir o cobre em condutores elétricos, inclusive em redes domésticas. De uma maneira geral, as principais características do alumínio são

- baixo peso. O alumínio apresenta densidade -  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , aproximadamente 1/3 da densidade do aço.
- excelente condutividade elétrica e térmica (de 50 a 60% da condutividade do cobre), sendo vantajoso seu emprego em trocadores de calor, evaporadores, aquecedores, cilindros e radiadores automotivos.
- resistente à corrosão atmosférica, corrosão em meio aquoso (inclusive água salgada), óleos e diversos produtos solventes.
- ductilidade elevada (estrutura CFC) permitindo conformação de componentes com elevadas taxas de deformação.
- não é ferromagnético (característica importante para aplicações eletro-eletrônicas).
- não é tóxico e, portanto, é largamente empregado em embalagens
- a resistência mecânica do alumínio puro é baixa (aproximadamente 90 MPa), podendo sofrer diversos tratamentos de endurecimento (como endurecimento por solução sólida, dispersão de partículas, encruamento, entre outros)
- baixa temperatura de fusão ( $660^\circ\text{C}$ ), o que limita a temperatura de trabalho destas ligas.

O alumínio é utilizado em edifícios para um amplo espectro de aplicações. Estas incluem coberturas para as fábricas, janelas e revestimento de produtos com características pré-formadas, portas, marquises e fachadas de lojas e edifícios de prestígio ferragens e acessórios, bns de águas pluviais e substituição de janelas.

Estruturas de alumínio e revestimento também são usadas para remodelar muitas das estruturas de concreto construídas em 1950-1960, que agora estão mostrando sinais de deterioração.

Mais recentemente, a indústria de petróleo e gás tem empregado largamente alumínio em estruturas offshore. As ligas da série 1000, 3.000, 5.000 e 6.000 trabalham bem, sem diminuição de resistência, sem proteção, mesmo em ambientes industriais e marinhos. Eles podem, todavia, sofrer alguma deterioração em sua aparência e proteção da pintura, onde a anodização pode ser aconselhável.

Alumínio e suas ligas têm sido o principal material de construção para a indústria aeronáutica durante a maior parte de sua história. Ainda hoje, quando o uso do titânio e seus compósitos estão crescendo, 70% da fuselagem das aeronaves civis comerciais são feitas de ligas de alumínio.

A combinação de um custo aceitável, as propriedades mecânicas, integridade estrutural e facilidade de fabricação também são atraentes em outras áreas de transporte. Há agora muitos exemplos de seu uso em veículos comerciais, vagões tanto de passageiros como de carga, cascos marítimos e das superestruturas e veículos militares.

O uso bem sucedido de alumínio (ligas da série 1000) na fabricação de folhas de acondicionamento de alimentos e para embalagens se deve à sua boa resistência à corrosão e propriedades de barreira contra os raios ultravioleta, umidade e odor. As folhas podem ser facilmente formadas, e podem ser úteis combinado com papel e plástico, se necessário.

A utilização mais significativa de alumínio em embalagens foi na produção de latas de bebidas que contenham *o'ring* fácil para abrir na tampa. Este segmento cresceu rapidamente para cerca de 15% do consumo total de alumínio, cem bilhões de latas por ano. Latas de alguns produtos alimentícios, particularmente de peixes, que também utilizam as instalações de fácil abertura de alumínio, têm sido utilizados por mais de sessenta anos.

As aplicações comentadas acima, utilizam cerca de 85% do consumo total de alumínio, sendo os outros 15% gastos com cilindros de gás a alta pressão, componentes usinados, escadas e equipamentos de acesso, equipamentos

esportivos, barreiras rodoviárias e placas de sinalização, móveis domésticos e de escritório e chapas litográficas, entre outras.

## **2.1 A importância do alumínio no Brasil**

Produzido comercialmente há cerca de 150 anos, a indústria do alumínio continua em plena expansão. No total, são 46 países que produziram, em 2006, aproximadamente 34 milhões de toneladas de alumínio primário, conforme dados do *World Metal Statistics*. A China é o maior produtor mundial de alumínio primário, seguido por Rússia e Canadá, já o Brasil está na sexta colocação.

O cenário nacional ainda mostra números interessantes. Temos a terceira maior jazida de bauxita do planeta, e somos o quarto maior produtor de alumina, ocupando a quinta colocação na exportação de alumínio primário/ligas.

No mercado interno, a maior parte do alumínio e seus produtos são aplicados nos segmentos de embalagens e transportes. Na seqüência, vem os segmentos de eletricidade, construção civil, bens de consumo, máquinas e equipamentos e outros.

Segundo a ABAL, os números de maio de 2011 mostram que foi produzido no mês um total de 130,9 mil toneladas de alumínio primário, o que representa um aumento de 1,4% em relação ao mesmo mês do ano anterior. No acumulado janeiro-maio, o setor produziu 634,6 mil toneladas, volume 1,6% menor que o produzido no mesmo período em 2009. A produção brasileira de alumínio primário é mostrada na Tabela 2.1 a seguir.

Tabela 2.1 - Produção brasileira de alumínio primário

Unidade: 1000 t

Empresas	2010		2011		Variação 2011/2010 (%)	
	Outubro	Jan-Out	Outubro	Jan-Out	Outubro	Jan-Out
Albras (PA)	38,7	374,9	38,7	382,5	-	2,0
Alcoa	30,4	291,4	30,2	292,3	-0,7	0,3
Poços de Caldas (MG)	8,0	72,9	7,4	73,1	-7,5	0,3
São Luís (MA)	22,4	218,5	22,8	219,2	1,8	0,3
BHP Billiton (MA)	15,0	144,4	15,2	146,7	1,3	1,6
Novelis	7,7	76,9	3,6	39,6	-53,2	-48,5
Ouro Preto (MG)	4,1	40,4	3,6	39,6	-12,2	-2,0
Aratu (BA)	3,6	36,5	-	-	-	-
Votorantim Metais - CBA (SP)	39,9	395,0	36,8	334,7	-7,8	-15,3
<b>Total</b>	<b>131,7</b>	<b>1.282,6</b>	<b>124,5</b>	<b>1.195,8</b>	<b>-5,5</b>	<b>-6,8</b>

Fonte: ABAL – Associação Brasileira de Alumínio

## 2.2 Produção de Alumínio

A obtenção do alumínio é feita a partir da bauxita, um minério que pode ser encontrado em três principais grupos climáticos: o Mediterrâneo, o Tropical e o Subtropical. A produção mundial de bauxita em 2004 foi de 157,4 milhões de toneladas, sendo os principais países produtores Austrália, Brasil, Guiné e Jamaica. Ocupando a 2ª posição no ranking mundial, em 2004, o Brasil produziu 21 milhões de toneladas de bauxita. Possui também a terceira maior reserva mundial de bauxita, cujo potencial é da ordem de 2,5 bilhões de toneladas, concentrada principalmente na região Norte do país (estado do Pará), as quais têm como principal concessionária a empresa Mineração Rio do Norte S.A. - MRN.

A bauxita deve apresentar no mínimo 30% de alumina aproveitável para que a produção de alumínio seja economicamente viável. O processo de obtenção de alumínio primário divide-se em três etapas: **Mineração, Refinaria e Redução.**

## **Mineração**

O alumínio não é encontrado diretamente em estado metálico na crosta terrestre. Sua obtenção depende de etapas de processamento até chegar ao estado em que o vemos normalmente. O processo da mineração da bauxita, que origina o alumínio, pode ser exemplificado da seguinte maneira:

- Remoção planejada da vegetação do solo orgânico;
- Retirada das camadas superficiais do solo (argilas e lateritas);
- Beneficiamento:
  - Inicia-se na britagem, para redução de tamanho;
  - Lavagem do minério com água para reduzir, quando necessário, o teor de sílica contida na parcela mais fina;
- Secagem;

## **Refinaria**

A refinaria é a fase do processo que transforma a bauxita em alumina calcinada. O procedimento mais utilizado é o Bayer. Esta é primeira etapa até se chegar ao alumínio metálico.

- Dissolução da alumina em soda cáustica;
- Filtração da alumina para separar o material sólido;
- O filtrado é concentrado para cristalização da alumina;
- Os cristais são secados e calcinados para eliminar a água;
- O pó branco de alumina pura é enviado à redução;
- Na redução, ocorre o processo conhecido como Hall-Hérault, por meio da eletrólise, para obtenção do alumínio;

As principais fases da produção de alumina, desde a entrada do minério até a saída do produto final são: moagem, digestão, filtração/evaporação, precipitação e calcinação.

As operações de alumina têm um fluxograma de certa complexidade, que pode ser resumido em um circuito básico simples.

Além da bauxita e de combustíveis energéticos, a produção de uma tonelada de alumina requer outros insumos, cujo consumo depende da qualidade do minério, conforme mostra a Tabela 2.2

Tabela 2.2 - Parâmetros de consumo da alumina

Parâmetros de consumo da alumina	
Bauxita (t/t)	1,85 a 3,4
Cal (kg/t)	10 a 50
Soda cáustica (kg/t)	40 a 140
Vapor (t/t)	1,5 a 4,0
Óleo combustível - calcinação (kg/t)	80 a 130
Floculante sintético (g/t)	100 a 1000
Energia elétrica (kwh/t)	150 a 400
Produtividade (Hh/t)	0,5 a 3,0
Água m³/t	0,5 a 2,0

Fonte: Boletim técnico – ABAL/Produtores de alumínio primário

## Redução do Alumínio

Redução é o processo de transformação da alumina em alumínio metálico:

- A alumina é dissolvida em um banho de criolita fundida e fluoreto de alumínio em baixa tensão, decompondo-se em oxigênio;
- O oxigênio se combina com o ânodo de carbono, desprendendo-se na forma de dióxido de carbono, e em alumínio líquido, que se precipita no fundo da cuba eletrolítica;
- O metal líquido (já alumínio primário) é transferido para re-fusão através de cadinhos;
- São produzidos lingotes, as placas e os tarugos (alumínio primário).

A voltagem de cada uma das cubas, ligadas em série, varia de 4 V a 5 V, dos quais apenas 1,6 V são necessários para a eletrólise propriamente dita. A diferença de voltagem é necessária para vencer resistências do circuito e gerar calor para manter o eletrólito em fusão.



Basicamente, são necessárias cerca de 5 t de bauxita para produzir 2 t de alumina e 2 t de alumina para produzir 1 t de alumínio pelo processo de Redução.

Os principais insumos para a produção de alumínio primário durante o Processo de Redução são indicados na **Tabela 2.3** a seguir:

Tabela 2.3 - Insumo para produção de alumínio primário

<b>Insumos para a produção de alumínio primário (ano-base 2003)</b>	
Alumina	1919 kg/t Al
Energia elétrica	15,0 MWhcc/t Al
Criolita	8,0 kg/t
Fluoreto de alumínio	19,7 kg/t
Coque de petróleo	0,384 kg/kg Al
Piche	0,117 kg/kg Al
Óleo combustível	44,2 kg/t

Fonte: Boletim técnico ABAL

## 2.3 Ligas de alumínio

Comparado com outros materiais o alumínio é de fácil usinabilidade, porém considerando as diferentes ligas no mercado é necessária uma análise detalhada das características de cada tipo de liga.

Os principais elementos químicos das ligas de alumínio incluem combinações dos seguintes elementos:

- Cobre (Cu);
- Magnésio (Mg);
- Silício (Si);
- Manganês (Mn) e
- Zinco (Zn).

De acordo com o produto, as ligas de alumínio podem ser divididas em dois grupos:

- LIGAS CONFORMADAS OU TRABALHADAS (*wrought alloys*) – ligas destinadas à fabricação de produtos semi-acabados, que passarão por processos de usinagem ou conformação até atingirem o produto final, como laminados planos (placas, chapas e folhas), laminados não planos (tarugos, barras e arames) perfis extrudados e componentes forjados.
- LIGAS FUNDIDAS (*cast alloys*) – ligas destinadas a fabricação de componentes fundidos.

Somando-se as ligas conformadas e as ligas fundidas, existem mais de 600 ligas reconhecidas industrialmente.

Estes dois grupos se subdividem em:

- LIGAS NÃO TRATÁVEIS TERMICAMENTE - Não são endurecidas por meio de tratamento térmico.
- LIGAS TRATÁVEIS TERMICAMENTE – São endurecidas por meio de tratamentos térmicos.

Nas ligas de alumínio, o tratamento térmico é restrito a operações específicas utilizadas para aumentar a resistência e dureza de ligas endurecíveis por precipitação (conformadas ou fundidas). Ao se dizer que uma liga é não tratável termicamente, significa que o material pode passar pelas etapas do processo, porém o material não irá adquirir as propriedades desejadas ao término do tratamento térmico.

### 2.3.1 Nomenclatura das ligas de alumínio

Existem oito tipos de série de ligas de alumínio forjadas. Estas são designadas por um número de quatro dígitos os quais podem ser precedidos ou seguidos por letras.

Um prefixo é utilizado para designar o padrão da Associação de alumínio AA, ou EN AW para o padrão europeu, por exemplo EN AW-1050.

O primeiro dígito indica a série como mostrado na Fig. 2.1

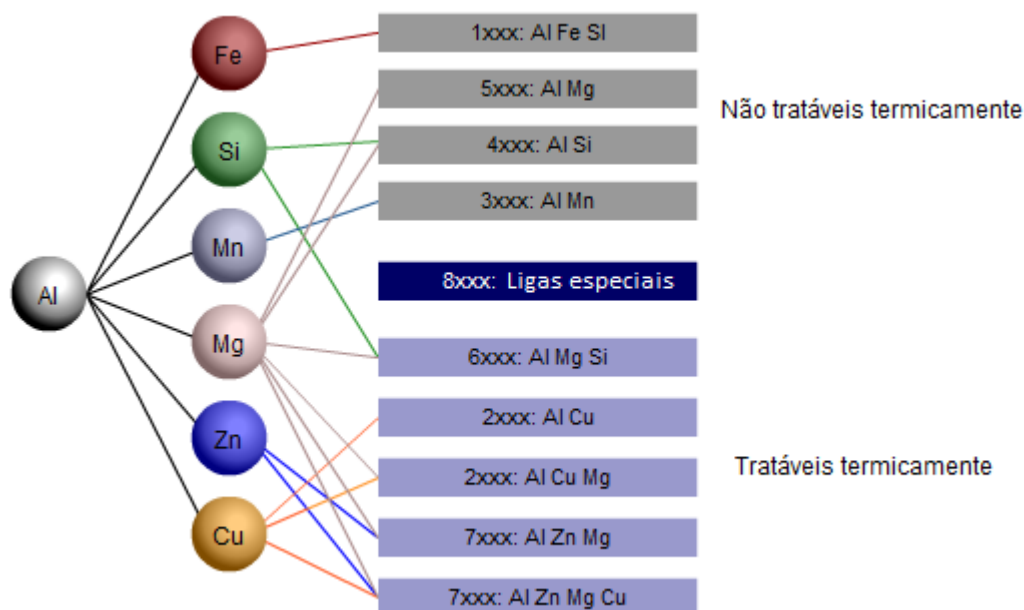


Figura 2.1 - Denominação das ligas de alumínio

Fonte: <http://aluminium.matter.org.uk>

O segundo dígito indica uma modificação na liga já existente anteriormente.

O terceiro e quarto dígitos possuem significados diferenciados, dependendo do primeiro:

Para a série 1XXX, o terceiro e quarto dígitos indicam a porcentagem de alumínio (0,XX%) maior do que 99,00%, por exemplo, Al99,80 → AA 1080.

Para as outras séries (2XXX a 7XXX) o terceiro e quarto dígitos servem apenas para diferenciar as várias ligas. Ligas da série 8XXX não possuem denominação fixa, pois são formadas por diferentes combinações de elementos ligantes. O sufixo “A” indica uma variação nacional da liga, por exemplo, EN AW-6005A.

Esta denominação também pode vir acompanhada do estado de endurecimento da liga. São utilizadas as seguintes denominações para esta indicação.

- F - como fabricado – Refere-se à condição resultante após qualquer tipo de processamento (laminação a frio, laminação a quente,

fundição, etc.) em que não foram realizados controles sobre a velocidade de resfriamento ou quantidade de encruamento empregados.

- O (oh) recozido – Nos produtos conformados, refere-se a produtos que sofreram recozimento visando a redução do limite de resistência e aumento de ductilidade. Nos produtos fundidos, indica um recozimento para alívio de tensões e estabilidade dimensional.
- H – endurecido por encruamento – Refere-se a produtos endurecidos por encruamento, podendo ou não apresentar tratamentos térmicos. O sufixo H é seguido por mais dois dígitos:
  - H1- produtos conformados que apresentam encruamento e não sofreram nenhum tratamento suplementar.
  - H2- produtos encruados e parcialmente recozidos para um determinado valor de dureza. Os dígitos seguintes a H2 indicam a quantidade de encruamento residual após o produto ser parcialmente recozido.
  - H3 – produtos encruados e envelhecidos naturalmente para um determinado valor de dureza.
- T – tratado termicamente – refere-se aos produtos que sofreram tratamentos térmicos visando aumento de resistência. O sufixo T é seguido por mais dois dígitos:
  - T1 – produtos resfriados a partir da temperatura de conformação mecânica a quente e envelhecidos naturalmente para uma condição de propriedades mecânicas estáveis.
  - T2 – produtos resfriados a partir da temperatura de conformação mecânica a quente, encruados e envelhecidos naturalmente para uma condição de propriedades mecânicas estáveis.
  - T3 – produtos solubilizados, encruados e envelhecidos naturalmente para uma condição de propriedades mecânicas estáveis.

- T4 – produtos solubilizados e envelhecidos naturalmente para uma condição de propriedades mecânicas estáveis.
- T5 - produtos resfriados a partir da temperatura de conformação mecânica a quente e envelhecidos artificialmente.
- T6 – produtos solubilizados e envelhecidos artificialmente.
- T7 - produtos solubilizados e superenvelhecidos ou estabilizados.
- T8 – produtos solubilizados, encruados e envelhecidos artificialmente.
- T9 – produtos solubilizados, envelhecidos artificialmente e encruados.
- T10 – produtos resfriados a partir da temperatura de conformação mecânica a quente, encruados e artificialmente.

### 2.3.2 Função dos elementos de liga

Os elementos de liga adicionados na composição tem funções específicas.

- **Silício** - É o elemento mais utilizado nas ligas de alumínio fundidas, causa um aumento da fluidez, reduz a concentração externa, melhora a estanqueidade (menor porosidade) no produto fundido, além de reduzir o coeficiente de expansão e melhorar a soldabilidade. Além do silício, outros importantes elementos de liga para o alumínio são:
- **Cobre** - É um dos principais elementos endurecedores em ligas de alumínio fundidas. Aumenta a resistência nas ligas tratadas e não tratadas termicamente. A solubilidade do cobre no alumínio é bastante elevada em altas temperaturas e apenas ligeiramente solúvel a temperatura ambiente. Esta característica torna a liga termicamente tratável e melhora as propriedades mecânicas.
- **Magnésio** - De modo semelhante ao cobre, tem características de solubilidade sólida que permite a liga ser tratada termicamente. O magnésio reduz a oxidação devido à afinidade com o oxigênio. De modo

geral, adições de magnésio aumentam a resistência mecânica e a ductilidade. Também melhoram a resistência à corrosão e a usinabilidade.

- **Titânio** - Nas ligas de fundição é utilizado como refinador de grão em teores variando de 0,05 a 0,20%. Também aumenta a resistência à tração e a ductilidade
- **Ferro** - Algumas vezes é adicionado para diminuir a contração. Agem como refinadores de grão, com exceção das ligas fundidas sem areia. Nas ligas fundidas sob pressão diminui a aderência ao molde. O teor de ferro deve ser controlado entre 0,15 e 1,2%.
- **Manganês** - Atua como refinador de grão para reduzir a contração. Em combinação com o ferro, o manganês deve ser controlado, pois pode haver a formação de partículas do constituinte primário, ocasionando redução na resistência.
- **Cromo** - Primeiramente é utilizado como refinador de grão. Em certas ligas como Al-Zn-Mg é utilizado para diminuir trincas de tensão e corrosão sob tensão. Pode ser utilizado para melhorar a resistência em temperaturas elevadas.
- **Níquel** - Melhora a estabilidade dimensional e aumenta a resistência em altas temperaturas.
- **Zinco** - Não deve ser utilizado em grandes quantidades, pois torna a liga frágil a quente e produz alta contração. Quando combinado com o magnésio aumenta a resistência ao impacto, melhora a resistência à tração e a ductilidade. Pequenas quantidades deste elemento melhoram a usinabilidade.

## 2.4 Fabricação por remoção de material

Um aspecto importante na seleção dos processos de fabricação é determinar as partes a serem geradas em cada processo e com qual tolerância, de modo a minimizar os custos de fabricação. As peças fabricadas por fundição, conformação ou soldagem podem, em alguns casos, ser produzidas com as dimensões finais ou próximas a final (*near net shaping*), mas normalmente estas peças precisam sofrer operações complementares para chegar às dimensões finais com a tolerância dimensional especificada. A tolerância é utilizada para garantir a funcionalidade do produto e principalmente permitir o intercâmbio das peças. De um modo geral, os processos de fundição, conformação ou soldagem não podem produzir de forma economicamente viável o produto em sua totalidade. Os processos de usinagem normalmente produzem peças com melhores tolerâncias dimensionais e geométricas. De uma forma geral, podem ser classificados em três categorias:

- Usinagem: utilizando ferramentas mono cortantes (por exemplo: torneamento) ou multi-cortantes (por exemplo: fresamento);
- Abrasivo: utiliza materiais abrasivos, por exemplo, retificação, lapidação, brunimento;
- Outros métodos de remoção de material: elétrico, químico, térmico, hidrodinâmico e laser.

Os processos de usinagem tem mais flexibilidade quando comparados aos demais processos de fabricação e ainda possuem as seguintes vantagens:

- São relativamente mais precisos que os processos de conformação e fundição;
- Podem produzir geometrias complexas que são difíceis de serem obtidas por outros processos;
- São adequados para operações posteriores aos tratamentos térmicos, para corrigir distorções causadas por estes;
- Podem gerar superfícies com padrões especiais;

Os processos de usinagem e as máquinas ferramenta são indispensáveis na moderna tecnologia de fabricação. Desde a introdução dos tornos em 1700,

muitos processos têm sido desenvolvidos. Atualmente tem-se máquina ferramentas controladas por computador e novas tecnologias utilizando energias distintas como laser, eletricidade, química, térmica e hidrodinâmica como base para a usinagem.

Os processos de fabricação podem ser modelados como um sistema composto de: peça, ferramenta e máquina. O conhecimento da interação entre estes elementos é importante para a utilização econômica da usinagem. A seguir são apresentados alguns tópicos importantes relacionados ao processo de usinagem utilizado no presente trabalho

#### 2.4.1 Torneamento

Torneamento, fresamento e furação são três principais processos de usinagem utilizados, tanto em número de operações, quanto em tempo de usinagem. O princípio de usinagem para qualquer processo é sempre o mesmo, ou seja, uma cunha cortante penetrando no material para formar o cavaco. No entanto, cada processo tem suas peculiaridades. O torneamento, por exemplo, se baseia no movimento da peça em torno do seu próprio eixo de rotação. Segundo FERRARESI (1990), é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. O torneamento é uma operação de usinagem que permite trabalhar peças cilíndricas movidas por um movimento uniforme de rotação em torno de um eixo fixo.

O torneamento, como todos os demais trabalhos executados com máquinas-ferramenta, acontece mediante a retirada progressiva do cavaco da peça a ser trabalhada. O cavaco é cortado por uma ferramenta de um só gume cortante, que deve ter uma dureza superior à do material a ser usinado. No torneamento, a ferramenta penetra na peça, cujo movimento rotativo uniforme ao redor do eixo permite o corte contínuo e regular do material. A força necessária para retirar o cavaco é feita sobre a peça, enquanto a ferramenta, firmemente presa ao porta-ferramenta, contrabalança a reação desta força. A Fig. 2.2 mostra um esquema do processo com algumas variáveis envolvidas.



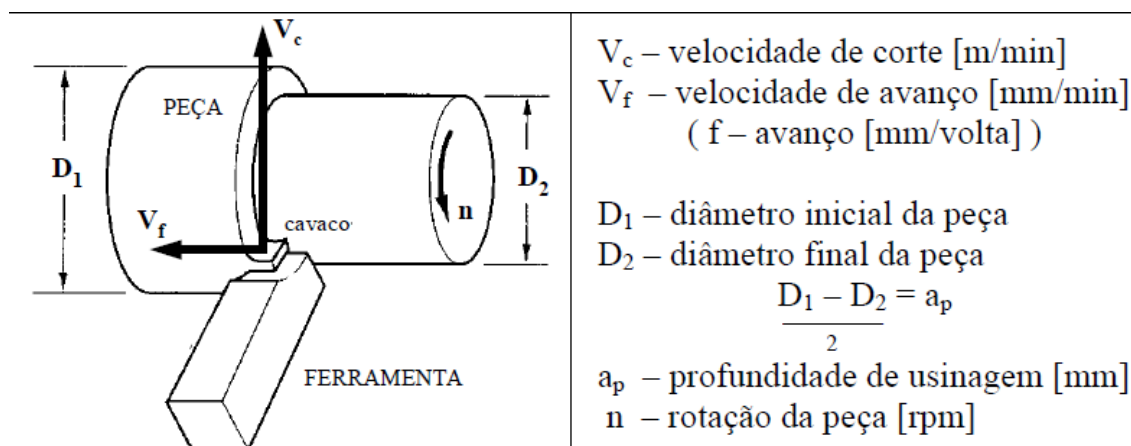


Figura 2.2 - Exemplo de um torneamento. DINIZ et al (1999) - modificado

#### 2.4.2 Formação do cavaco

A formação do cavaco, em geral, nas condições normais de usinagem com ferramentas de metal duro ou aço rápido ocorre de forma cíclica que pode ser dividida em algumas etapas.

Durante a usinagem, devido à penetração da ferramenta na peça, uma pequena porção de material é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta. O material recalcado sofre deformação plástica, que aumenta progressivamente, até que tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento entre a porção de material recalcado e a peça. Este deslizamento ocorre de acordo com os planos de cisalhamento dos cristais. Durante a usinagem, estes planos instantâneos irão definir certa região entre a peça e o cavaco, denominada região de cisalhamento. Esta região normalmente é aproximada a um plano denominado plano de cisalhamento, a direção deste plano define o ângulo de cisalhamento.

Continuando a penetração da ferramenta em relação à peça, haverá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo da ductilidade do material e das condições de usinagem. Prosseguindo, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso, em uma nova porção de material inicia-se o mesmo processo. Fig. 2.3.

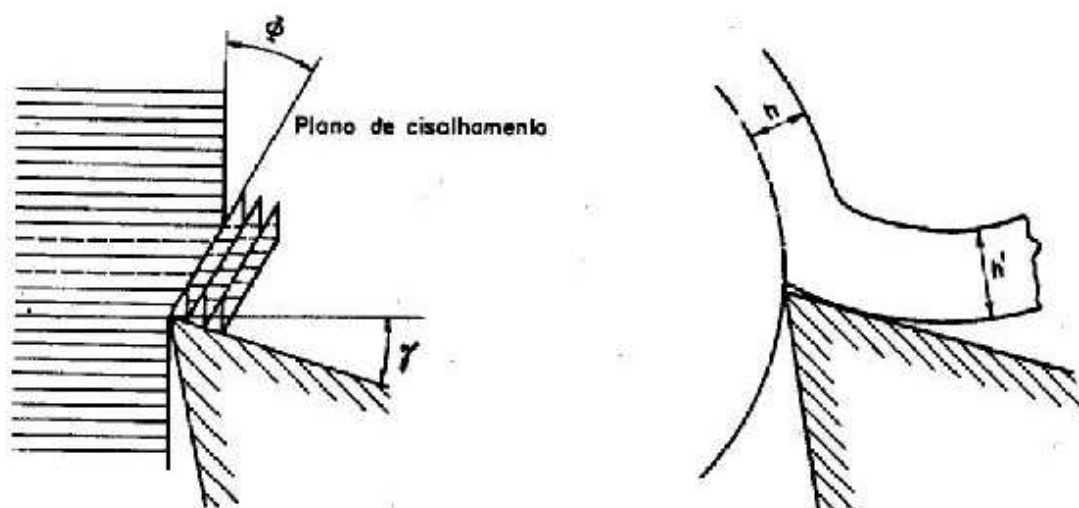


Figura 2.3 - Formação do cavaco (adaptado FERRARESI, 1977)

Considerando-se o exposto, pode-se concluir que o fenômeno de formação do cavaco é um fenômeno periódico, inclusive na formação do cavaco dito contínuo. Tem-se alternadamente uma fase de recalque e uma fase de escorregamento para cada porção de material removido.

#### 2.4.3 Formas do cavaco do alumínio

A forma dos cavacos de alumínio é um critério importante, especialmente quando se leva em consideração o grande volume de material retirado enquanto se usina o alumínio. O objetivo geral é a obtenção de cavacos parcialmente contínuos e em espiral.

Uma grande variedade de formas de cavaco de alumínio, dependendo da liga de alumínio, pode ser produzida. Geralmente a orientação básica é: quanto mais duro e mais resistente a liga de alumínio, menor o cavaco. Isso leva às seguintes regras gerais.

- Alumínio puro e ligas forjadas mais dúcteis produzem cavacos extremamente longos, tornando-se essencial a introdução de medidas especiais de correção (quebra-cavacos sobre as ferramentas).

- ligas forjadas de alta resistência (por exemplo, AlMg5, AlMgSi) não apresentam problemas no que se refere à formação do cavaco.
- ligas de fundição hipoeutéticas (G-AlSi8Cu3, G-AlSi10Mg etc) levam à formação de cavacos espiral curto que podem ser removidos facilmente.
- ligas eutéticas fundidas (G-AlSi12) tendem a produzir cavacos mais longos.
- ligas hipereutéticas fundidas (ligas de pistão), inevitavelmente, levarão à formação de cavacos fragmentados que podem em alguns casos serem difíceis de remover.

Um dos parâmetros tecnológicos que podem afetar a forma dos cavacos é a geometria da ferramenta. Um ângulo de inclinação reduzido tende a formar cavacos menores.

## **2.5 Desgaste e vida de ferramenta na usinagem de alumínio**

As avarias são mais comuns no corte interrompido (fresamento), devido aos choques mecânicos e térmicos inerentes a tais processos. Já em corte contínuo (torneamento) são muito raras, a não ser em condições de corte acima das máximas recomendadas, ou escolha inadequada de geometria da ferramenta, ou devido a um possível defeito de fabricação (o que é muito raro), de acordo com MACHADO & SILVA (1999).

Os vários mecanismos de desgaste citados por Trent (2000) dependem de vários fatores, entre eles a dureza do material da peça e a temperatura de corte. Na usinagem do alumínio, as temperaturas são baixas, sendo assim, o principal mecanismo envolvido no processo é abrasão. Por conseguinte o critério decisivo para medir objetivamente a vida da ferramenta é a largura do desgaste de flanco VB (Fig. 2.4). Usando uma ferramenta de metal duro, é admissível um valor máximo de 0,3 a 0,5 mm para VB.

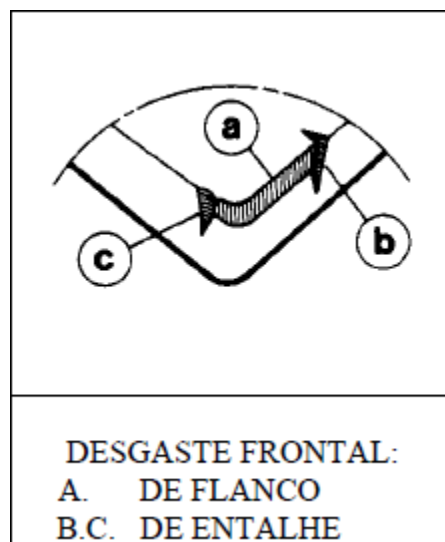


Figura 2.4 - Desgastes de Ferramentas. DINIZ *et al* (1999) adaptado.

As principais correlações para o desgaste de ferramenta são derivadas principalmente de:

- O desgaste aumenta com o grande número de partículas duras incorporadas à peça de alumínio. Estas partículas podem ser precipitados de partículas de silício em uma liga hipereutética. Esta é a razão pela qual alumínio fundido causa um alto desgaste nas ferramentas.
- O desgaste aumenta com a dureza do material. Partículas duras imersas numa matriz dúctil podem ser removidas facilmente. Entretanto, se o material da matriz é duro, essas partículas não podem ser removidas facilmente, portanto, aumentam o desgaste da ferramenta.
- Finalmente, desgaste depende da resistência da superfície da ferramenta.

A velocidade de corte tem a maior influência na vida da ferramenta. A relação entre a velocidade de corte  $v$  e a vida da ferramenta,  $T$ , é dada pela equação de Taylor:  $V_c = C \cdot T^{-1/k}$ . Esta equação pode ser aproximada para uma reta usando-se escalas logarítmicas em ambos os eixos  $T$ - $v$  correlacionando

muito bem os valores experimentais. A Fig. 2.5 ilustra um exemplo de correlação entre velocidade de corte e a vida de ferramenta

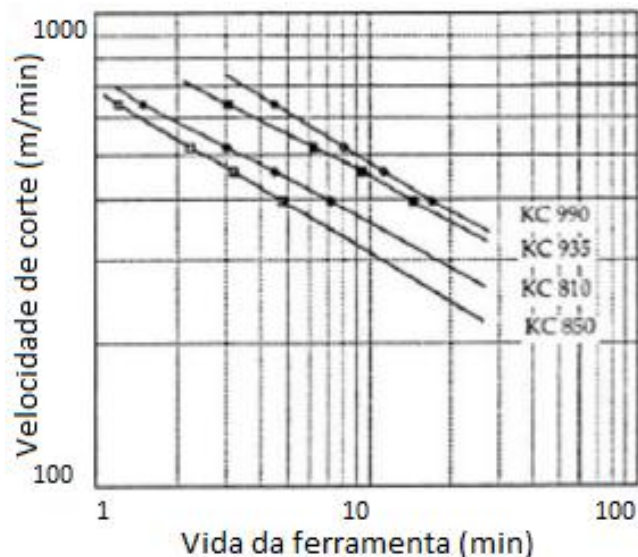


Figura 2.5 - Curva de Taylor (Jawahir *et al.* 1995, modificado)

A Fig. 2.5 é um exemplo de curvas de vida para ferramentas na usinagem de alumínio para ligas fundidas. No caso de ligas forjadas, a vida da ferramenta é definida em ciclos de turnos ou dias ao invés de minutos.

Já que o desgaste da ferramenta é dependente de outras condições de corte, as curvas de vida são válidas somente para condições de corte bem definidas e específicas. Alguns outros fatores que influenciam no desgaste de ferramenta são:

- Fluido refrigerante: Uma refrigeração eficiente pode reduzir o desgaste da ferramenta.
- Interrupções no corte: A usinagem não contínua aumenta o desgaste da ferramenta. Poros na peça podem ser considerados interrupções no processo de usinagem.
- Profundidade de corte: O desgaste de ferramenta tende a aumentar com o aumento da área da secção do cavaco retirado.

## 2.6 Forças de usinagem

O conhecimento das forças de corte é necessário para estimativa da potência requerida e para o projeto de máquinas operatrizes, suportes e fixação de ferramentas, com rigidez adequada e livres de vibração (Trent e Wright, 2000).

O conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte nos processos de usinagem é de fundamental importância, pois afeta a potência necessária para o corte, a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, a temperatura de corte, o desgaste da ferramenta, além de servirem como parâmetros para o projeto de máquinas-ferramenta (Diniz et al., 2000).

O conhecimento das forças envolvidas em processos de usinagem, além dos motivos citados por Trent, é importante para:

- Estimar a usinabilidade de determinado material;
- Definir processos, econômicos do ponto de vista;
- Energético, visto que a potência consumida pela máquina é proporcional à força de usinagem;
- Controle de processo;
- Parâmetro auxiliar para tomada de decisões;

Por convenção, a força de usinagem ( $F_u$ ) é representada como sendo aplicada pela peça sobre a ferramenta. Fig. 2.6.

Devido à sua forma tridimensional, é de difícil medição, pois cada conjunto de parâmetros apresenta esta força em uma direção diferente.

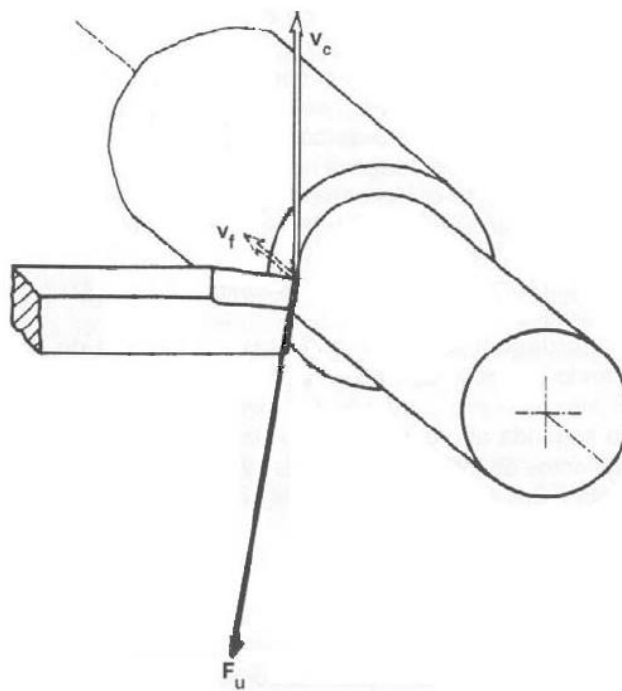


Figura 2.6 - Força  $F_u$  de usinagem (Ferraresi, 1977)

A força de usinagem pode ser decomposta nas direções conhecidas e assim, pode ser medida através da utilização de dinamômetros específicos para o processo de torneamento. A Fig. 2.7 ilustra um exemplo de torneamento cilíndrico externo com as componentes da força de usinagem.

A força passiva ( $F_p$ ) se deve à reação da peça sobre a ferramenta, e não está diretamente associada com nenhum movimento no torneamento cilíndrico.

Força ativa ( $F_t$ ) ocorre no plano definido pelo avanço e velocidade de corte, e é composta pelas forças de avanço ( $F_f$ ) e de corte ( $F_c$ ).

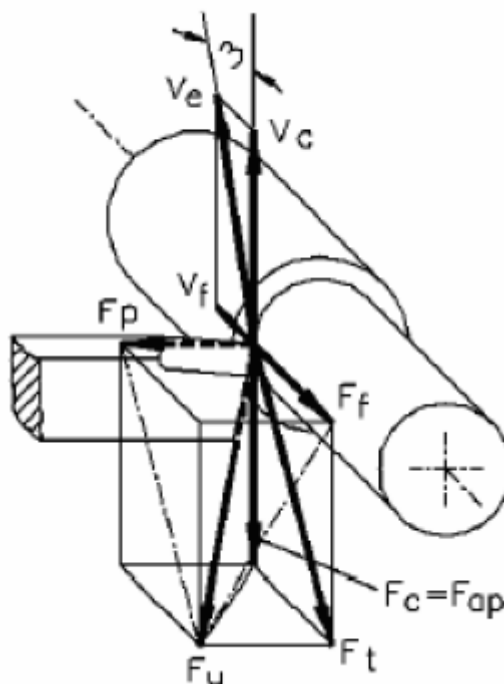


Figura 2.7 - Componentes da Força de usinagem no torneamento (Ferraresi, 1977)

A força passiva ( $F_p$ ) é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular ao plano de trabalho. Esta componente não contribui para a potência de usinagem, pois é perpendicular aos movimentos, porém, é importante que se estude seu comportamento e seu valor, pois ela é responsável pela dificuldade de obtenção de tolerâncias de forma e de dimensões apertadas.

Em geral as componentes das forças de usinagem variam com as condições de trabalho (material da peça, condições de corte, geometria da ferramenta, etc.). Asthakov (1998) afirma que os materiais com menor deformação final na fratura são os que consomem menor energia durante o corte e, portanto, apresentam valores de força de usinagem menor.

## 2.7 Acabamento superficial e integridade da peça usinada

A qualidade de superfície é um importante parâmetro para avaliar a produtividade de máquinas-ferramentas, bem como componentes usinados.



Além disso, e mais importante, atingir a qualidade da superfície desejada é essencial para o comportamento funcional das partes mecânicas (Benardos e Vosniakos, 2003). A rugosidade é utilizada como indicador de qualidade crítica para as superfícies usinadas e tem influência sobre várias propriedades, como resistência ao desgaste, resistência à fadiga, coeficiente de lubrificação, atrito, desgaste, taxa de corrosão e resistência das peças usinadas (Feng e Wang, 2002).

As indústrias de manufatura atualmente dão grande importância ao acabamento superficial e precisão dimensional das peças usinadas. Assim, medir e caracterizar o acabamento das superfícies pode ser considerado como preditor do desempenho de usinagem (Reddy e Rao, 2005).

Os operadores trabalham em torno do uso de suas próprias experiências e orientações de usinagem para alcançar o melhor acabamento de superfície possível. Devido ao inadequado conhecimento da complexidade e os fatores que afetam o acabamento de superfícies torneadas uma decisão inapropriada pode causar um alto custo na produção e baixa qualidade de usinagem.

A seleção adequada de ferramentas de corte e parâmetros de processo para atingir um bom desempenho de corte numa operação de torneamento é uma tarefa crítica (Nian *et al.*, 1999). Portanto, uma estimativa apropriada da qualidade superficial tem sido foco de estudos por diversos anos.

A rugosidade da superfície descreve a geometria da superfície a ser usinada combinada com a textura superficial. Os mecanismos para a formação da rugosidade superficial são muito complexos e basicamente dependem dos processos de fabricação (Benardos e Vosniakos, 2003; Petropoulos *et al.*, 2006). Portanto, é difícil determinar a rugosidade através de equações analíticas. Existem vários critérios e parâmetros para avaliar a rugosidade de uma superfície. De uma maneira resumida, a rugosidade pode ser expressa através de um parâmetro extraído do gráfico representativo do perfil de rugosidade da superfície, utilizando procedimentos padronizados e normas. Dois parâmetros que podem ser utilizados são a rugosidade média ( $R_a$ ) e a distância máxima entre pico e vale ( $R_t$ ), para um determinado comprimento de amostragem. Modelos teóricos foram propostos para estimar esses parâmetros

(Shaw, 1984; Boothroyd and Knight, 1989). Assim, por exemplo, estes dois parâmetros podem ser estimados de acordo com as seguintes expressões para uma operação de torneamento cilíndrico externo, utilizando ferramenta com raio de ponta  $r$ .

$$R_a (\mu m) = \frac{1000 f^2}{32 r} \quad (1)$$

$$R_t (\mu m) = \frac{1000 f^2}{8 r} \quad (2)$$

onde  $f$  é avanço (mm/volta) e  $r$  é o raio de ponta de ferramenta (mm).

Entretanto, o modelo teórico acima não leva em consideração qualquer imperfeição no processo, como vibrações da ferramenta ou adesão do cavaco (Diniz and Micaroni, 2002). Portanto, estes modelos não refletem o efeito de outros parâmetros na qualidade superficial. Tem sido mostrado que a velocidade de corte e a velocidade de avanço desempenham grande influência na qualidade superficial das peças acabadas (Davim, 2001). Um dos principais efeitos da velocidade de corte na rugosidade se deve à formação de aresta postiça de corte (APC). Assim, para um bom acabamento superficial, deve-se utilizar velocidades de corte altas para evitar a formação da APC.

### 2.7.1 Superfície de ligas de alumínio usinadas

Em geral, a rugosidade superficial da peça usinada, ou seja, a influência do material na qualidade da superfície de corte se aplica às mesmas regras da formação do cavaco. Essas regras se aplicam pelo menos para ligas forjadas. Quanto maior a dureza da liga forjada a ser usinada, menor será a rugosidade da superfície da peça (Jhone, 1994).

No que diz respeito às ligas fundidas, a micro-estrutura exerce certa influência, ou seja, partículas duras difundidas numa matriz de material mais tenaz podem ser avaliadas como resultando em superfícies usinadas mais ásperas. A qualidade das superfícies produzidas por peças usinadas à partir de ligas fundidas podem ser classificadas como boas a muito boas.

A pureza do material utilizado é de fundamental importância para ligas de alumínio com fins específicos (ex.: HD para armazenamento de informações de computadores), os quais devem ser usinados para obtenção de superfícies bem acabadas ( $R_t < 0,1 \mu m$ ). Para satisfazer estas condições, os materiais de alumínio forjado usados devem ter uma micro-estrutura extremamente uniforme, livre de heterogeneidades e impurezas.

A velocidade de corte é um importante parâmetro que influencia na qualidade superficial. No geral, a rugosidade é inversamente proporcional à velocidade de corte. A baixas velocidades de corte a rugosidade da superfície aumenta drasticamente, devido à aresta postiça de corte criada (APC) Fig. 2.8. As regiões de baixas velocidades de corte devem ser, como uma regra geral, evitadas na usinagem de alumínio. Aresta postiça (Fig. 2.9) de corte é um fenômeno típico na usinagem de ligas de alumínio e é causada pela adesão e retirada periódica de material da peça na ferramenta de corte.

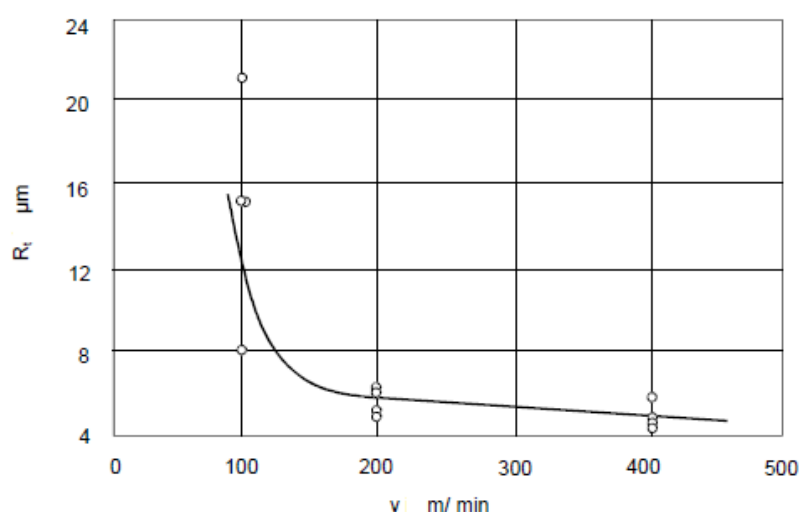


Figura 2.8 – Comportamento da rugosidade com a velocidades de corte (Johne, 1994).

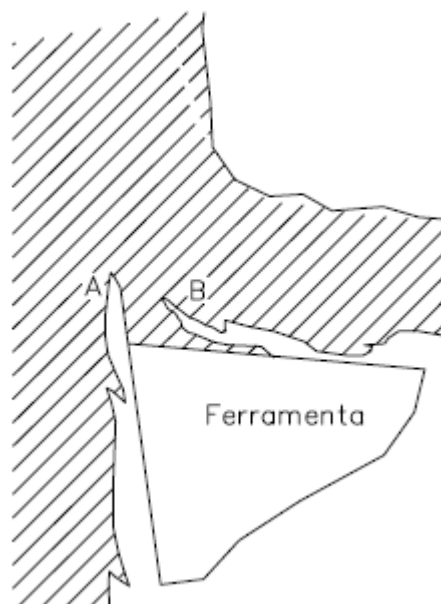


Figura 2.9 - Aresta postiça de corte (TRENT, 1963)

A influência da construção da ferramenta de corte na qualidade do acabamento superficial da peça pode ser verificada pelo fenômeno mencionado acima. É importante que os cavacos possam deslizar com baixa resistência pela superfície da ferramenta. Um ângulo de folga relativamente grande e um bom lubrificante influem no processo de usinagem desse material. Baseado nos fatores que afetam a qualidade da superfície pode-se dividir a operação da usinagem do alumínio em quatro regiões distintas (Fig. 2.10):

- **Região I:** Devido à formação da APC, a qualidade da superfície é insatisfatória, o processo de corte é substituído pelo rasgamento do material. Esta região deve ser evitada.
- **Região II:** Decaimento da rugosidade média da superfície com o aumento da velocidade de corte.
- **Região III:** Aumento de influência de interferências, ou seja, o formato da ferramenta e a vibração no processo afetam a qualidade da superfície da peça. Portanto, para se obter uma qualidade superficial desejada, deve-se utilizar uma ferramenta própria para usinagem de alumínio.

- **Região IV:** Baixa qualidade superficial devido à formação de cavacos virtuais. Esses cavacos são a acumulação de material removido que fica aderido na superfície da ferramenta. Portanto, entrando em contato com a peça recém-usinada. Esse tipo de comportamento é comum em ligas de alumínio fundidas, usando-se altas velocidades de corte. Fig. 2.10.

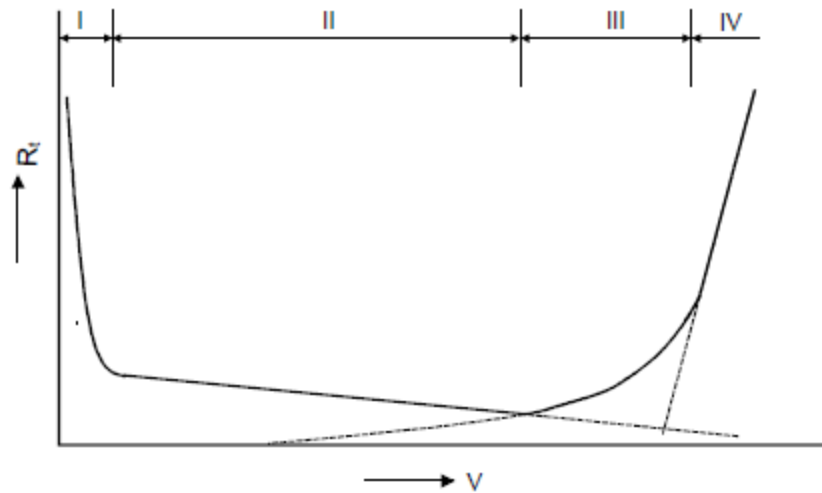


Figura 2.10 - Regiões da qualidade da superfície e velocidade de corte para usinagem de alumínio (Johne, 1994)

## 2.8 Usinabilidade

A usinabilidade de um material pode ser definida pelos seguintes fatores:

- Tipo de cavaco;
- Vida da ferramenta;
- Força e potência necessárias;
- Acabamento superficial e integridade da peça usinada, entre outros;

Boa usinabilidade indica bom acabamento superficial e integridade, vida longa da ferramenta, e baixa força e potência. E quanto ao tipo de cavaco o ideal é em pedaços (Ferraresi, 1990).

Usinabilidade não é uma propriedade do material que pode ser definido usando um único parâmetro característico. Ela é, de fato, um complexo termo tecnológico.

O Alumínio comercialmente puro, apesar de extremamente dúctil, apresenta baixa usinabilidade. As ligas mais resistentes com cobre têm usinabilidade razoável. As ligas com silício são mais difíceis de usar. As ligas com magnésio são largamente empregadas na indústria aeronáutica (Ferraresi, 1990).

A usinabilidade depende tanto das propriedades físicas e químicas do alumínio assim como o processo de fabricação usado para sua produção

O arranjo cinemático da ferramenta e da peça é, de longe, o critério mais decisivo para o processo de usinagem. Estritamente falando, o termo usinabilidade deve ser definido separadamente para cada processo de usinagem individual (torneamento, furação, etc.). Por causa dos arranjos claramente definidos entre peça e ferramenta, o termo usinabilidade se aplica geralmente ao processo de torneamento.

A tecnologia utilizada para o processo de usinagem em si depende de uma série de parâmetros independentes.

**Parâmetros de corte e geometria da ferramenta:** Mesmo estes parâmetros exercem influência considerável. Atualmente existem orientações de valores destes parâmetros mais adequados para o alumínio.

**Material da ferramenta de corte:** As ferramentas durante a usinagem estão sujeitas a: altas temperaturas, altas pressões de contato e atrito com o cavaco e a superfície já usinada da peça. Em função disso a ferramenta deve apresentar as seguintes propriedades:

- Dureza: principalmente em temperaturas elevadas para garantir resistência ao desgaste e resistência mecânica nas temperaturas de trabalho.
- Tenacidade: a ferramenta deve resistir a impactos e esforços cíclicos, comuns nas operações de usinagem.

- Resistência ao desgaste: para garantir uma durabilidade compatível com o processo.
- Estabilidade química: não deve reagir com o material da peça ou contaminá-lo.

A seguir apresenta-se, na ordem em que foram desenvolvidas, categorias de materiais utilizados na fabricação de ferramentas para usinagem: Aços carbono e ligas, aços rápidos, ligas fundidas, metal duro, cerâmicas e diamante. Diante desta ampla classe de ferramentas, é necessário utilizar uma específica para o tipo de material que é o alumínio.

**Máquina utilizada:** Este parâmetro tem importância fundamental sobre o processo de usinagem quando o alumínio é considerado. Tanto a condição da máquina, bem como o seu design devem preencher as condições especiais exigidas para o corte de alumínio.

# **CAPÍTULO III**

## **Procedimento Experimental**

Este trabalho avaliou a usinabilidade da liga de alumínio 6351 e o efeito do teor de silício. A usinabilidade foi estudada através da medição das forças de corte na usinagem e da rugosidade da superfície usinada. Foram também variadas as condições de corte, tais como velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e utilização de fluido de corte. A seguir são apresentados os detalhes experimentais.

### **3.1 Materiais**

Para este trabalho foram produzidos três lotes de materiais com composições químicas previamente definidas (dentro dos limites da capacidade do processo de fabricação). As ligas utilizadas para os testes foram retiradas da linha de produção através de testes de composição química que mostravam a porcentagem de ferro, cobre, manganês e magnésio numa faixa bem próxima umas das outras, onde a maior variação seria na composição do silício, como mostra a Tabela 3.1.

Os materiais foram fabricados durante o mesmo turno de produção e sob os mesmos parâmetros de fabricação e foram extrudados com diâmetro de 254 mm.



As barras sofreram uma preparação para poderem se adequar aos equipamentos presentes no LEPU-Laboratório de Ensino e Pesquisa de Usinagem, onde os testes experimentais foram realizados, a começar pelo faceamento de cada extremidade e fabricação do furo de centro, seguido da redução do diâmetro de cada barra para 210 mm.

Tabela 3.1 - Composição química das amostras

	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>Amostra 3</b>
<b>% Silício (Si)</b>	1,06	1,20	1,30
<b>% Ferro (Fe)</b>	0,16	0,16	0,17
<b>% Cobre (Cu)</b>	0,11	0,11	0,11
<b>% Manganês (Mn)</b>	0,5	0,47	0,51
<b>% Magnésio (Mg)</b>	0,41	0,41	0,41

### 3.2 Planejamento dos experimentos

Os ensaios não relacionados à usinagem (tração, dureza e microestrutura) não serão levados em conta para análise estatística para verificação de influência nos parâmetros analisados.

Os ensaios de usinagem foram projetados para atenderem a dois planejamentos de experimentos fatoriais a três níveis com um ponto central (valor intermediário), apesar de terem sido colhidos e analisados valores intermediários de rugosidade e força de corte durante os testes. Cada planejamento foi sub-dividido em duas regiões de velocidades: baixas velocidades na região de aresta postiça de corte e velocidades com alto valor fora dessa mesma região. Para o primeiro planejamento foi variado o avanço da ferramenta ( $f$ ), em valores relativamente baixos, a profundidade de corte ( $ap$ ), a velocidade de corte ( $v_c$ ) e o teor de silício na composição química da liga, conforme Tabela 3.2. Para o segundo planejamento, ao invés de variar a profundidade de corte, variou-se o uso de lubrificante (corte a seco, MQF e

jorro), e foram usados altos avanços, conforme indicação do fabricante da ferramenta, como mostra a Tabela 3.3. Os valores centrais dos parâmetros de usinagem foram possíveis pelo fato da máquina utilizada apresentar variação contínua de velocidade e avanço.

Tabela 3.2 - Matriz de experimento  $3^k$ , seco

	<b>ap (mm)</b>	<b>f (mm/rev)</b>	<b>%Si</b>	<b>v<sub>c</sub> c/ APC (m/min)</b>	<b>v<sub>c</sub> s/ APC (m/min)</b>
<b>-1</b>	1	0.1	1.1	80	200
<b>0</b>	1.5	0.15	1.2	100	600
<b>1</b>	2	0.2	1.3	120	1000

Tabela 3.3 - Matriz de experimento  $3^k$ , ap 2 mm

	<b>Lubrificante</b>	<b>f (mm/rev)</b>	<b>%Si</b>	<b>v<sub>c</sub> c/ APC (m/min)</b>	<b>v<sub>c</sub> s/ APC (m/min)</b>
<b>-1</b>	Seco	0.2	1.1	80	200
<b>0</b>	MQF	0.35	1.2	100	400
<b>1</b>	Jorro	0.5	1.3	120	600

As velocidades de corte consideradas altas nesse trabalho não significam que são as velocidades limites nas quais o material pode ser usinado, são definidos aqui velocidades de corte altas as maiores velocidades alcançadas no limite das máquinas utilizadas, levando-se em conta a segurança do operador, uma vez que os materiais utilizados são de dimensões relativamente grandes.

### 3.3 Ensaios não relacionados à usinagem (para caracterização) dos materiais e dos corpos de prova

Para caracterização das ligas utilizadas, em termos de propriedades mecânicas, foram realizados ensaios de tração e dureza e também análise das microestruturas. Estas características são necessárias para auxiliar na

interpretação dos resultados obtidos. Os resultados dos ensaios de caracterização serão apresentados no próximo capítulo.

Os ensaios de tração foram feitos de acordo com a norma 6512 (ABNT, 1992) e realizados numa Máquina Universal de Ensaios MTS 810 com capacidade de 250 KN do Laboratório de Projetos Mecânicos, FEMEC – UFU.

Os ensaios de dureza foram feitos usando um durômetro pertencente ao Laboratório de Tribologia de Materiais (LTM) da Universidade Federal de Uberlândia. A escala adotada foi a Brinell, que possui um penetrador esférico e são medidos dois diâmetros da marca deixada no material, uma média destes diâmetros é calculada para verificar a dureza do material na tabela da escala definida.

A preparação de amostras metalográficas das peças analisadas foi feita da seguinte maneira.

- Corte de amostras na secção radial e longitudinal de cada um dos materiais;
- Embutimento utilizando baquelite;
- Lixamento com lixas 600 e 1200 mesh nessa ordem;
- Polimento com pasta diamantada de 1 micrometro.
- Ataque com solução (Kellers).

Para aquisição das imagens utilizou-se um microscópio Olympus bx60m com câmera JVC-TKC1380. Junto com o equipamento citado conecta-se um computador com um programa de análise de imagens Leica Quin versão 2.2 e software aplicativo Corel Photo versão 6.0.

Cada material foi analisado no corte transversal e longitudinal para verificação de mudanças no comportamento do grão ou qualquer outra modificação que por ventura pudesse ser verificada.

### 3.4 Ensaio de usinagem utilizando-se o planejamento 2<sup>3</sup>

Os ensaios foram realizados no torno CNC ROMI Multiplic 35-D com rotação máxima de 3000 rpm e potência de 11 kW, Fig. 3.1 localizado na oficina mecânica da UFU.



Figura 3.1 - Torno CNC Multiplic 35D

Os corpos de prova foram preparados com um rebaixo de 20 mm com um diâmetro de 170 mm para poder ser devidamente fixado à placa do torno CNC com aproximadamente 450 mm de comprimento para usinagem.

A ferramenta de corte utilizada possui quebra-cavaco e é própria para alumínio e suas ligas e materiais não ferrosos. Os dados específicos são mostrados na Fig. 3.2 e Tabela 3.4.

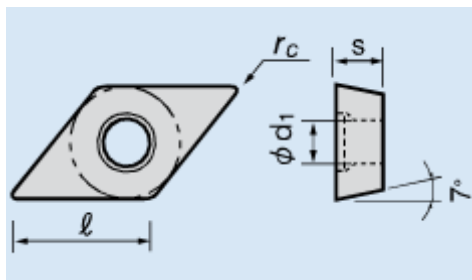


Figura 3.2 - Esquema da ferramenta usada nos ensaios

Fonte: OSG//Tungaloy The Complete Solution Ferramentas de Corte 2009

Tabela 3.4 - Dados da ferramenta de corte

	(mm)
<b><i>l</i></b>	11
<b><i>r<sub>c</sub></i></b>	0,4
<b><i>s</i></b>	3,97
<b><i>d<sub>1</sub></i></b>	4,4

### 3.4.1 Ensaio de força

Durante os testes de usinagem foram adquiridos os sinais de força utilizando-se um dinamômetro KISTLER composto por quatro sensores de cristal de quartzo para medição das três componentes ortogonais da força de usinagem (Fig. 3.3). Um amplificador de sinais capta o sinal de saída do dinamômetro e após a amplificação envia o mesmo a uma placa de aquisição da National Instruments onde pode-se acompanhar o resultado da medição em tempo real com o programa LabView instalado em um computador (Fig. 3.4). Os dados salvados são depois recolhidos e após os devidos tratamentos são analisados. A componente da força de usinagem ( $F_u$ ) analisada foi a força de corte ( $F_c$ ).

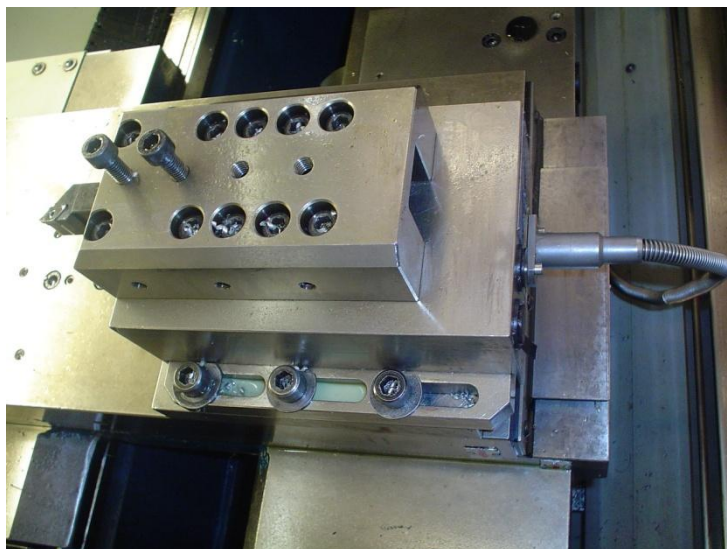


Figura 3.3 - Dinamômetro KISTLER

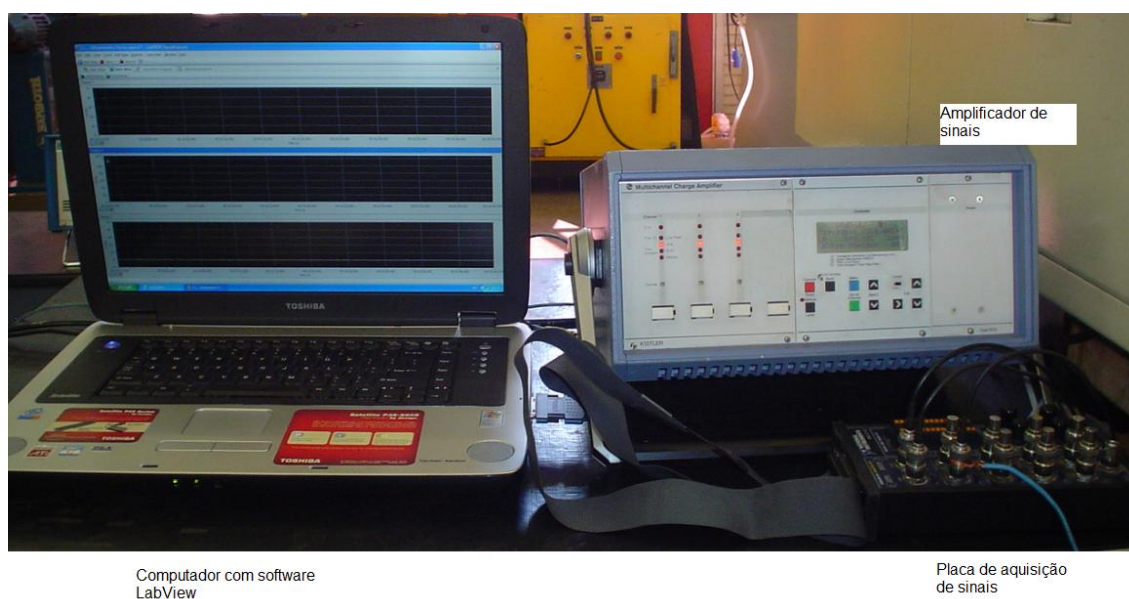


Figura 3.4 - Equipamento para aquisição da força de corte

### 3.4.2 Ensaio de rugosidade superficial

A rugosidade foi medida utilizando-se dois equipamentos. Em uma primeira etapa foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo SJ-201P e em outra etapa foi utilizado um rugosímetro Taylor Robson Surtronic 25 na tentativa de analisar o perfil de rugosidade que o equipamento fornece que pode ser avaliado em m

computador com o software devidamente instalado. Em ambos aparelhos utilizou-se o *cut-off* de  $0,8 \times 5$  de acordo com a norma ISSO 4287 (2000).

O parâmetro analisado foi o  $R_q$  (rugosidade média quadrática), pois este possui, estatisticamente, uma significância maior comparada aos outros parâmetros.

# **CAPÍTULO IV**

## **Resultados e Discussão**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais e as discussões pertinentes. A avaliação do efeito do teor de silício e os demais parâmetros é feita através de força de corte e rugosidade da superfície. Para análise estatística foi considerada interações de até segunda ordem com significância de 95%, ou seja, os valores com valor de  $p$  abaixo de 0,05 são significativos.

Antes, porém, são apresentados os resultados dos ensaios para caracterização dos materiais usinados.

### **4.1 Ensaio de caracterização dos materiais**

#### **4.1.1 Ensaio de tração**

Os ensaios foram realizados com corpos de prova (Fig. 4.1) feitos no próprio LEPU com 70 mm de comprimento total ( $L$ ) e 30 mm de comprimento para medição da elongação após o ensaio ( $L_0$ ). O diâmetro maior, fixado na máquina de ensaio, possui 10 mm e o diâmetro menor que sofre a estricção com 5 mm. Testes realizados segundo NBR 6152.



Para cada amostra fez-se 4 ensaios para aquisição de média dos parâmetros avaliados e análise estatística de influência.

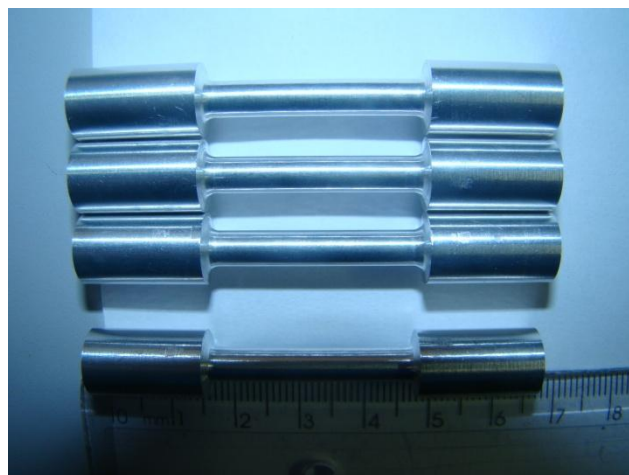


Figura 4.1 - Corpo de prova utilizado nos ensaios de tração

O alongamento é expresso em porcentagem relativamente ao comprimento original medido em um corpo-de-prova normal e é calculado pela diferença entre os pontos de referência, antes e depois do ensaio de tração. Esse alongamento indica a ductilidade do metal ou da liga. Quanto mais fino o corpo-de-prova, menor será o alongamento e vice-versa. Os resultados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Estricção percentual total na ruptura

<b>Material (%Si)</b>	<b>Área secção transversal</b>	<b>Desvio Padrão (%)</b>
<b>1,1</b>	0,0332	2,1606
<b>1,2</b>	0,0176	1,2796
<b>1,3</b>	0,01848	1,2387

Para materiais com maior quantidade de silício, verificou-se uma tendência para diminuição do alongamento. Graficamente nota-se uma alteração no comportamento do conjunto de material analisado (Fig. 4.2). Para cada material foi feito uma média dos quatro ensaios.

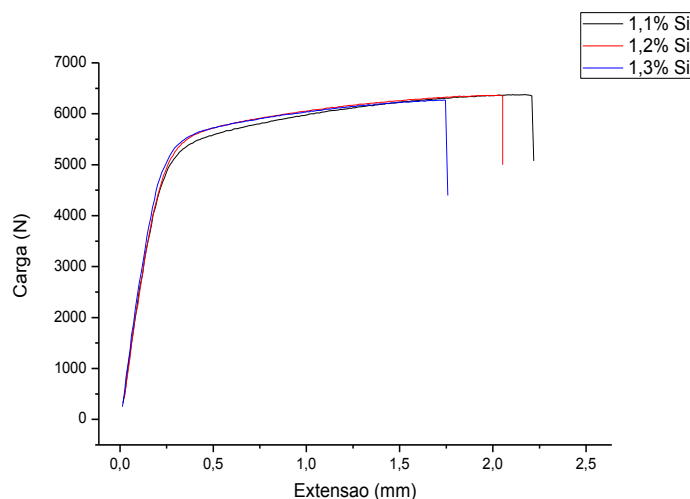


Figura 4.2 - Comparação do alongamento das amostras

O limite de resistência à tração é a máxima tensão que o material resiste antes de haver sua ruptura. Calcula-se dividindo a carga máxima (em Newtons) aplicada durante o ensaio, pela seção transversal em milímetros quadrados do corpo-de-prova. Esse valor aumenta em função da liga, do trabalho a frio e do tratamento térmico (quando possível). A Tabela 4.2 mostra os resultados do limite de resistência à tração calculados para cada material.

Tabela 4.2 - Limite máximo de resistência à tração

Material (%Si)	Limite de Resistência à Tração (Mpa)	Desvio Padrão (%)
1,1	325,27	2,9042
1,2	325,02	3,2949
1,3	320,12	5,3804

Os resultados sugerem que ao aumentar o teor de silício nas amostras, o limite de resistência à tração diminui.

Qualitativamente, os valores obtidos apresentam uma variação, porém, estatisticamente, ao se realizar um teste de hipótese, verifica-se que a concentração de silício nas proporções analisadas não possui influência significativa (Tabela 4.3) nas propriedades mecânicas avaliadas. O comportamento das médias analisados é mostrado na Fig. 4.3.

Tabela 4.3 - Teste de hipótese unilateral de significância do teor de silício no limite de resistência à tração

	SS	Degr. of	MS	F	p
<b>Intercept</b>	<b>1255626</b>	<b>1</b>	<b>1255626</b>	<b>78085.80</b>	<b>0.000000</b>
<b>% Si</b>	67	2	34	2.10	0.178834
<b>Error</b>	145	9	16		

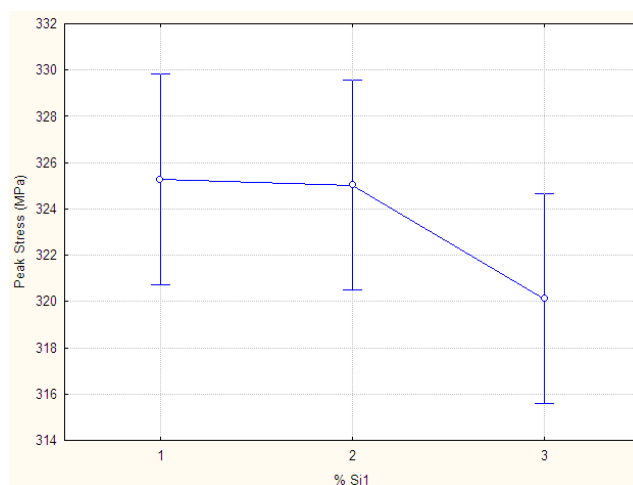


Figura 4.3 - Efeito médio da variação do teor de silício no limite de resistência à tração

#### 4.1.2 Ensaio de dureza

A adição de elementos de liga tem como um dos objetivos aumentar a dureza do material. Nesse intuito preparou-se uma amostra de cada material embutindo-os e lixando as duas superfícies para garantir o paralelismo das mesmas e testes de dureza foram realizados para verificar se a variação do teor de silício influencia significativamente a dureza das ligas de alumínio (Tabela 4.4).

A tabela do teste de hipótese gerada indica que, a variação do teor de silício tem uma influência significativa quando analisado a dureza dos materiais.

Tabela 4.4 - Teste de hipótese influência do silício na dureza das ligas de alumínio

	SS	Degr. of	MS	F	P
<b>Intercept</b>	<b>135256.3</b>	<b>1</b>	<b>135256.3</b>	<b>29332.70</b>	<b>0.000000</b>
<b>% Si</b>	<b>106.2</b>	<b>2</b>	<b>53.1</b>	<b>11.51</b>	<b>0.003307</b>
<b>Error</b>	41.5	9	4.6		

Quanto maior o teor de silício, maior a dureza da liga de alumínio, porém não existe uma relação linear com relação a essas interações, como mostrado na Fig. 4.4.

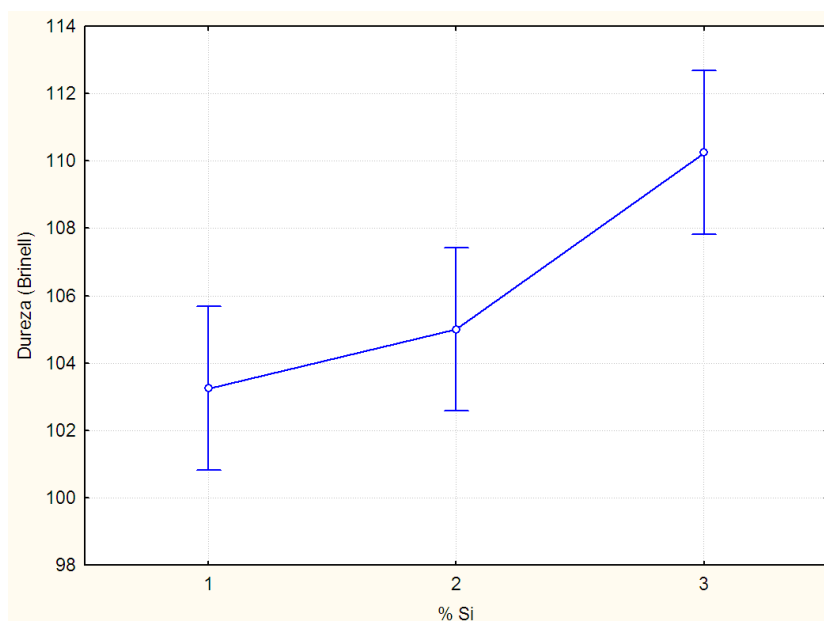


Figura 4.4 - Efeito médio da variação do teor de silício na dureza do material

#### 4.1.3 Análise microestrutural

Com relação à microestrutura, não é possível verificar a variação da concentração de silício visualmente em cada amostra analisada (Figs. 4.5, 4.6 e 4.7). Todas as amostras sofreram ataque simultâneo durante 60 segundos na solução preparada.

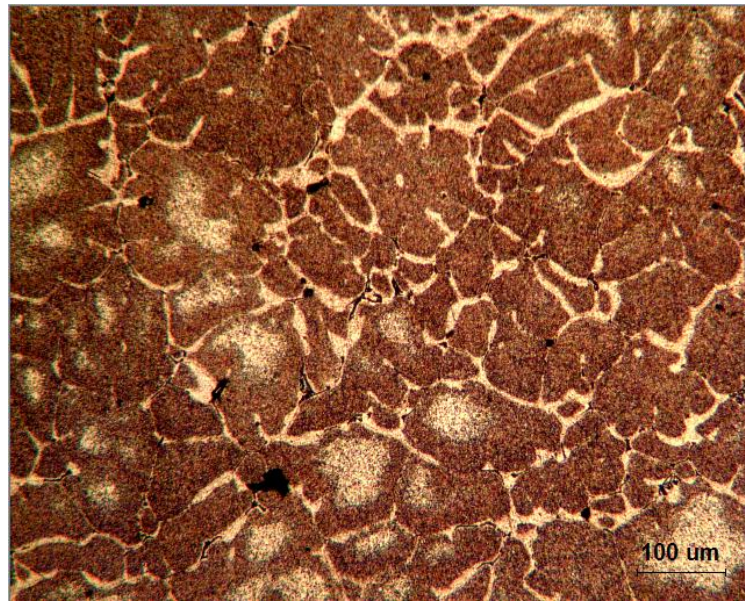


Figura 4.5 - Microestrutura amostra 1,1% Si aumento 100x

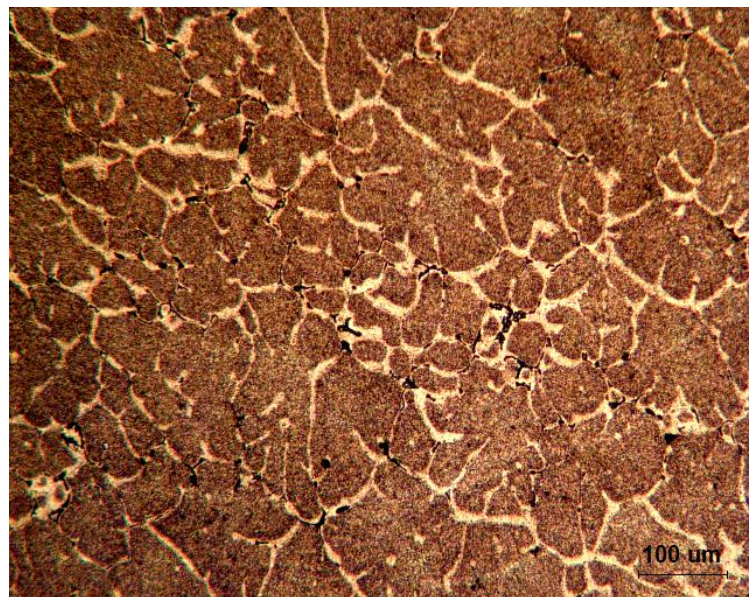


Figura 4.6 - Microestrutura amostra 1,2% Si aumento 100x



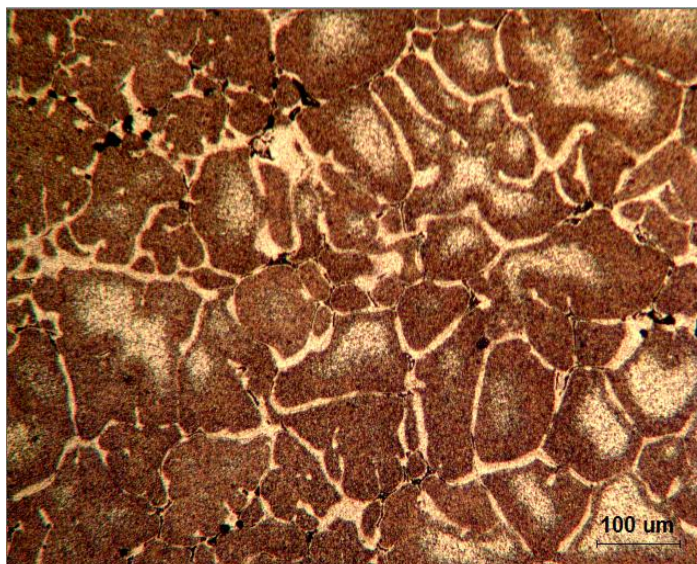


Figura 4.7 - Microestrutura amostra 1,3% Si aumento 100x

Nas amostras analisadas é possível observar as partes mais escuras que é o silício contido nos contornos de grão, partes mais clara e a matriz de alumínio. Basicamente a quantidade de elementos de liga presentes no material se mostra extremamente baixa, porém na comparação das três ligas a estrutura contendo 1,2% de silício sugere uma estrutura de grãos menores do que as outras amostras analisadas. O tamanho de grão pode ser associado à resistência do material, quando o tamanho de grão é menor, menor será a movimentação de discordâncias durante a deformação

#### **4.2 Ensaio de força de corte**

Para cada combinação de variáveis analisadas e suas réplicas a aquisição dos dados foi iniciada logo após a ferramenta entrar em contato com a peça. Um exemplo de sinal de força adquirido está mostrado na Fig. 4.8. O arquivo extraído do LabView (.lvm) era carregado no Matlab através de um programa para que pudesse ser visualizado, determinando a necessidade, ou não, de serem feitos novamente aquisições naquelas condições. Após analisado o sinal de aquisição, uma média foi feita com os valores da região onde fica evidente o valor aproximado da força de corte, Fig. 4.9, obtendo-se um valor de força de corte para análise estatística e seu respectivo desvio padrão.

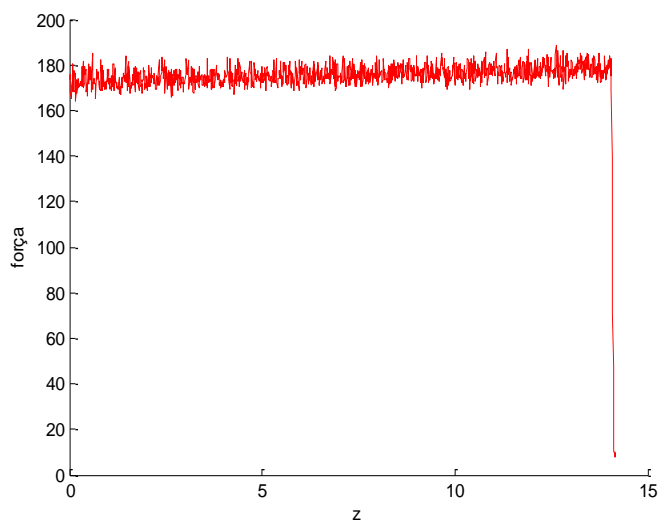


Figura 4.8 - Sinal da força de corte adquirido

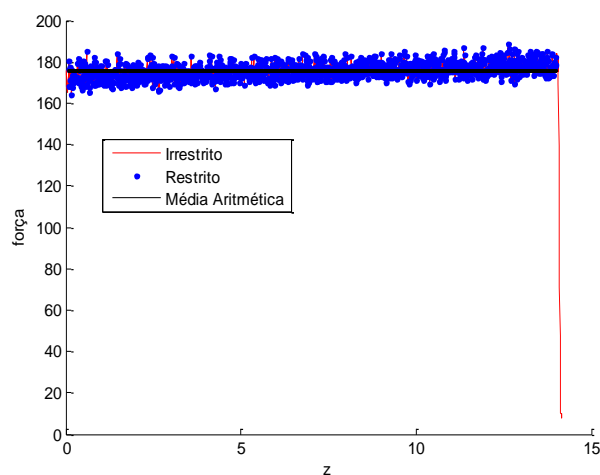


Figura 4.9 - Média dos valores de força de corte

Para todos os ensaios fez-se um gráfico para comparação do efeito que a variação do teor de silício exerce nas amostras estudadas. A seguir são mostrados apenas alguns destes resultados devido à grande quantidade de dados colhidos.

Os ensaios referentes ao primeiro planejamento de experimentos (Tabela 3.2) indicam uma variação clara na força de corte com a variação do teor de silício, porém nem todos sugerem a mesma curva de tendência, como mostrados nas Figs. 4.10, 4.11 e 4.12, para diferentes avanços respectivamente.

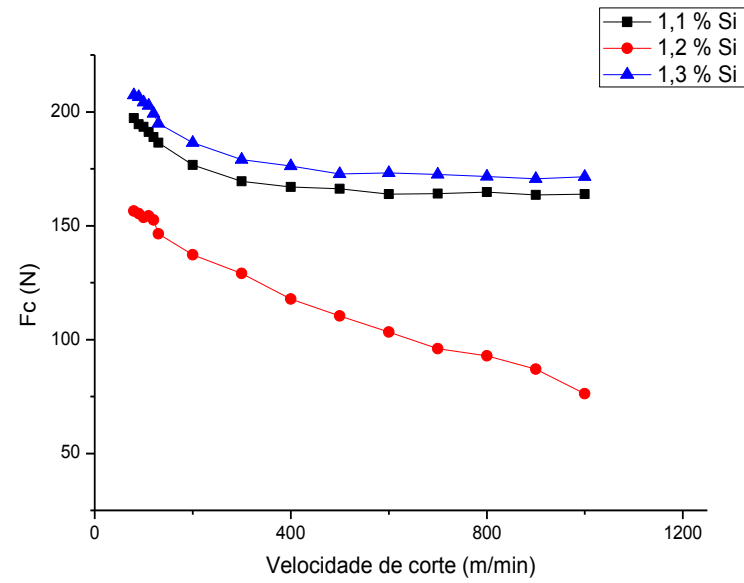


Figura 4.10 - Força de corte versus velocidade de corte, avanço 0,2 m/volta,  $A_p$  2mm, usinagem a seco

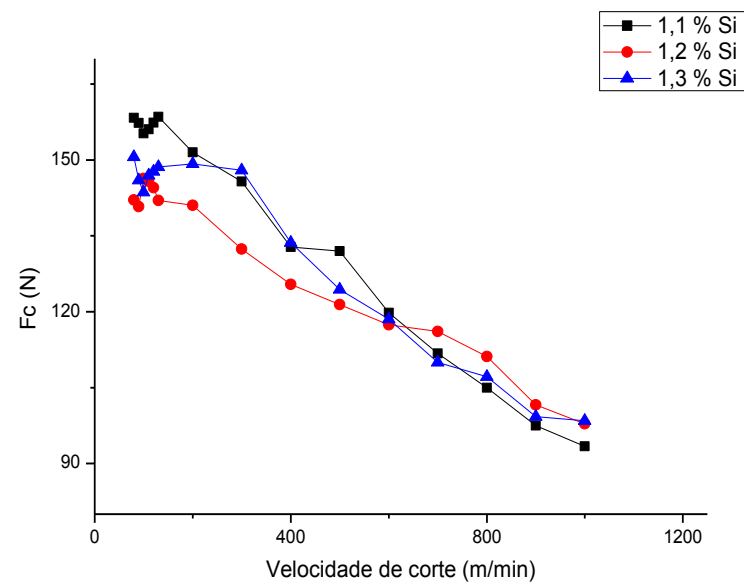


Figura 4.11 - Força de corte versus velocidade de corte, avanço 0,15 m/volta,  $A_p$  2mm, usinagem a seco



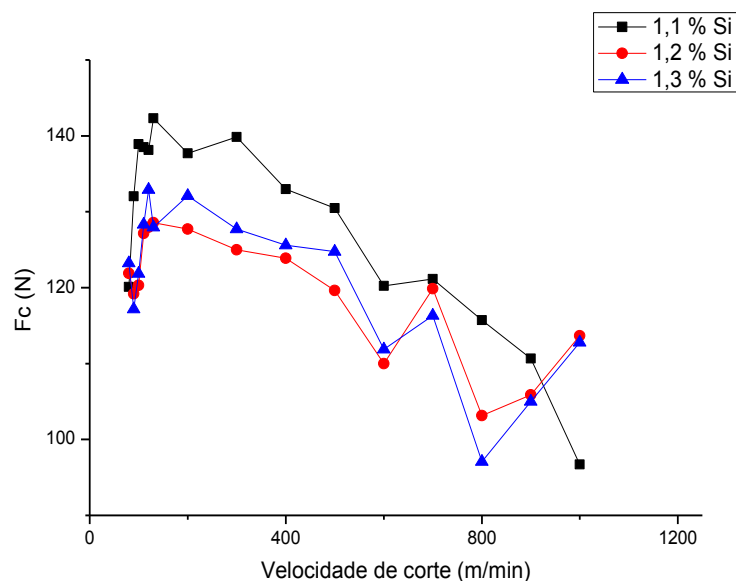


Figura 4.12 - Força de corte versus velocidade de corte, avanço 0,1 m/volta,  $A_p$  2mm, usinagem a seco

Os gráficos acima sugerem a formação de aresta postiça de corte, uma vez que existe a oscilação da força de corte a baixas velocidades que aqui são consideradas entre uma faixa de 80 a 120 m/min. À medida que a velocidade de corte aumenta, a temperatura na interface cavaco-ferramenta também aumenta, diminuindo a resistência do material e facilitando o cisalhamento do mesmo para a formação e saída do cavaco. Com o aumento da temperatura a aresta postiça de corte desaparece e dá lugar à zona de fluxo. O aumento da velocidade de corte e a redução da força de corte, assim como a relação do aumento dos valores de avanço com o aumento da força de corte tendem a ser linear. Uma análise das microestruturas anteriores sugere que o tamanho dos grãos da amostra de 1,2% de silício é menor que a das outras amostras, por isso provavelmente a força de corte é menor para este material. Essa diferença é mais acentuada para os avanços de 0,2 mm/volta.

Uma análise nos resultados do segundo planejamento de experimentos (Tabela 3.3) leva a crer que existe efeito significativo da concentração de silício na força de corte, Figs. 4.13 e 4.14, porém, como as diferenças dos valores analisados são muito pequenas, não é possível uma conclusão definitiva.

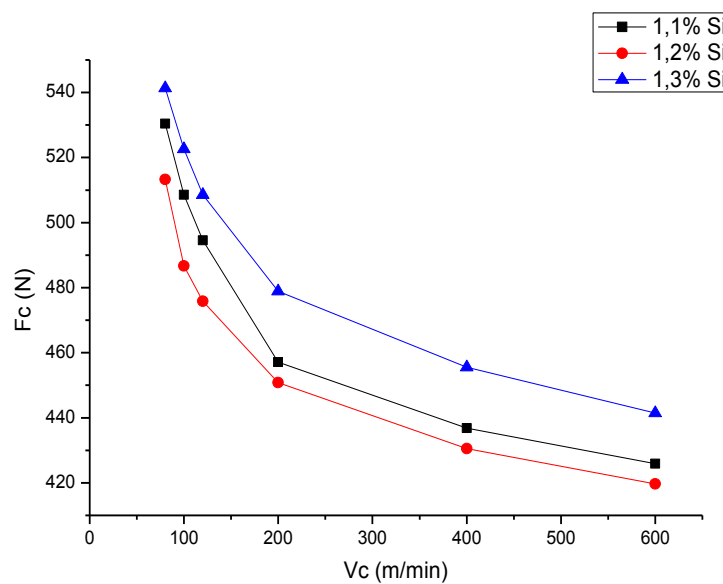


Figura 4.13 - Força de corte versus velocidade de corte, avanço 0,35 m/volta, usinagem com MQF

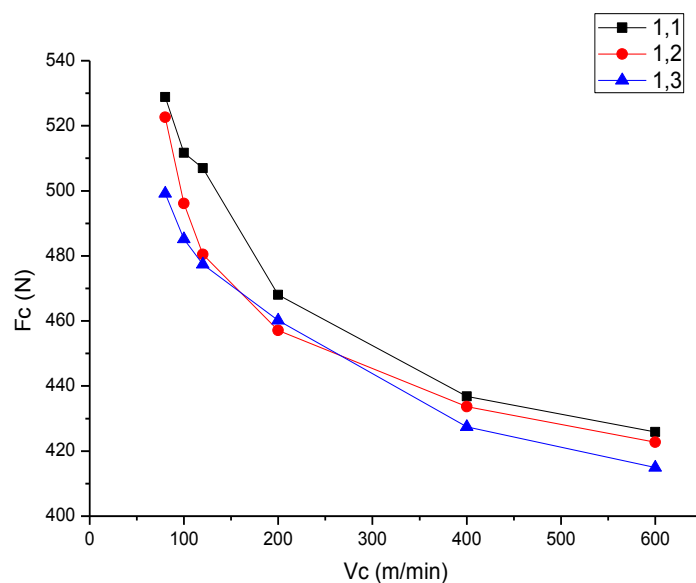


Figura 4.14 - Força de corte versus velocidade de corte, avanço 0,35 m/volta, usinagem com jorro

Nestas curvas à velocidades de corte mais baixas, não é observado o comportamento característico da formação de APC. Um comentário importante com relação aos ensaios e os dois planejamentos é que existe uma diferença de diâmetro no qual os ensaios foram realizados, sendo assim, os valores analisados não podem ser diretamente comparados, pois a variação do diâmetro pode influenciar os resultados.

Existe uma diferença da dureza ao longo do raio nas amostras estudadas, porém uma análise da microestrutura ao longo do raio não fica evidente qualquer diferença. O primeiro indício desse fenômeno foi a comparação dos resultados do primeiro planejamento de experimentos com o segundo para o avanço de 0,2 mm/ rotação, com profundidade de corte de 2 mm, na usinagem a seco. Os valores de força teoricamente deveriam ser iguais ou muito parecidos, pois as condições de corte são as mesmas, porém as curvas encontradas não são iguais.

Para validação da hipótese que o teor de silício nas quantidades analisadas exerce influência significativa nos parâmetros analisados, foi feito para todos os casos avaliados, uma análise estatística, que será mostrada nos próximos itens.

#### 4.2.1 Ensaio de força de corte a baixas velocidades de corte a seco

##### 4.2.1.1 Ensaios com baixos valores de avanço

Nos primeiros ensaios foram feitos testes para avaliar os parâmetros significativos na força de corte. A contribuição de cada parâmetro individualmente na influência da usinabilidade da liga de alumínio é apresentada na Fig. 4.15, por meio do gráfico de paretto.

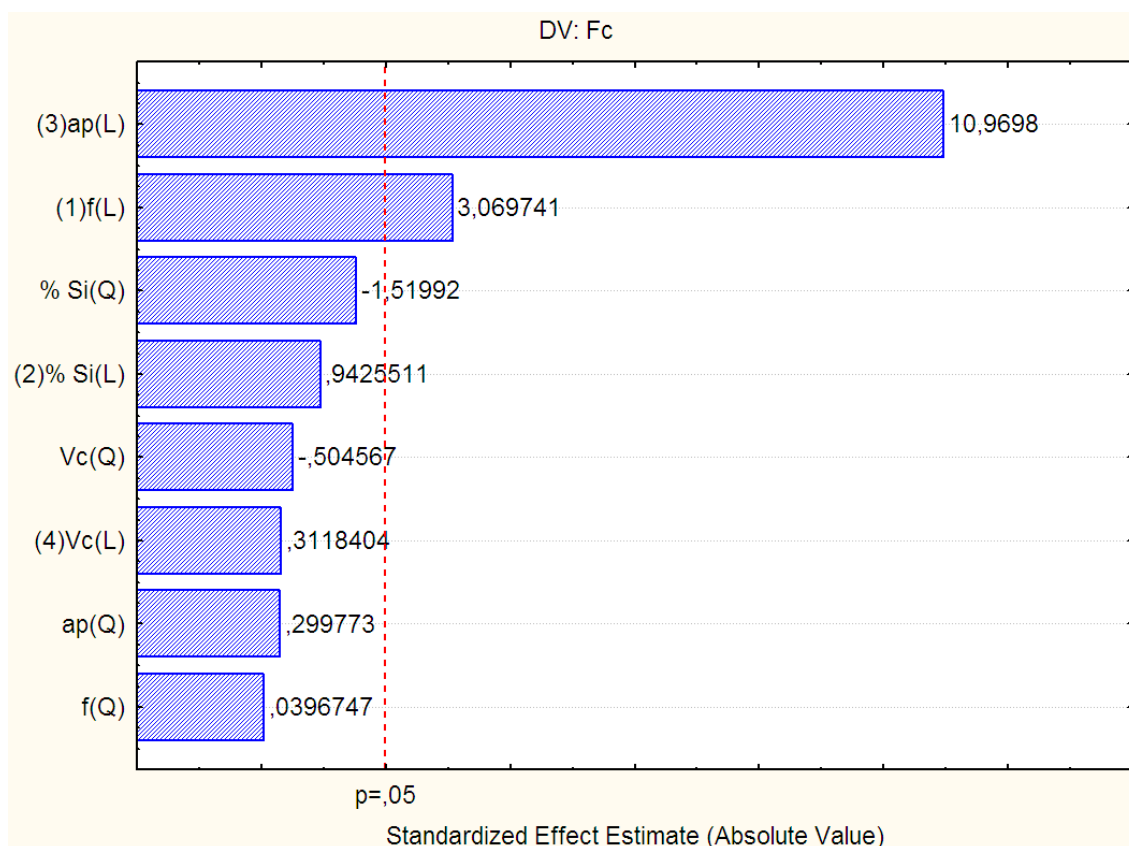


Figura 4.15 - Quantificação dos efeitos significantes na força de corte a baixas velocidade e valores de avanço na usinagem a seco

Os dados apresentados levam a concluir que a variação do teor de silício, em comparação com a variação dos outros parâmetros não é significativa. A profundidade de corte foi comparativamente o parâmetro mais influente seguido do avanço. O aumento da força de corte com o aumento da profundidade já era esperado (Fig. 4.16), uma vez que a área de contato também aumenta, pelo mesmo motivo também, esperava-se que a força de corte aumentasse com o aumento do avanço, segundo Fig. 4.17. O efeito do silício mostrado na Fig. 4.18, sugerindo que estatisticamente a concentração de silício não teve influência na força de corte nas condições utilizadas.

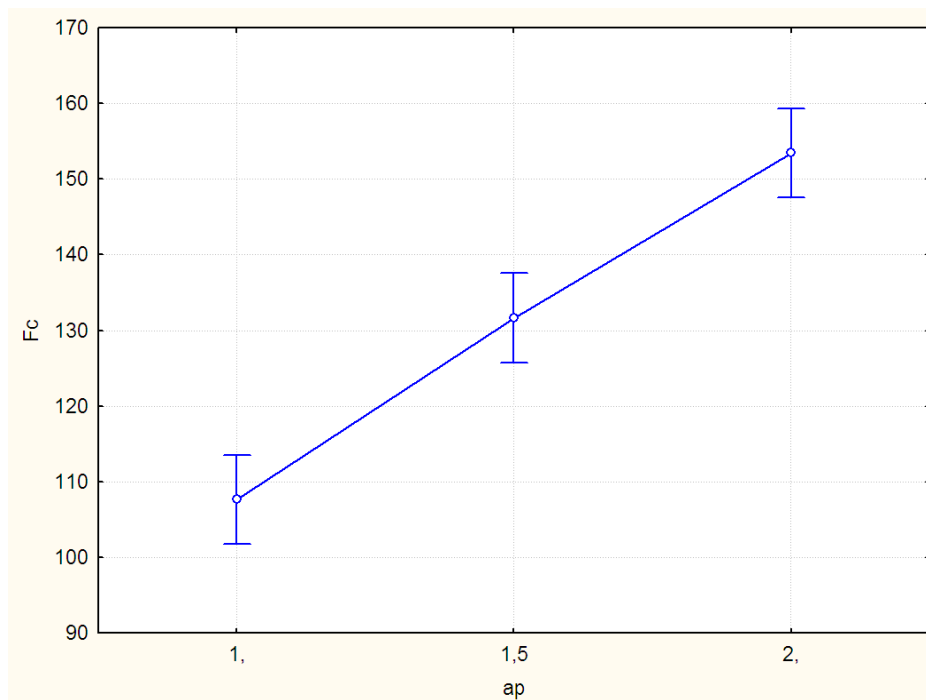


Figura 4.16 - Efeito médio da profundidade de corte na força de corte com baixos valores de avanço na usinagem a seco

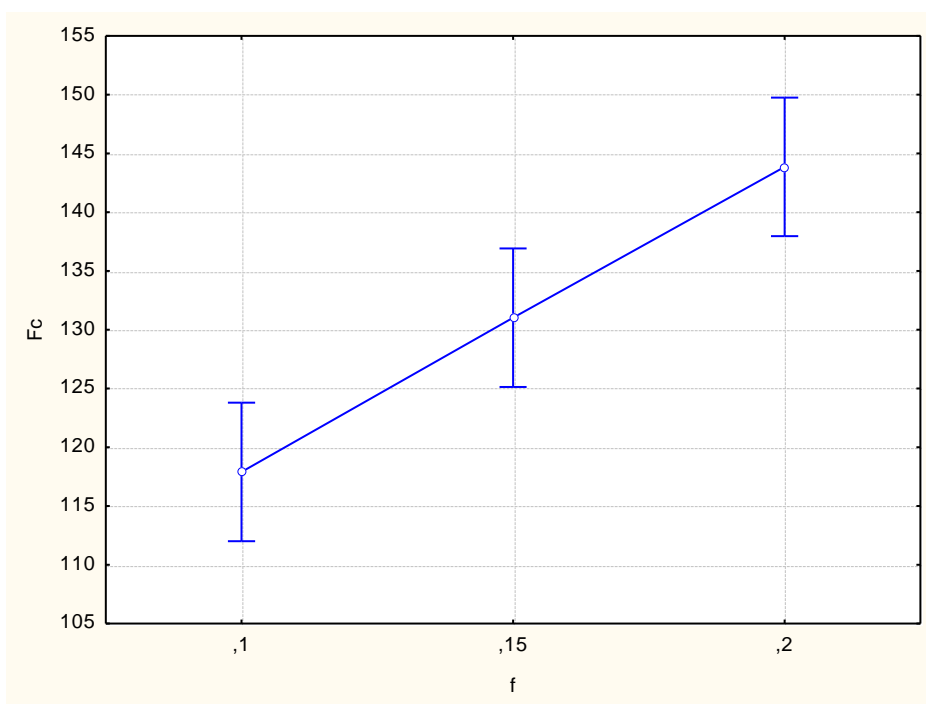


Figura 4.17 – Efeito médio da variação do avanço na força de corte com baixos valores de avanço na usinagem a seco.

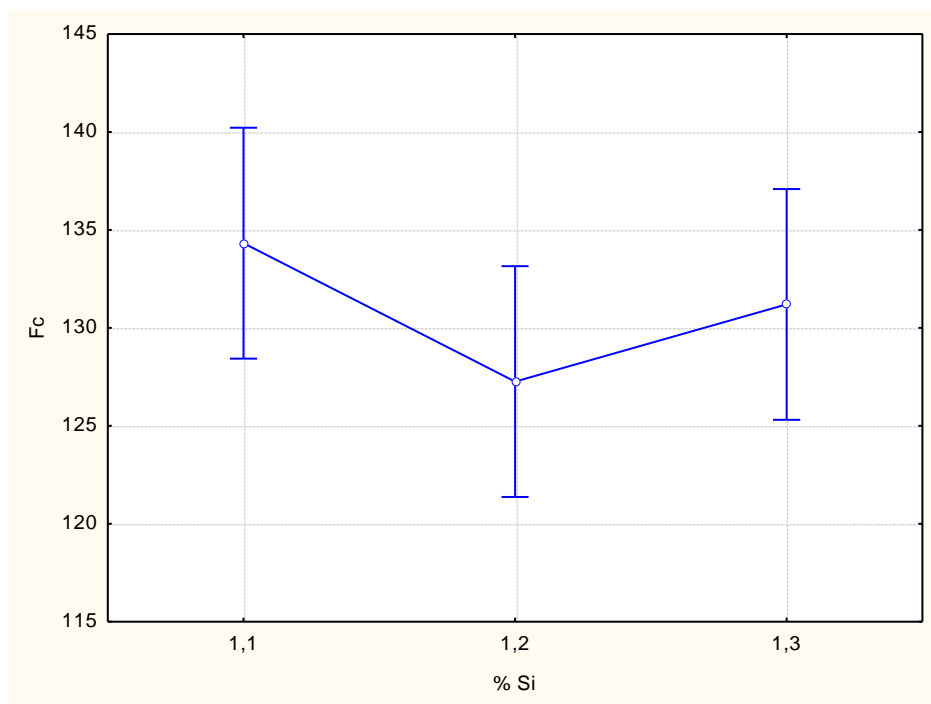


Figura 4.18 - Efeito médio do teor de silício na força de corte com baixos valores de avanço na usinagem a seco

#### 4.2.1.2 Ensaios com altos valores de avanço

Para os valores maiores de avanço a profundidade de corte permaneceu fixa em 2 mm e, após análise estatística, verificou-se quais são os fatores influentes segundo gráfico de Pareto mostrado na Fig. 4.19.

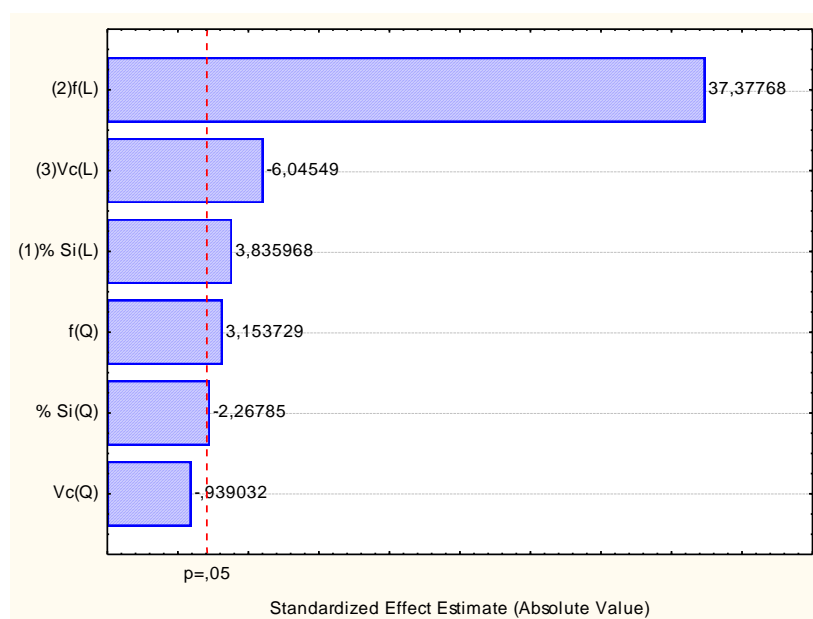


Figura 4.19 - Quantificação dos efeitos significantes na força de corte a baixas velocidade e altos valores de avanço na usinagem a seco

Com uma confiabilidade de 95%, onde o metamodelo explica 99,591% da realidade, conclui-se que o avanço interagindo com as outras variáveis exerce a maior influência na força de corte na região onde pode ocorrer a formação de APC, seguido da velocidade de corte e do teor de silício. Segundo a literatura, a força de corte aumenta linearmente com o avanço. A diminuição da força de corte está relacionada principalmente com o aumento da temperatura e conseqüente diminuição da resistência ao cisalhamento do material. Na faixa de velocidade de corte onde existe a formação de APC, a variação da força de corte está relacionada com alteração da geometria da cunha cortante. Estas relações estão mostradas na Figs. 4.20 e 4.21.

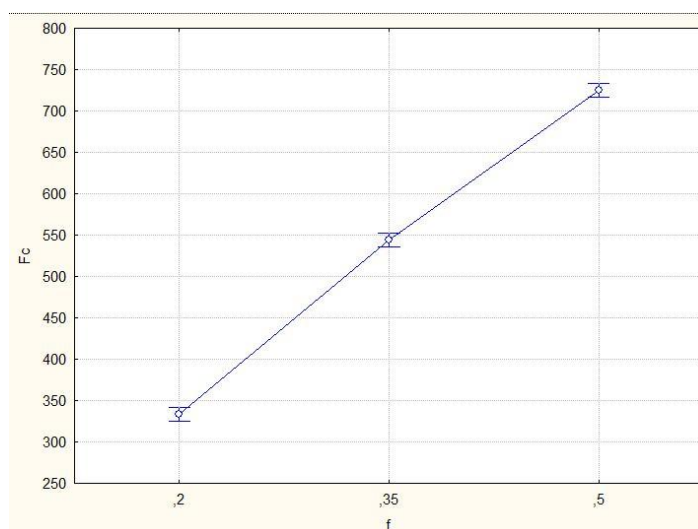


Figura 4.20 - Efeito médio do avanço na força de corte com altos valores de avanço na usinagem a seco

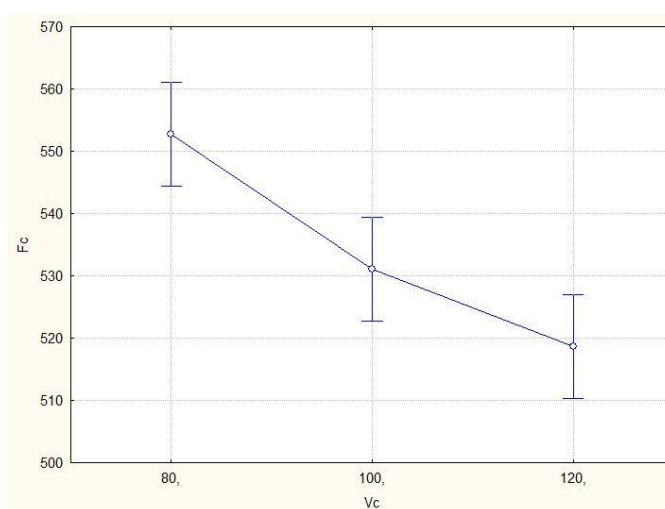


Figura 4.21 - Efeito médio da velocidade de corte na força de corte com altos valores avanço na usinagem a seco

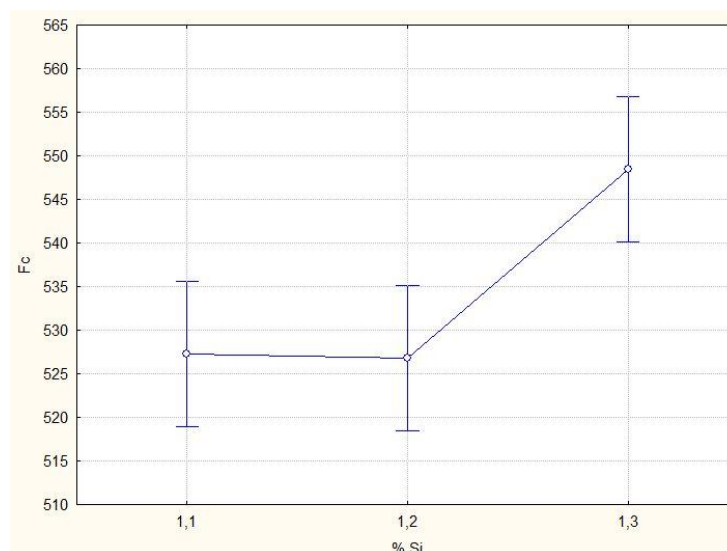


Figura 4.22 - Efeito médio do teor de silício na força de corte com altos valores de avanço na usinagem a seco

Neste caso de análise o teor de silício não teve uma influência muito grande dentre os fatores significativos. Estatisticamente, a força de corte é maior para a liga com teor de silício de 1,3%. Comparando esse efeito com o gráfico da Fig 4.4, pode-se sugerir que o efeito é devido ao aumento da dureza desta liga em relação às outras duas ligas.

#### 4.2.2 Ensaio de força de corte a baixas velocidades de corte com MQF

Por envolver grandes avanços, é esperado que este seja o fator mais influente, como comprovam os resultados e a análise estatística. Porém, quando se usou o MQF, o teor de silício passou a ser mais influente que o fator velocidade de corte (Fig. 4.23). Assim como na usinagem a seco, a força de corte possui valores inferiores na amostra de 1,2% seguido pela amostra 1,1% e 1,3% respectivamente, como mostrado na Fig. 4.24.



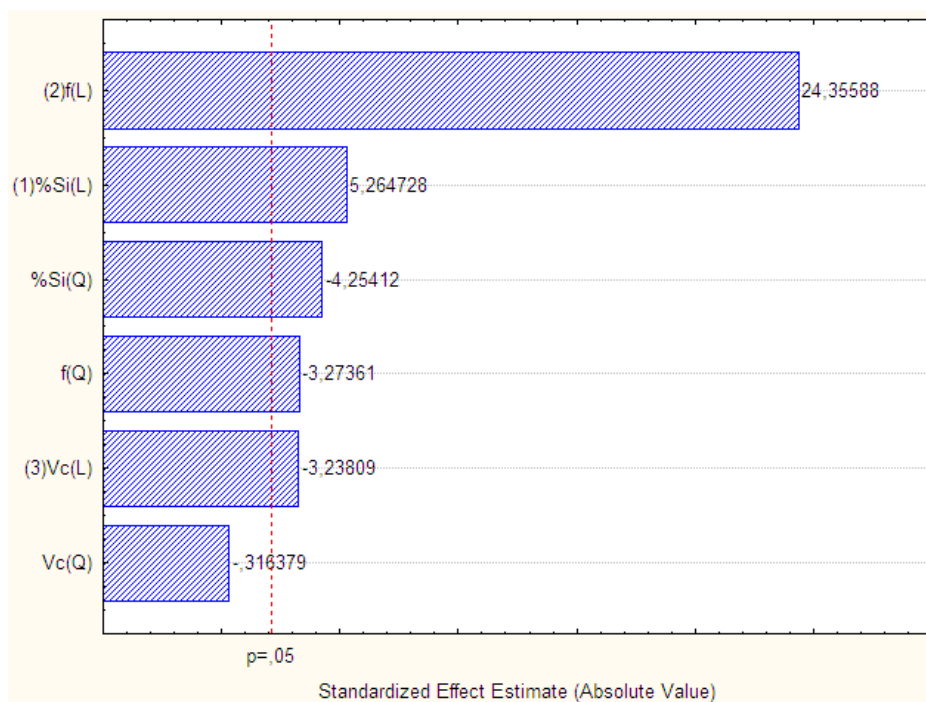


Figura 4.23 - Quantificação dos efeitos significantes na força de corte a baixas velocidade e altos valores de avanço na usinagem com MQF

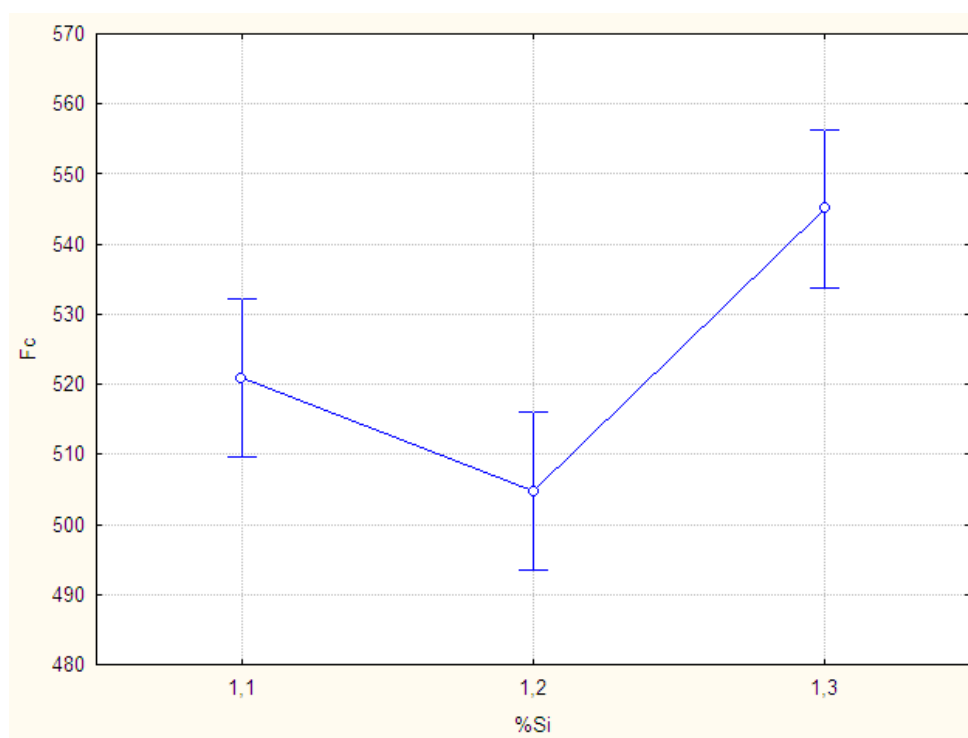


Figura 4.24 - Efeito médio do teor de silício na força de corte com altos valores de avanço na usinagem com MQF

#### 4.2.3 Ensaio de força de corte a baixas velocidades de corte com jorro

Para os ensaios feitos com fluido de corte aplicado na forma de jorro ( $R^2 = 99,60$ ), a velocidade de corte exerce uma influência significativa maior que o efeito do teor de silício (Fig. 4.25). O teor de silício por sua vez exerce uma influência pequena (Fig. 4.26), sendo que seu efeito médio na força de corte mostra valores superiores ao da usinagem com MQF, ou seja, comparativamente a usinagem com MQF mostrou valores menores de força de corte em todos os ensaios com altos valores de avanço.

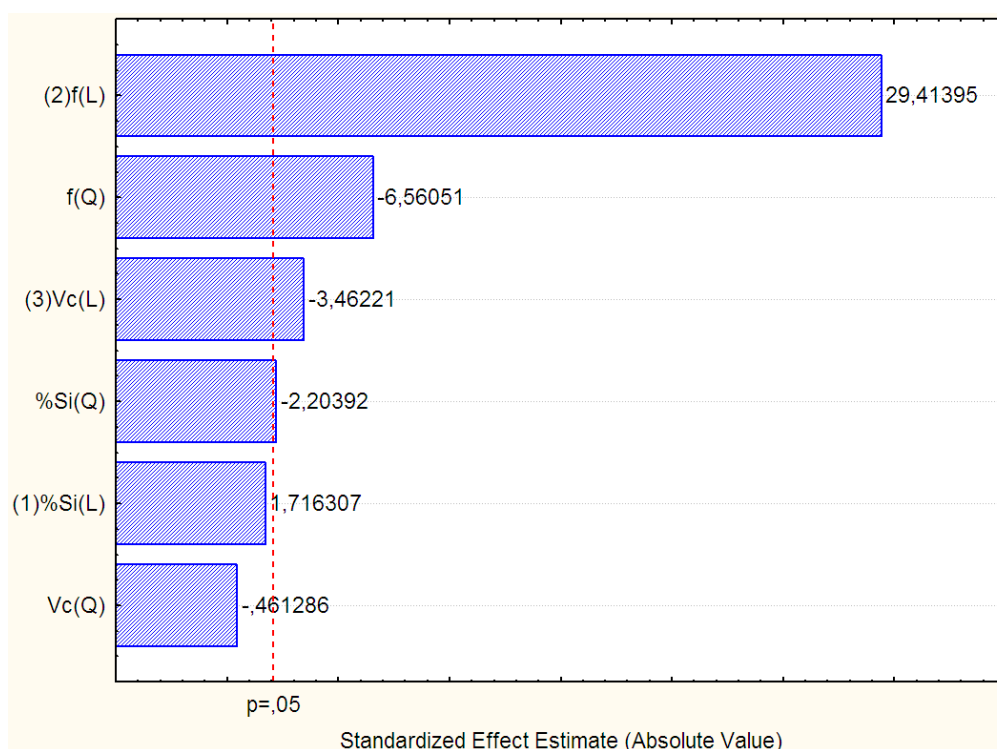


Figura 4.25 - Quantificação dos efeitos significantes na força de corte a baixas velocidade e altos valores de avanço na usinagem com jorro

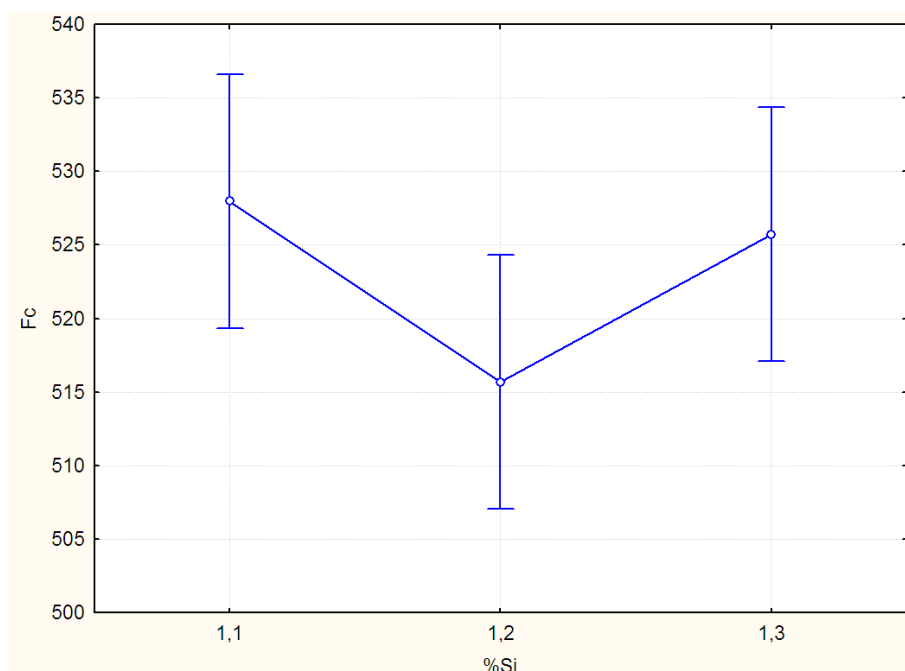


Figura 4.26 - Efeito médio do teor de silício na força de corte com altos valores de avanço na usinagem com jorro

#### 4.2.4 Ensaios de força de corte a altas velocidades de corte a seco

##### 4.2.4.1 Ensaios com baixos valores de avanço

Os resultados obtidos nesta etapa (Fig. 4.27) mostram que a força de corte diminui com a velocidade de corte, e aumenta proporcionalmente com o avanço, como previsto pela literatura. O silício se mostrou influente mais que os outros fatores, principalmente no ponto de inflexão (Si(Q)) da curva de superfície de resposta conforme mostrados nas Figs. 4.28, 4.29 e 4.30.

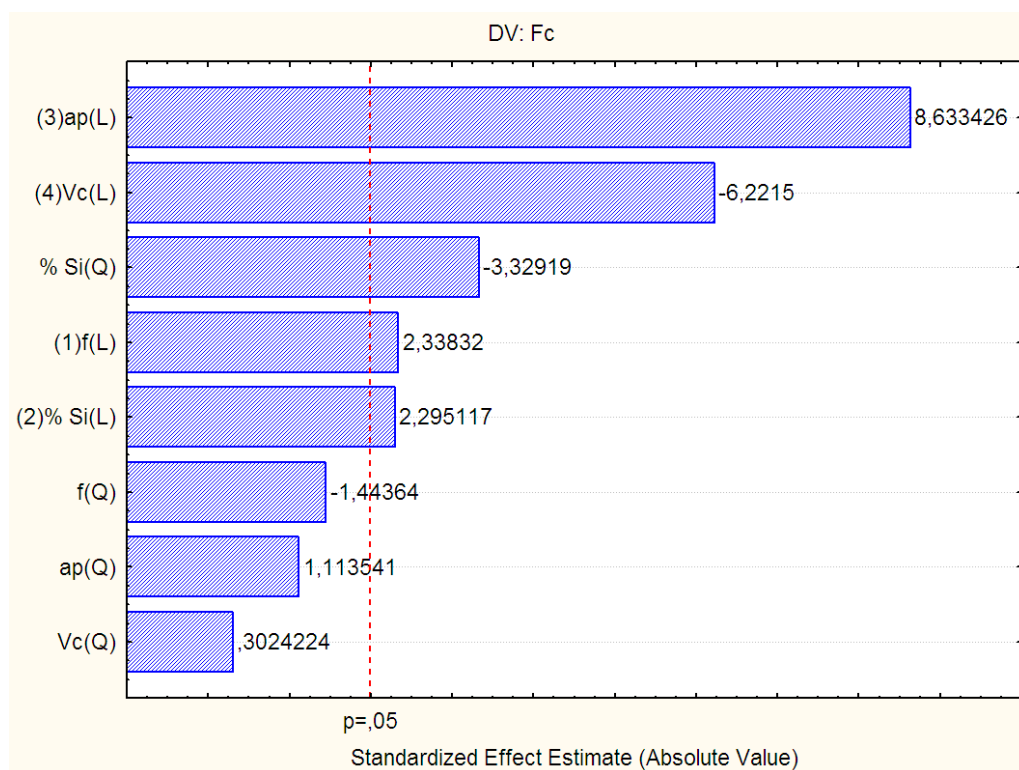


Figura 4.27 - - Estimativa de efeitos significantes na força de corte a altas velocidade de corte e baixos valores de avanço na usinagem a seco

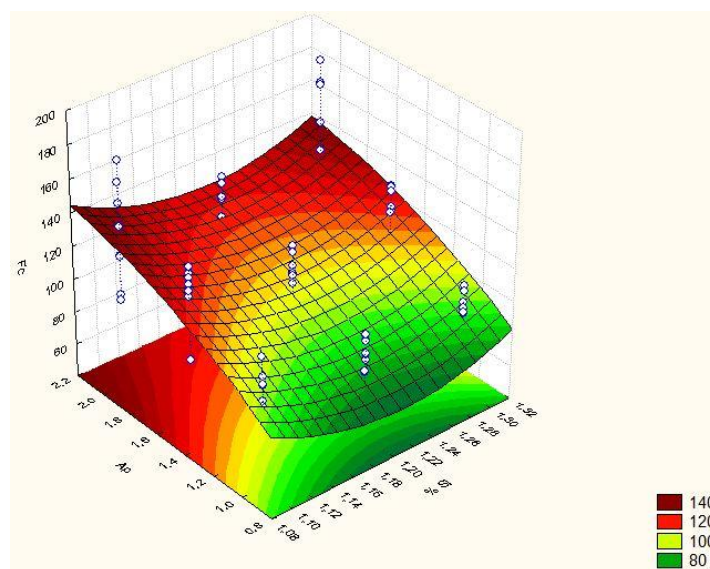


Figura 4.28 - Superfície de resposta da Fc em função do teor de silício e da profundidade de corte (ap) na usinagem a seco

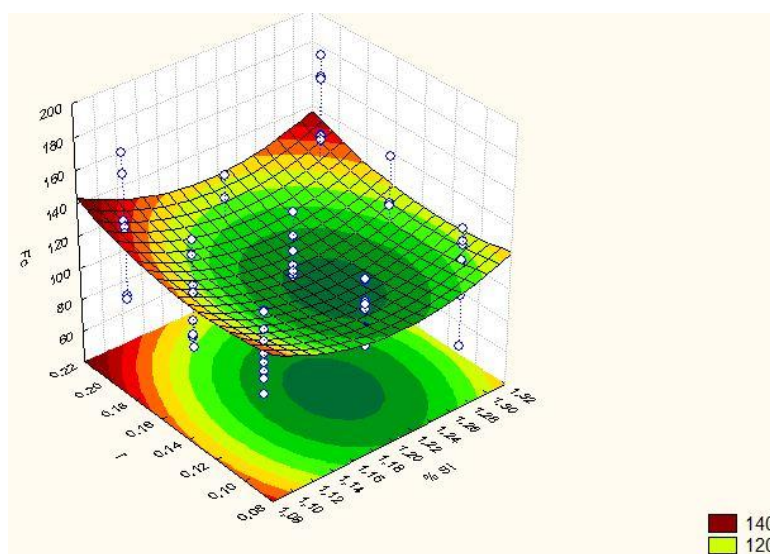


Figura 4.29 - Superfície de resposta da Fc em função do teor de silício e do avanço (f) na usinagem a seco

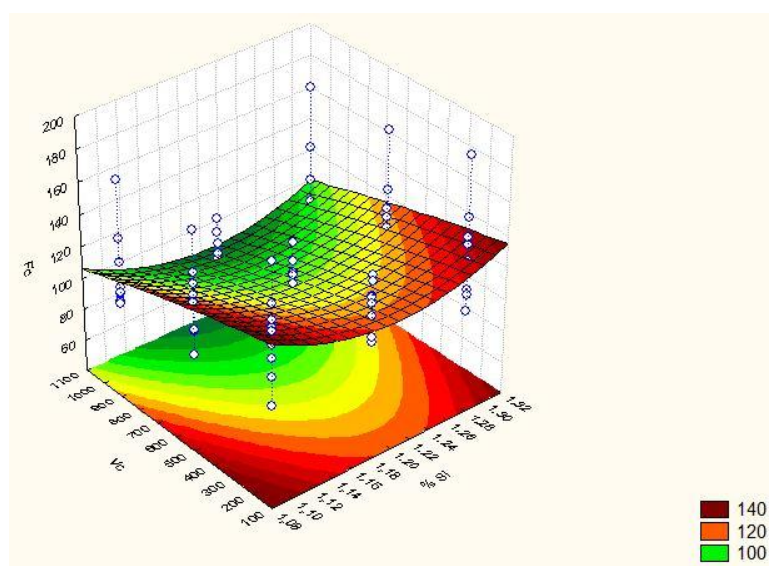


Figura 4. 30 - Superfície de resposta da Fc em função do teor de silício e da velocidade de corte ( $V_c$ ) na usinagem a seco

#### 4.2.4.2 Ensaios com altos valores de avanço

Para os ensaios obteve-se que o teor de silício é o fator com menor influência, sendo que o avanço e a velocidade de corte exercem influência significativa conforme mostrado na Fig. 4.31 a seguir.

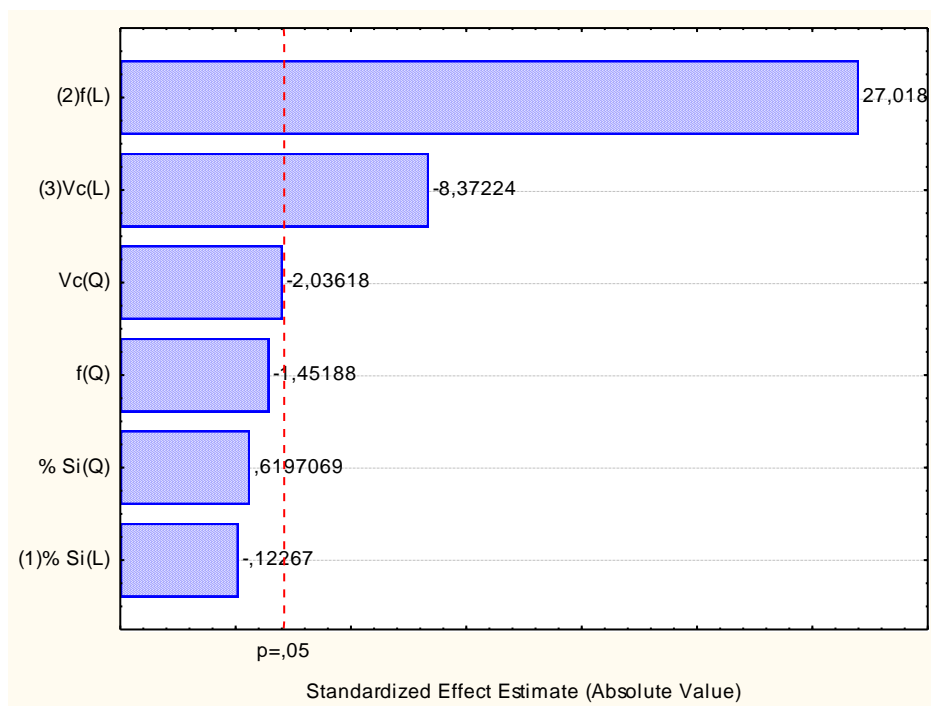


Figura 4.31 - Estimativa de efeitos significantes na força de corte a altas velocidade de corte e altos valores de avanço a seco

#### 4.2.5 Ensaios de força de corte a altas velocidades de corte com MQF

A Fig. 4.32 mostra o resultado da análise estatística para esta etapa. Os testes mostraram que para valores altos de avanço essa variável é sempre influente, assim como a velocidade de corte. O teor de silício contribui com uma influência menor, porém, novamente se mostra influente no ponto de inflexão da curva de superfície de resposta, mostrada nas Figs. 4.33 e 4.34.

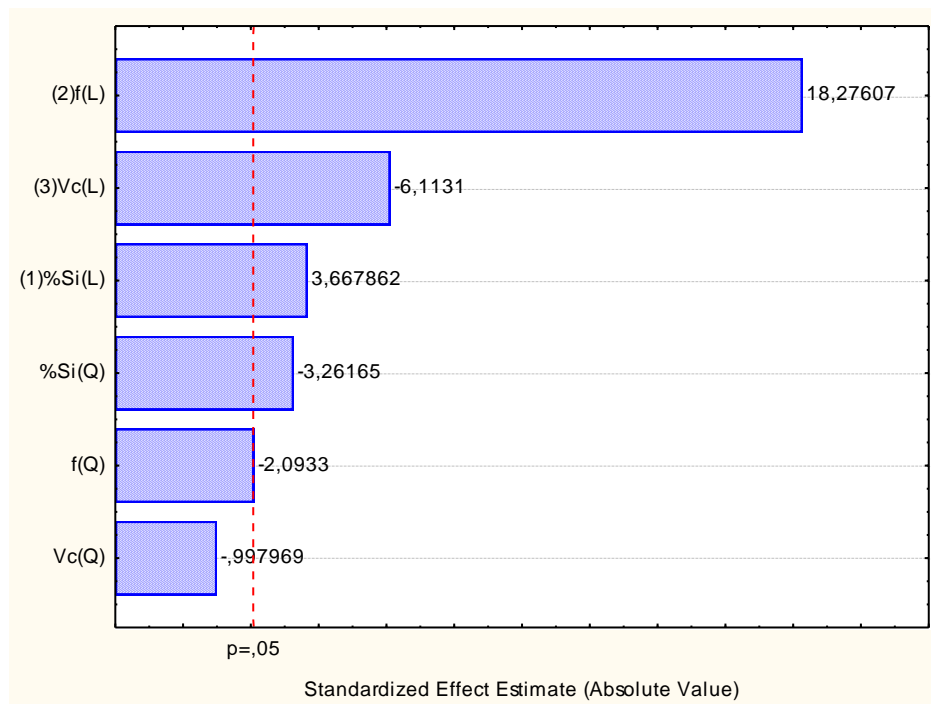


Figura 4.32 - Estimativa de efeitos significantes na força de corte a altas velocidade de corte e altos valores de avanço na usinagem com MQF

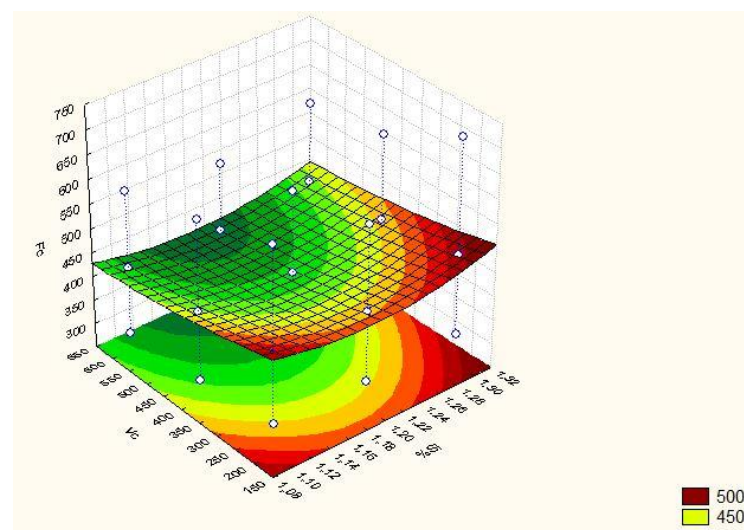


Figura 4.33 - Superfície de resposta da  $F_c$  em função do teor de silício e da velocidade de corte ( $V_c$ ) na usinagem com MQF

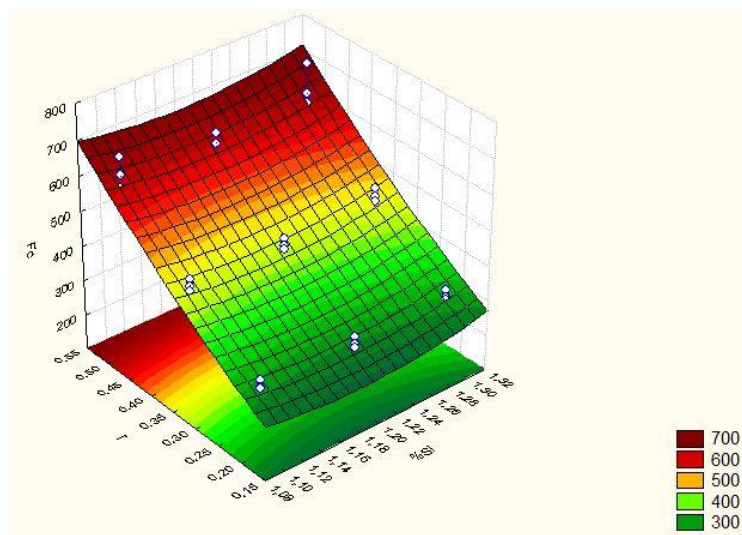


Figura 4.34 - Superfície de resposta da  $F_c$  em função do teor de silício e do avanço ( $f$ ) na usinagem com MQF

#### 4.2.6 Ensaio de força de corte a altas velocidades de corte com jorro

Nos testes utilizando fluido de corte na forma de jorro, o silício não teve influência estatisticamente significativa, diferente dos testes em condições a seco e MQF. Desta forma, pode-se sugerir que o fluido de corte exerce uma influência significativa. Os parâmetros mais influentes se comportam da mesma maneira mostrada anteriormente comparados com MQF. O resultado da análise estatística está mostrado na Fig. 4.35.



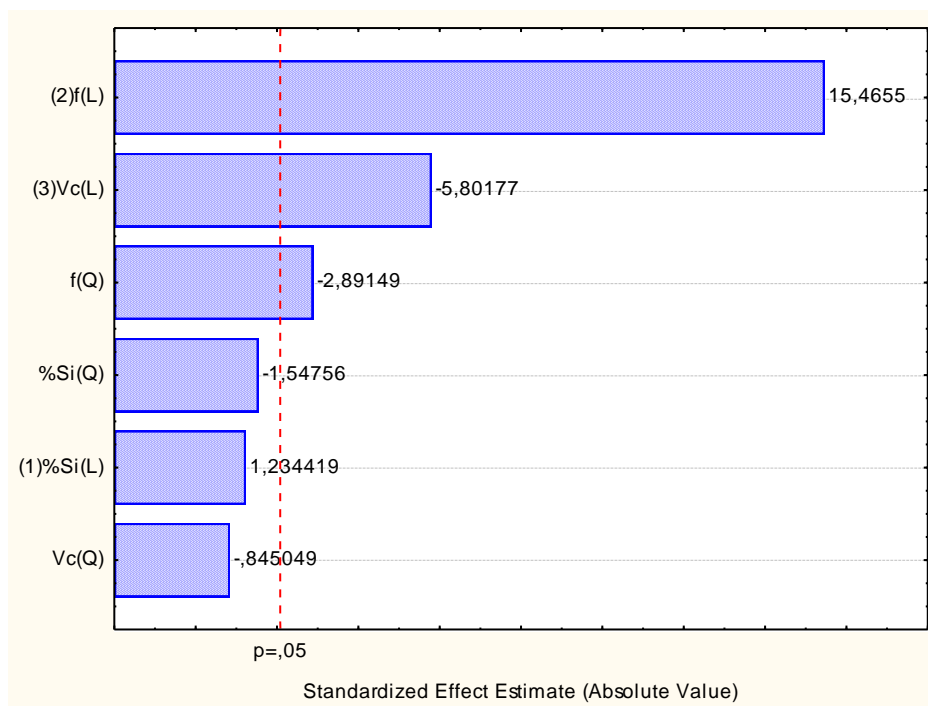


Figura 4.35 - Estimativa de efeitos significantes na força de corte a altas velocidade de corte e altos valores de avanço na usinagem com jorro

### 4.3 Ensaios de rugosidade superficial

No primeiro planejamento de experimentos obteve-se graficamente a visualização da influência do teor de silício no acabamento superficial do material utilizado. Em todos os ensaios obteve-se uma curva de tendência que obedecia a mesma ordem de qual material possuía o menor e o maior valor de rugosidade, porém, os valores eram muito próximos. À medida que o valor da profundidade de corte aumentava, os valores de rugosidade se distanciaram de forma significativa, Figs. 4.36, 4.37 e 4.38.

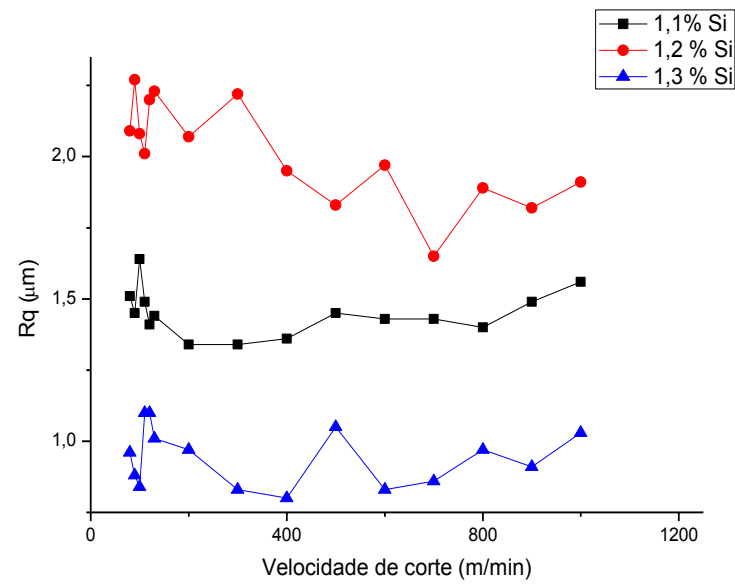


Figura 4.36 - Rugosidade superficial versus velocidade de corte, avanço 0,2 m/volta, ap 1mm, usinagem a seco

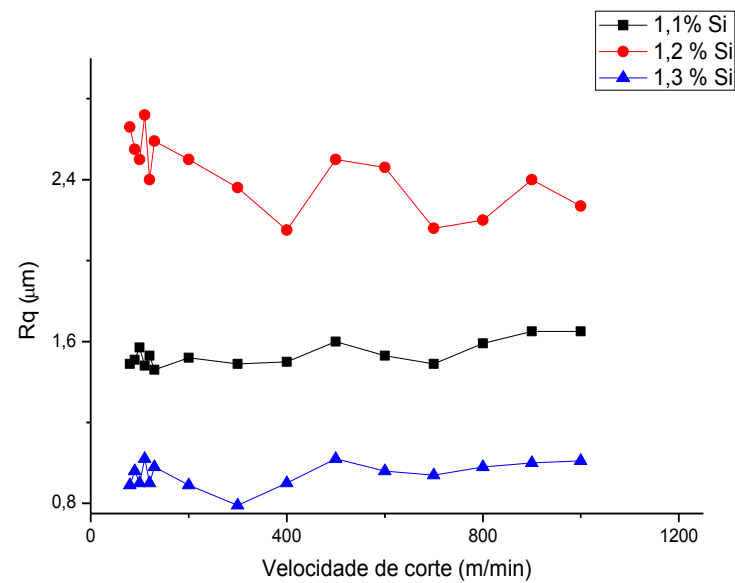


Figura 4.37 - Rugosidade superficial versus velocidade de corte, avanço 0,2 m/volta, ap 1,5mm, usinagem a seco

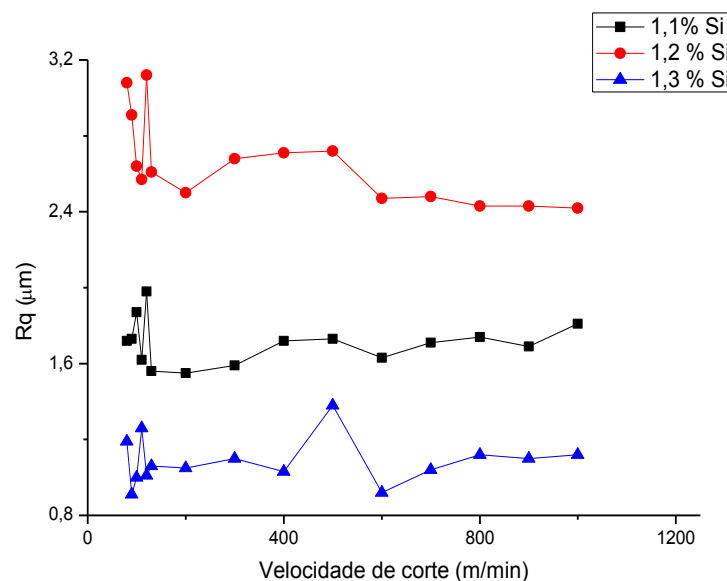


Figura 4.38 - Rugosidade superficial versus velocidade de corte, avanço 0,2 m/volta, ap 2mm, usinagem a seco

Uma vez que a rugosidade superficial teoricamente é função apenas do avanço da ferramenta e do raio de ponta da mesma, qualquer valor fora da curva teórica pode ser atribuído principalmente à vibração por algum desvio de posição no ajuste da peça ou da ferramenta, além de defeitos na peça, devido talvez ao resfriamento não homogêneo. Nota-se uma variação maior na região de velocidades de corte menores, indicando a presença de aresta postiça de corte, onde os valores de rugosidade são maiores.

No segundo planejamento experimental ocorreu uma similaridade com os testes de força de corte, com relação às discussões, os testes foram feitos com um diâmetro menor dos corpos de prova, portanto os resultados não podem ser comparados diretamente. As Figs. 4.39, 4.40 e 4.41 a seguir mostram a variação da rugosidade  $R_q$  com a velocidade de corte, para usinagem a seco e com fluido aplicado MQF.

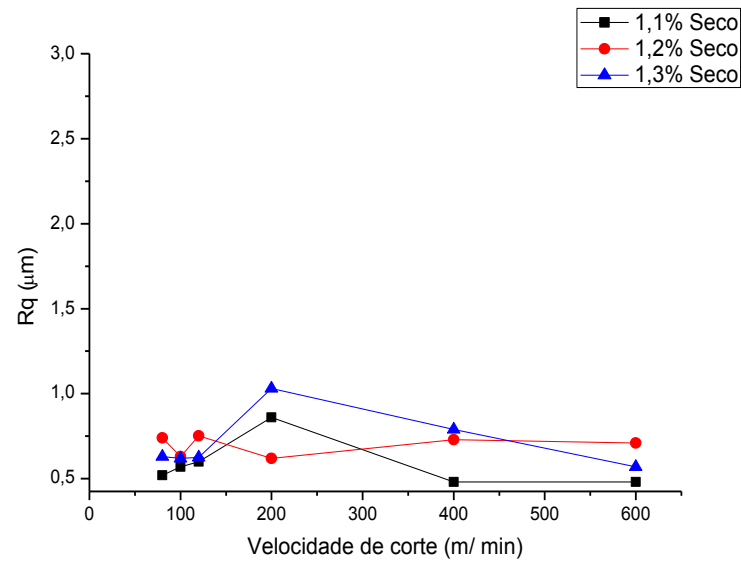


Figura 4.39 - Rugosidade superficial versus velocidade de corte, avanço 0,2 m/volta, profundidade de corte 2 mm, usinagem a seco

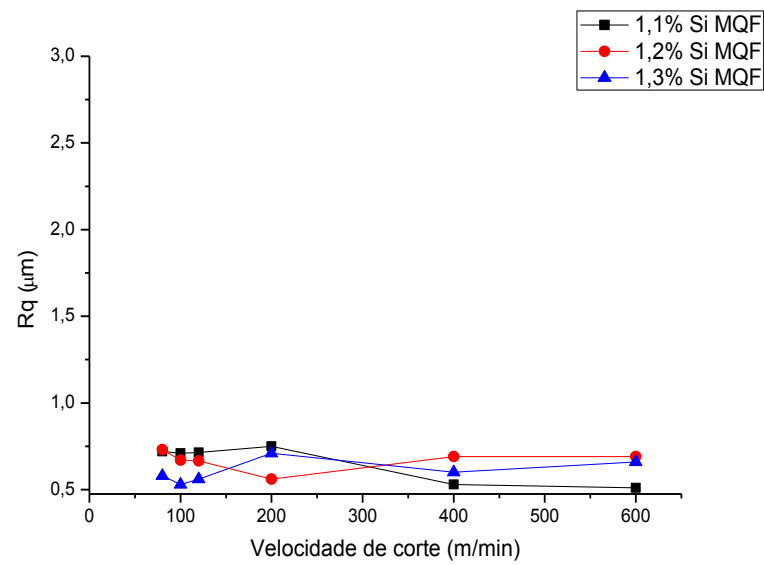


Figura 4.40 - Rugosidade superficial versus velocidade de corte, avanço 0,2 m/volta, profundidade de corte 2 mm, fluido na forma MQF

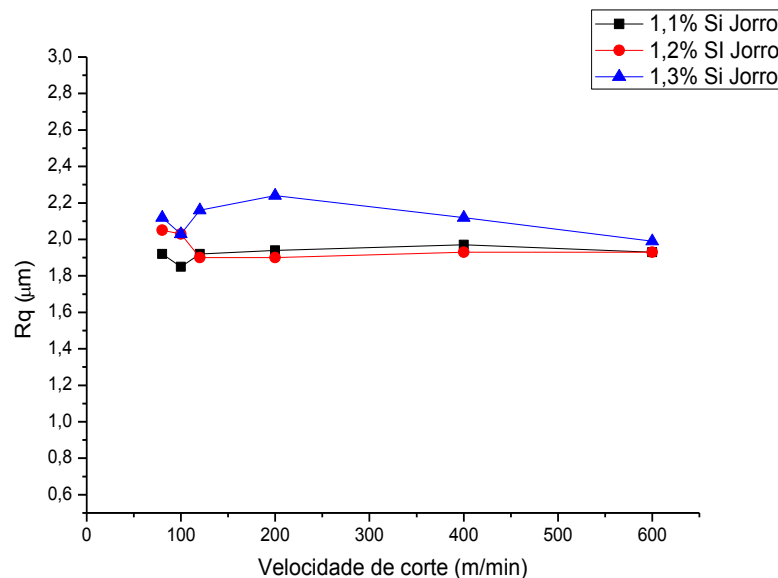


Figura 4.41 - Rugosidade superficial versus velocidade de corte, avanço 0,2 m/volta, profundidade de corte 2 mm, fluido na forma de jorro

Segundo estudos anteriores, a utilização de fluido de corte no processo de torneamento de alumínio tem como consequência a diminuição da rugosidade se comparado ao mesmo processo a seco, porém, não foi isso o observado nos ensaios. Com a utilização do fluido de corte os valores de rugosidade medidos foram superiores às condições de MQF e a seco.

#### 4.3.1 Ensaio de rugosidade a baixas velocidades de corte a seco

##### 4.3.1.1 Ensaios com baixos valores de avanço

O resultado da análise estatística está mostrado na Fig. 4.42. Segundo esta figura, o teor de silício é o parâmetro mais significativo. A Fig. 4.43 mostra o efeito individual do teor de silício na rugosidade  $R_q$ . Neste caso, a liga com maior teor de Si, onde a dureza e as forças de corte são maiores, conseguem-se menores rugosidades. A Fig. 4.44 mostra a superfície de resposta para este caso.

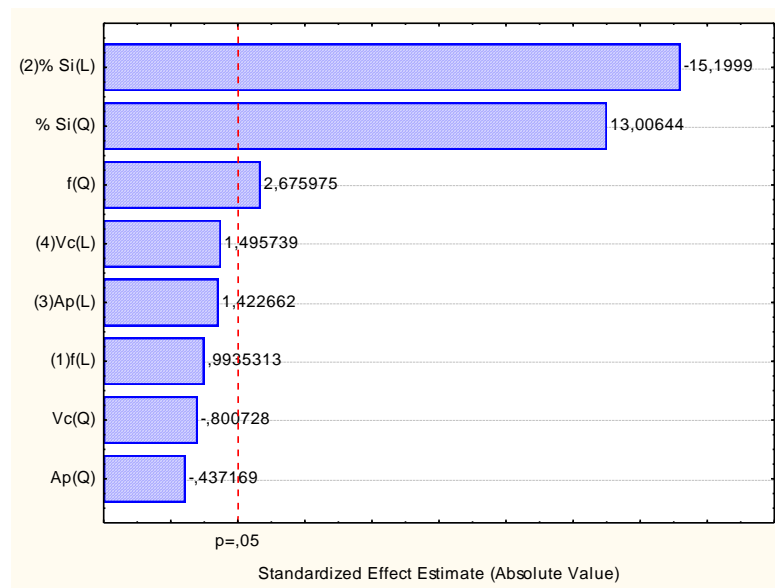


Figura 4.42 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a baixas velocidades de corte e baixos valores de avanço na usinagem a seco

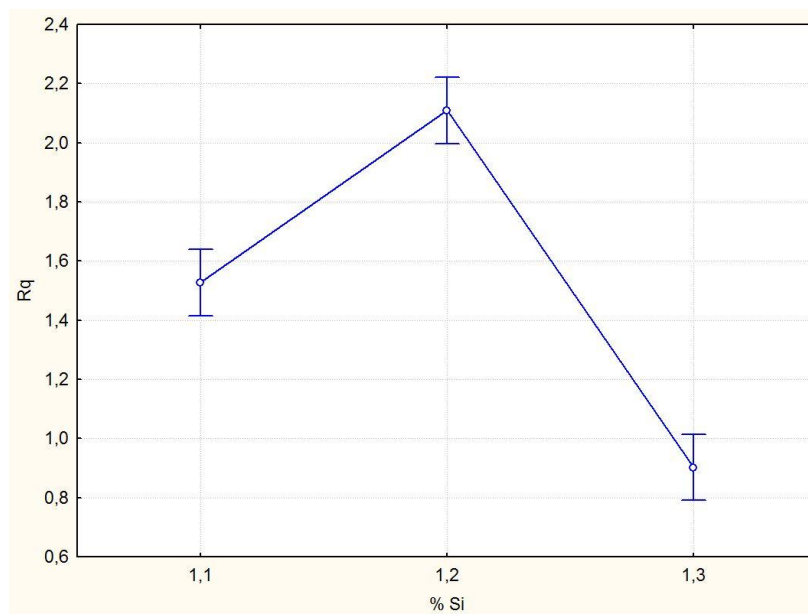


Figura 4.43 - Efeito médio do teor de silício na rugosidade com baixas velocidades de corte, baixos valores de avanço na usinagem a seco

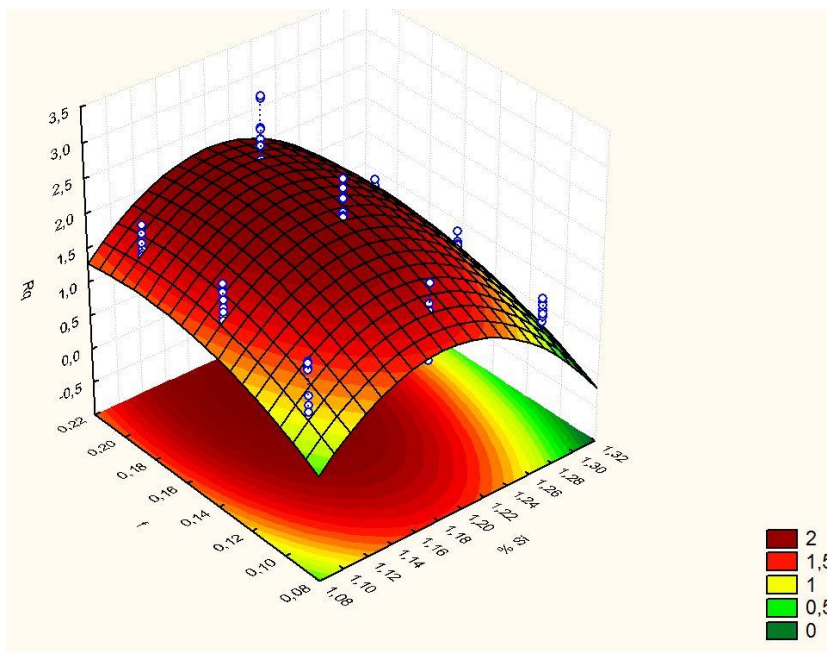


Figura 4.44 - Superfície de resposta da rugosidade em função do teor de silício e do avanço (f) na usinagem a seco

#### 4.3.1.2 Ensaios com altos valores de avanço

Neste caso, o avanço da ferramenta é mais influente que o teor de silício na avaliação da qualidade superficial da peça, praticamente de maneira linear, como esperado, uma vez que a rugosidade ideal é função apenas do avanço e do raio de ponta da ferramenta. O resultado é ilustrado na Fig. 4.45.

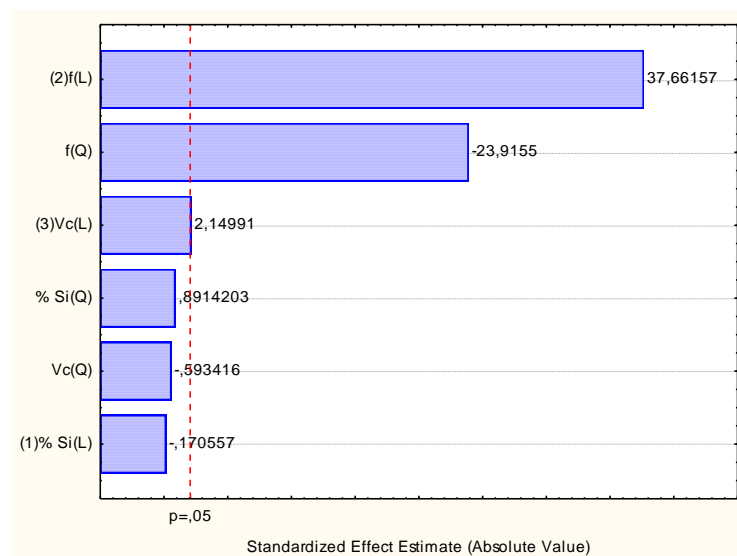


Figura 4.45 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a baixas velocidades de corte e altos valores de avanço na usinagem a seco

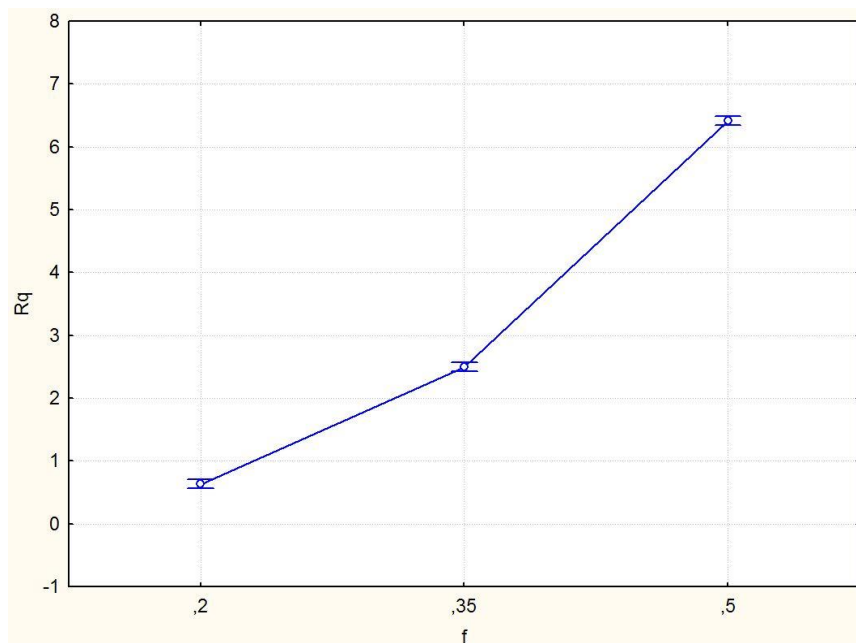


Figura 4.46 - Efeito médio do teor de silício na rugosidade com baixas velocidades de corte, altos valores de avanço na usinagem a seco

#### 4.3.2 Ensaio de rugosidade a baixas velocidades na usinagem com MQF

De acordo com os resultados o teor de Si é um parâmetro influente, tem pequena influência na rugosidade, na condição de corte de altos valores de avanço e baixas velocidades de corte utilizando-se MQF (Fig. 4.47)



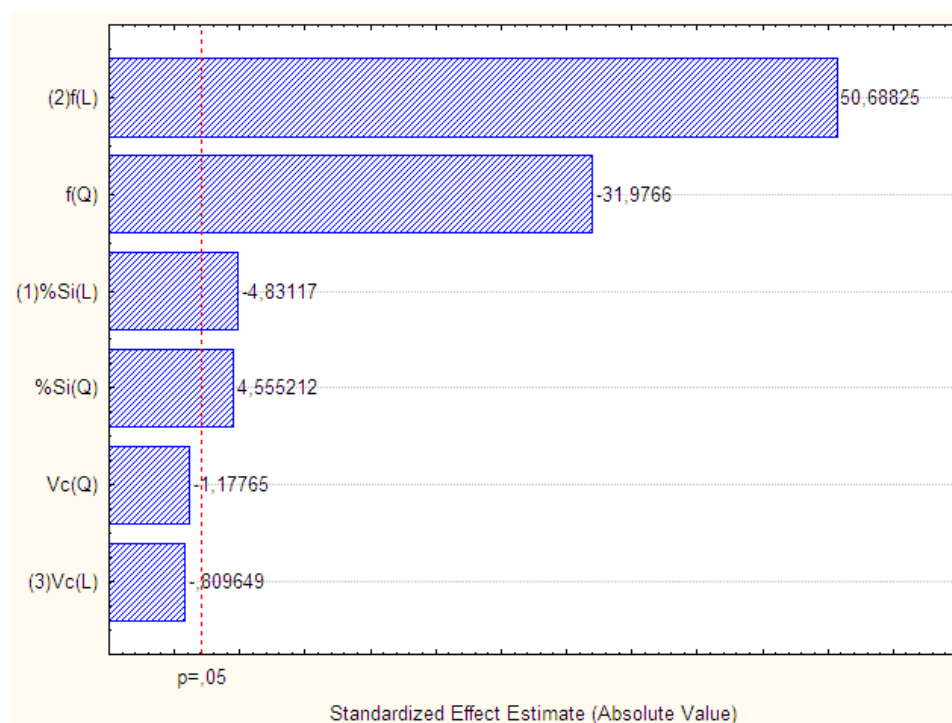


Figura 4.47 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a baixas velocidades de corte e altos valores de avanço na usinagem com MQF

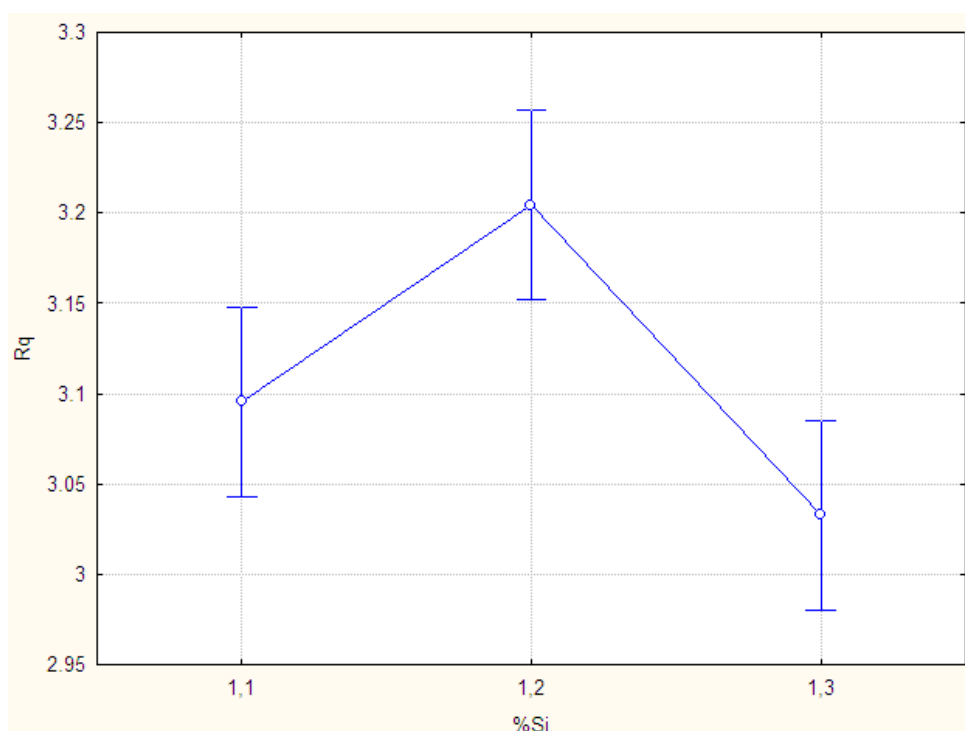


Figura 4.48 - Efeito médio do teor de silício na rugosidade com baixas velocidades de corte, altos valores de avanço na usinagem com MQF

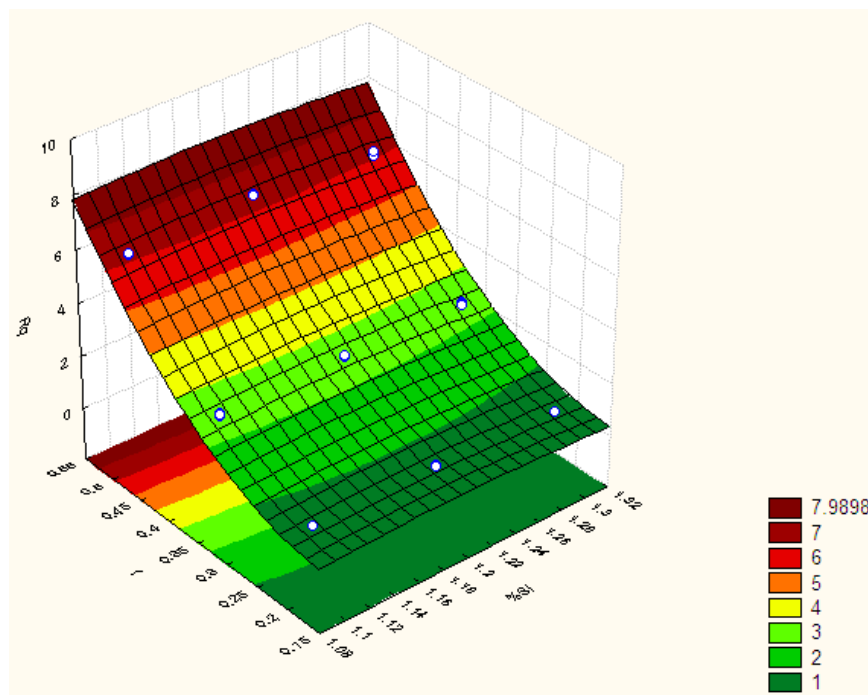


Figura 4.49 - Superfície de resposta da rugosidade em função do teor de silício e do avanço (f) na usinagem com MQF

#### 4.3.3 Ensaio de rugosidade a baixas velocidades de corte com jorro

Nesta situação, o teor de silício estatisticamente não tem efeito na rugosidade  $R_q$ , como mostra o diagrama da Fig. 4.50. Comparando com os resultados utilizando-se MQF a rugosidade mostrou-se um pouco maior, esse efeito pode ser atribuído à posição a qual o fluido foi aplicado (sobre cabeça), podendo anular seu efeito lubrificante e também dificultando um pouco a saída do cavaco.

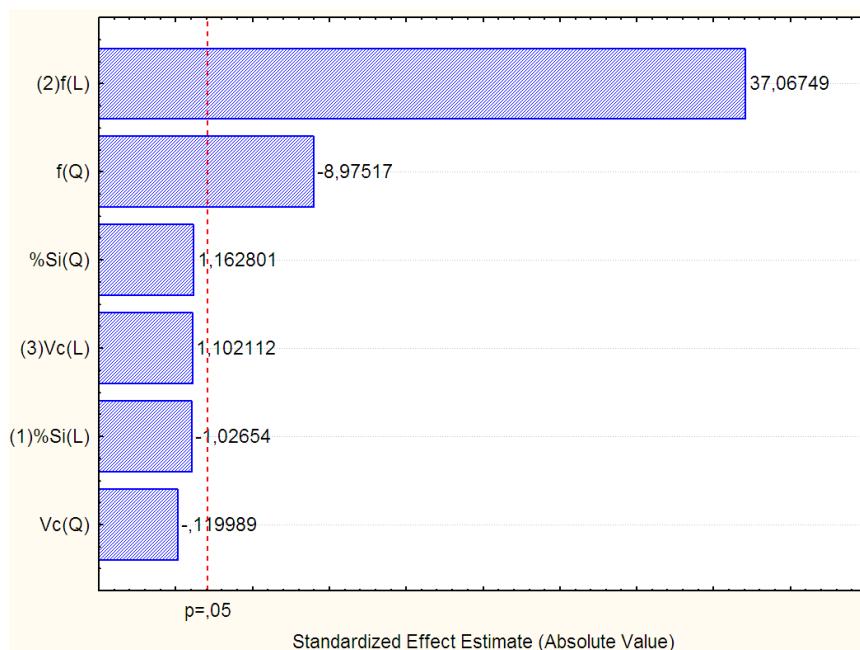


Figura 4.50 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a baixas velocidades de corte e altos valores de avanço na usinagem com jorro

#### 4.3.4 Ensaios de rugosidade a altas velocidades de corte a seco

##### 4.3.4.1 Ensaios com baixos valores de avanço

Em velocidades de corte mais elevadas o avanço também influencia de maneira significativa na rugosidade superficial.

O teor de silício influencia de maneira significativa, igual como mostra a Fig. 4.51. A curva de tendência contendo os valores médios durante os ensaios é mostrado na Fig. 4.52, para os testes com as duas faixas de velocidade de corte (alta e baixa) e profundidade de corte 2 mm. Para as outras profundidades a diferenciação da rugosidade não é bem definida como a mostrada abaixo, mas existe uma tendência de que na análise dos dados os valores da amostra contendo 1,2% de silício mostrou-se, na maioria dos pontos, maior que as outras e a amostra de 1,3% se comportou sempre com os menores valores de rugosidade

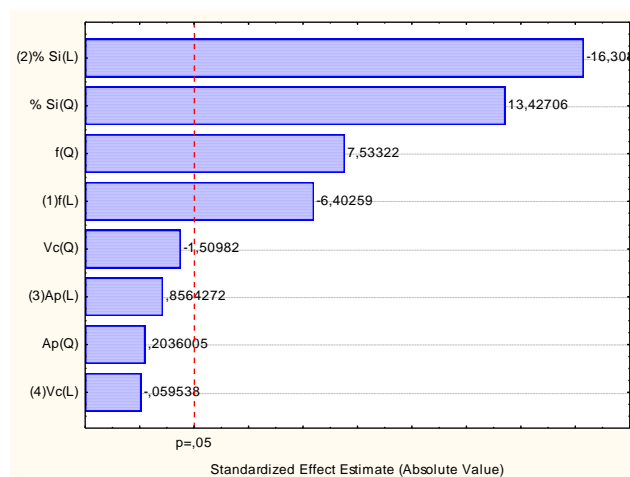


Figura 4.51 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a altas velocidades de corte e baixos valores de avanço na usinagem a seco

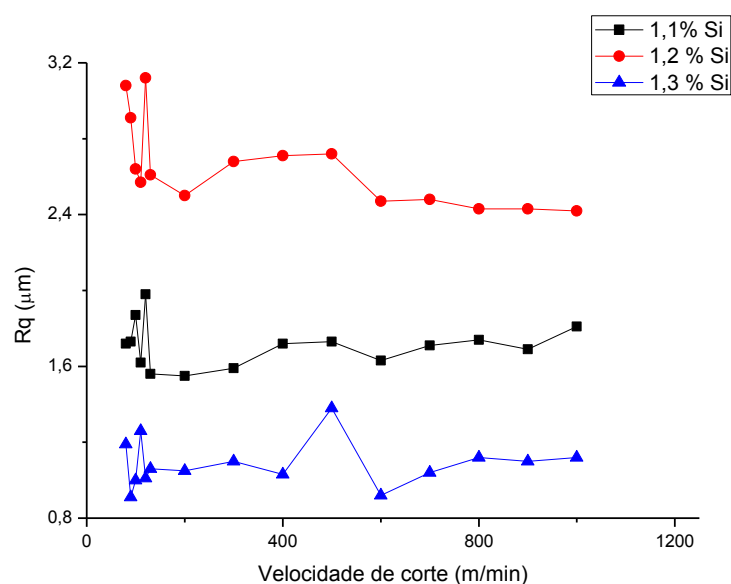


Figura 4.52 - Rq x velocidade de corte, ap 2 mm

Os valores mais elevados fora da curva, provavelmente são causados por vibrações decorrentes do posicionamento do material na máquina ou por falhas existentes no interior do mesmo. A vibração durante a usinagem não foi medida neste trabalho.

#### 4.3.4.2 Ensaios com altos valores de avanço

A rugosidade é mais influenciada nas situações com maiores valores de avanço em velocidades de corte mais altas. No entanto, estatisticamente o teor de Si não tem influência na rugosidade, como mostra o diagrama da Fig. 4.53.

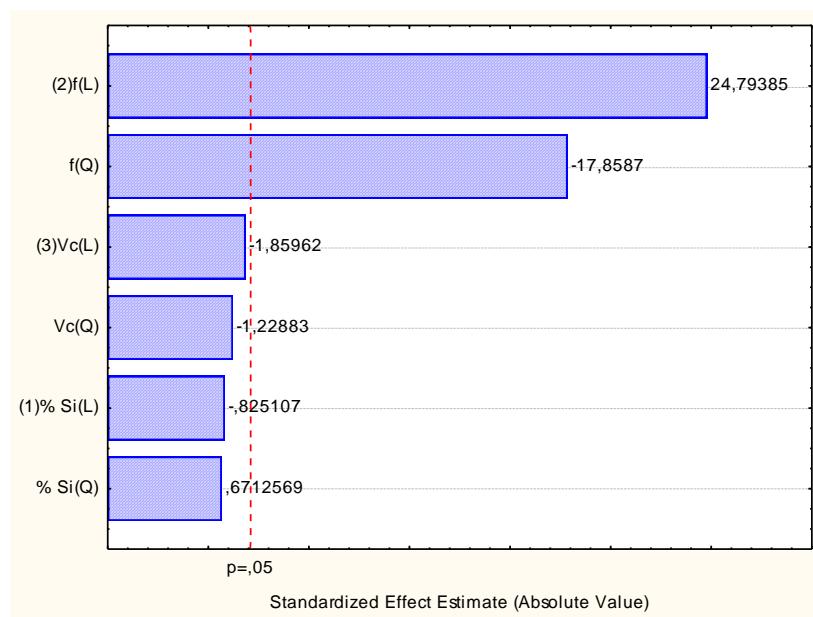


Figura 4.53 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a altas velocidades de corte e altos valores de avanço na usinagem a seco

#### 4.3.5 Ensaios de rugosidade a altas velocidades de corte com MQF

Neste caso a velocidade de corte se mostra na maioria das vezes menos significativa que o avanço, como mostra a Fig. 4.54. O avanço se mostra, em quase todas as condições, o fator mais influente, segundo já esperado, já que a rugosidade teoricamente é função apenas do avanço e do raio de ponta da ferramenta. Novamente o Si não tem efeito estatístico na rugosidade  $R_q$ .

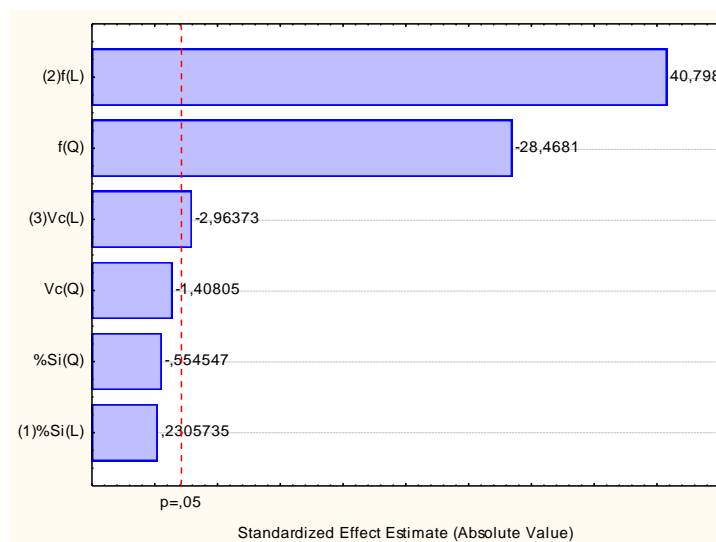


Figura 4.54 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a altas velocidades de corte e altos valores de avanços na usinagem com MQF

#### 4.3.6 Ensaios de rugosidade a altas velocidades de corte com jorro

Nesta situação, apenas o avanço tem efeito na rugosidade, como sugere a Fig. 4.55. E, novamente, não é observado efeito do Si.

Os ensaios eram feitos em sequência, ou seja, assim que se completava uma passada da ferramenta sobre o material fazia-se a medição da rugosidade da peça. Os avanços menores foram escolhidos objetivando prioritariamente a análise da rugosidade, uma vez que se o valor do avanço, dado em mm/ver é pequeno, a rugosidade teoricamente tem que ser menor.

Os avanços maiores foram escolhidos objetivando a análise da força de corte, pois, em alguns casos, a rugosidade superficial não ser um fator muito importante, e sim a velocidade de fabricação da peça.

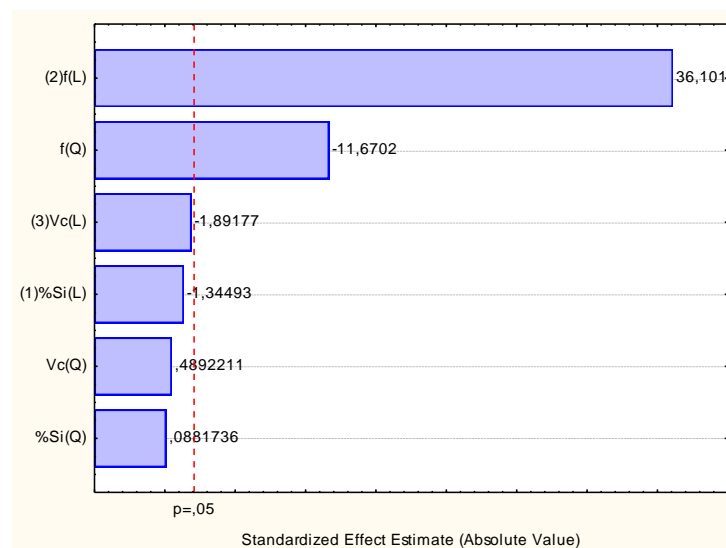


Figura 4.55 - Estimativa de efeitos significantes na rugosidade a altas velocidades de corte e altos valores de avanços na usinagem com jorro

Como o diâmetro do corpo de prova pode ter influencia no resultado, foi retirado uma amostra para corpo de prova de 250 mm de diâmetro para análise da dureza ao longo do raio. Fez-se a medição de dureza partindo-se a 20 mm do centro com distâncias de 10 mm cada uma até atingir a extremidade do círculo com valores encontrados segundo a Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Valores de dureza ao longo do raio

Distância à partir do centro (mm)	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20
Dureza (Brinell)	107	104	103	102	102	103	103	102	99,5	98,35	104

Apenas pelos valores encontrados não fica evidente que a concentração de silício no material ao longo do diâmetro não é homogênea, por esse motivo fez-se um teste de hipótese para confirmação da influência do silício (Tabela 4.6). A dureza maior no ponto mais próximo do centro indica uma provável alteração no material devido à fabricação do furo de centro, um aquecimento devido ao processo seguido de um resfriamento lento. O comportamento da influência do silício ao longo do raio é observado na Fig. 4.56, porém para não utilizar um gráfico muito carregado, a análise foi feita em apenas 5 pontos

igualmente espaçados de 20mm cada um à partir do ponto mais externo, desconsiderando assim o valor que possui a alteração devido à fabricação do furo de centro.

Tabela 4.6 - Teste de hipótese para verificação da influência do silício ao longo do raio da amostra.

	SS	Degr. of	MS	F	P
<b>Intercept</b>	<b>104652.9</b>	<b>1</b>	<b>104652.9</b>	<b>80502.23</b>	<b>0.000000</b>
<b>Raio</b>	<b>49.6</b>	<b>4</b>	<b>12.4</b>	<b>9.54</b>	<b>0.014670</b>
<b>Error</b>	6.5	5	1.3		

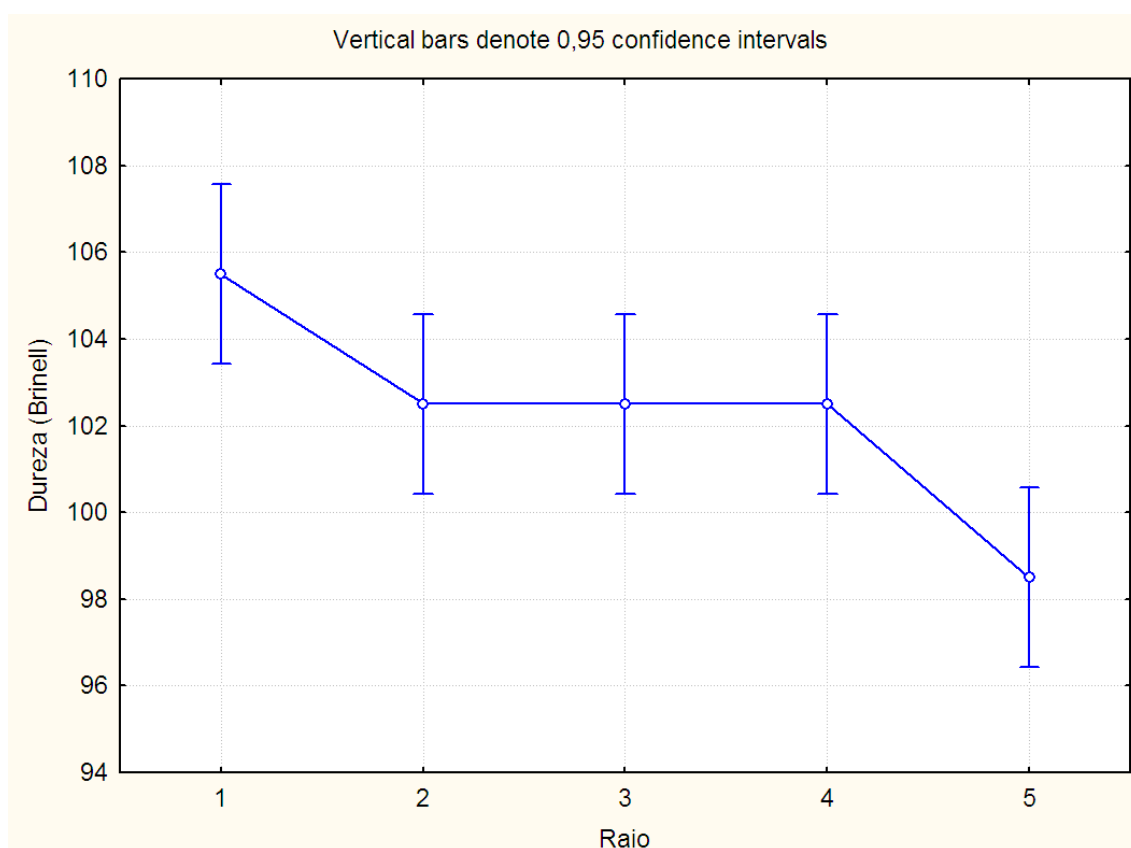


Figura 4.56 - Efeito médio do teor de silício na dureza ao longo do raio da amostra.



# **CAPÍTULO V**

## **CONCLUSÕES**

A variação do teor de silício, mesmo que seja em concentrações hipoeutéticas, exerce uma influência no limite de resistência à tração dos materiais de uma forma simplesmente ilustrativa, porém não de uma forma significativa conforme mostrado estatisticamente.

A dureza dos materiais é afetada significativamente pelas variações de silício nas concentrações estudadas, quanto maior o teor de silício, maior a dureza dos materiais.

A força de corte não é influenciada pela variação do silício. Na operação de torneamento não é necessário preocupação, por parte dos compradores do material, com relação ao desgaste das ferramentas ou potência exigida pela máquina.

A rugosidade da superfície é influenciada pela concentração de silício, porém não de uma maneira linear. Existe um ponto intermediário de concentração que faz a rugosidade do material ser bastante elevada comparada com as outras amostras.

O resfriamento do material mostrou-se não homogêneo, por esse motivo acredita-se que os elementos de liga presentes nas amostras se concentraram preferencialmente nas extremidades do material onde ocorre o começo do resfriamento. Acredita-se que o interior dos materiais sejam, microscopicamente, muito próximo da estrutura do alumínio comercialmente puro.

# **CAPÍTULO VI**

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Investigar um critério mais confiável de análise da diferença do diâmetro ser um fator a ser considerado como influente.
- Verificar por que a utilização de fluido de corte prejudica o acabamento superficial das amostras nas condições de ensaio utilizadas.
- Investigação do tamanho de grão utilizando uma metodologia de análise de imagem que permita a constatação do tamanho do grão com uma variância pequena.
- Investigação detalhada da liga de 1,2% de Si para verificação do ponto de inflexão das superfícies de resposta obtidas neste trabalho.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- ASTAKHOV, V. P. **Metal Cutting Mechanics**. 1 ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1998. 297p.
- BERNARDOS, P.G., VOSNIAKOS, G.C., 2003. **Predicting surface roughness in machining: a review**. Int. J. Mach. Tools Manuf. 43, 833–844.
- BOOTHROYD, G., KNIGHT, W.A., 1989. **Fundamentals of Machining and Machine Tools**. Marcel Dekker, New York.
- DAVIM, J.P., 2001. **A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments**. J. Mater. Process. Technol. 116, 305–308.
- DINIZ, A.E., MICARONI, R., 2002. **Cutting conditions for finish turning process aiming: the use of dry cutting**. Int. J. Mach. Tools Manuf. 43, 899–904.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.. **Tecnologia da Usinagem dos Metais**. Art Liber Editora. 2ª Edição. São Paulo. ISBN 8587296019. 2000. 242p.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. (1999). **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo, MM editora.
- FENG, C.X.J., WANG, X., 2002. **Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning**. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 20, 348–356.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1977, 751 p.
- FERRARESI, D. (1990). **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 8ª reimpressão. São Paulo, Edgard Blücher.
- MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. (1999). **Usinagem dos Metais**. Uberlândia 223p. Apostila – Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem/ departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

- MERCHANT, M. E. An interpretive look at the 20th century research on modeling of machining. *Machining Science and Technology*, v. 2, p. 157-163, 1998.
- NIAN, C.Y., YANG, W.H., TARNG, Y.S., 1999. **Optimization of turning operations with multiple performance characteristics**. *J. Mater. Process. Technol.* 95, 90–96.
- PETROPOULOS, G.P., VAXEVANIDIS, N.M., PANDAZARAS, C.N., ANTONIADIS, A.A., 2006. **Multi-parameter identification and control of turned surface textures**. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 29, 118–128.
- REDDY, N.S., RAO, P.V., 2005. **Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling**. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 26, 1202–1210.
- SHAW, M.C., 1984. **Metal Cutting Principles**. Oxford University Press, Oxford.
- TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4th Edition, Butterworth-Heinemann. ISBN 0-7506-7069-X. 446, 2000. 446p.
- <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=214&pageid=2144417045>, acessado 25/10/2010.