

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

EDSON ROBERTO DA SILVA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO DESGASTE DE BEDAMES NA USINAGEM DE
LIGAS DE ALUMÍNIO-SILÍCIO**

Ilha Solteira

2015

EDSON ROBERTO DA SILVA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO DESGASTE DE BEDAMES NA
USINAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO-SILÍCIO**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia – UNESP – Campus de Ilha
Solteira

Área de Conhecimento: Materiais e
Processos de Fabricação.

Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues

Orientador

Prof. Dr. Hidekasu Matsumoto

Coorientador

Ilha Solteira

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Silva, Edson Roberto da.

S586c Contribuição ao estudo do desgaste de bedames na usinagem de ligas de alumínio-silício / Edson Roberto da Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2015
79 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Processos de Fabricação, 2015

Orientador: Alessandro Roger Rodrigues

Coorientador: Hidekasu Matsumoto

Inclui bibliografia

1. Usinagem. 2. Torneamento radial. 3. Desgaste abrasivo. 4. Bedame.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

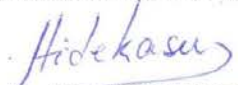
TÍTULO: Contribuição ao estudo do desgaste de bedames na usinagem de ligas de alumínio-silício

AUTOR: EDSON ROBERTO DA SILVA

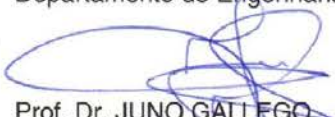
ORIENTADOR: Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. HIDEKASU MATSUMOTO

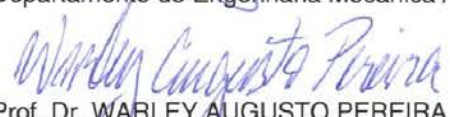
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica ,
Área: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. HIDEKASU MATSUMOTO

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JUNO GALLEGO

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. WARLEY AUGUSTO PEREIRA

Faculdade de Engenharia Mecânica / Universidade de Rio Verde

Data da realização: 26 de junho de 2015.

DEDICO,

A Minha esposa **Grazianne Gomes Alves**, e a minha mãe **Sebastiana Maria Divina da Silva**, pelo apoio nos momentos difíceis e pela compreensão na minha ausência devido ao tempo de dedicação aos estudos e ao trabalho.

Agradecimentos

A Deus, pela saúde física, mental e espiritual que me permitiu a realização deste trabalho.

Aos meus pais Dorvani Gomes da Silva e Sebastiana Maria Divina da Silva, aos meus irmãos, Lucy Jayne Maria da Silva, Luiz Carlos da Silva e Elismar Flávio da Silva e minha sogra Divina Célia Gomes Alves, pelo apoio incondicional e compreensão durante todo o trabalho realizado.

Aos amigos que conviveram comigo durante minha passagem por Ilha Solteira, e principalmente aos companheiros de casa, Carlos Eduardo, Thalles Denner, Anderson Inácio, Rodrigo Borges, Diogo Fernandes, Daniel Fernando e Paulo Henrique.

A toda equipe do GPU, em especial ao Daniel Secco, Eli Jorge Cruz Jr. e Flávio Manarelli pela importante contribuição na realização deste trabalho.

A todos os professores do programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade “Julho de Mesquita Filho” FEIS/UNESP, pelo grande aprendizado, especialmente ao meu orientador Alessandro Roger Rodrigues e meu coorientador Hidekasu Matsumoto.

A Universidade de Rio Verde – UniRV, em especial aos diretores da faculdade de Engenharia Mecânica professor Dr. Warley Augusto Pereira, Ms. João Pires e Ms. Giancarlo Ribeiro Vasconcelos, que propiciaram meios para que eu pudesse cursar as disciplinas e realizar a pesquisa mesmo trabalhando.

Ao Membros da Banca, pela generosidade e disponibilidade de seu precioso tempo na finalização da dissertação e mestrado. Aos professores Dr. Juno Gallego e Dr. Wyser José Yamakami, pela sabedoria e serenidade que avaliaram o projeto e mostraram caminhos durante a qualificação.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação”. (Simone de Beauvoir)

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo geral realizar um levantamento dos principais tipos de desgaste que ocorrem na usinagem das ligas de alumínio-silício. Como metas específicas, visa-se executar canais em pistões automotivos com duas composições químicas diferentes verificando a influência da velocidade de corte (v_c), avanço (f) e teor de silício contido na liga na vida de um bedame de classe N, além de verificar o efeito do aumento da velocidade de corte, do avanço e do percentual de silício da liga Al-Si na produtividade de canais para bedames de classe N. Para tanto foi utilizado um centro de torneamento Romi GL-240M. Foi adotado como critério de fim de vida do bedame o desgaste de flanco $V_b = 0,3$ mm. A evolução do desgaste foi acompanhado em um estéreo-microscópio Zeiss Discovery V8. Para analisar a influência e o efeito de cada variável citado, foi utilizado a análise de variância (ANOVA). O principal mecanismo de desgaste observado foi a adesão da liga na ferramenta e a abrasão da liga devido à presença do silício. O teor de silício foi o fator de maior influência, onde a liga com menor porcentagem de silício proporcionou maior vida do bedame. A velocidade de corte (v_c) também teve forte influência, sendo que o seu aumento causou diminuição da vida da ferramenta. O avanço (f) também teve influência, no entanto, o seu aumento prolongou a vida da ferramenta.

Palavras chave: Abrasão. Adesão. Mecanismos de desgaste. Operação de sangramento radial. Ligas abrasivas.

ABSTRACT

This research aims to monitoring the tool wear when turning aluminum-silicon alloys. The specific goal is to turn channels in automotive pistons with two different chemical compositions by checking the influence of the control factors cutting speed (v_c), tool feed (f) and workpiece silicon content on response N-Class chisel life. As well as to study the effect of the same aforementioned variables on channels productivity. A turning center Romi GL-240M was used. 0.3 mm flank wear was adopted as a criterion of tool life. Chisel flank wear was monitored and measured by using a stereo-microscope Zeiss Discovery V8. Analysis of Variance (ANOVA) was used to quantify statistical influences of the control factors upon response. Adhesion and abrasion of the part material over tools were observed. Silicon content was the most influential factor on the channels productivity so that the lower silicon content, the greater tool productivity. Cutting speed and tool feed has influenced on channels productivity strongly. The first one is inversely proportional to tool life whereas the latter is directly proportional to channels productivity.

Keywords: Abrasion. Adhesion. Wear mechanisms. Radial parting operation. Abrasive alloys.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Grupos de materiais a serem usinados de acordo com a Norma ISO.....	15
Figura 2	– Microestrutura das diferentes zonas do pistão Mahle fabricado por fundição por gravidade em coquilha: a) Saia do pistão; b) Cabeça do pistão.....	21
Figura 3	– Aresta postiça de corte em uma ferramenta de torneamento após usinar uma liga de alumínio-silício.....	24
Figura 4	– Superfícies e arestas de corte de uma ferramenta de sangramento.....	26
Figura 5	– Superfícies de folga e arestas de corte de um bedame intercambiável.....	26
Figura 6	– Força de corte (F_c) <i>versus</i> ângulo de saída (γ): a) $v_c = 80$ m/min, b) $v_c = 100$ m/min, c) $v_c = 120$ m/min, d) $v_c = 150$ m/min, e) $v_c = 180$ m/min.....	27
Figura 7	– Geometria típica de ferramentas de corte comerciais: a) ferramenta com chanfro; b) ferramenta com raio de aresta.....	28
Figura 8	– Desgastes e avarias das ferramentas de corte.....	30
Figura 9	– Superfície de saída de uma ferramenta de torneamento com adesão de alumínio e APC.....	31
Figura 10	– Desgaste de flanco de um inserto de nitreto de silício revestido com multicamadas de diamante MCD/NCD após 3000 m de comprimento de corte.....	32
Figura 11	– Adesão (a) e desgaste de flanco (b) em uma ferramenta classe K10 na usinagem de uma liga de alumínio-silício após o tempo de corte de 30 s.....	33
Figura 12	– Fatores de controle e resposta.....	36
Figura 13	– Dispositivos de fixação utilizados nos ensaios de usinagem.....	37
Figura 14	– Corpos de prova utilizados nos ensaios de usinagem: (a) diâmetro 127 x 155 mm; (b) diâmetro 102 x 100 mm.....	38
Figura 15	– Inserto Sandvik N123G2-0300-0002-GF H13A.....	39
Figura 16	– Quantidade de canais executados por diâmetro usinado para cada pistão do primeiro grupo.....	40
Figura 17	– Quantidade de canais executados por diâmetro usinado para o segundo grupo de pistões.....	41
Figura 18	– Foto micrografia das ligas de alumínio: (a) liga com 12,49 % de Si; (b) liga com 16,414 % de Si.....	43

Figura 19 – Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 1000$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação): (a) após 3 canais, (b) após 6 canais e (c) após 12 canais.....	44
Figura 20 – Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 1000$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação): (a) após 3 canais, (b) após 6 canais e (c) após 18 canais.....	45
Figura 21 – Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 500$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação): (a) após 3 canais, (b) após 9 canais e (c) após 24 canais.....	45
Figura 22 – Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 500$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação): (a) após 3 canais, (b) após 15 canais e (c) após 39 canais.....	46
Figura 23 – Superfície de folga com desgaste de flanco $v_c = 500$ m/min: a) 1ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot, b) 2ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot, c) 1ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot, d) 2ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot.....	48
Figura 24 – Superfície de folga com desgaste de flanco $v_c = 1000$ m/min: a) 1ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot, b) 2ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot, c) 1ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot, d) 2ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot.....	49
Figura 25 – Resultado comparativo da quantidade de canais usinados em duas velocidades de cortes e dois avanços diferentes na usinagem da liga de Al-Si com 16% Si.....	50
Figura 26 – Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 1000$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação): (a) após 3 canais, (b) após 18 canais e (c) após 54 canais.....	54
Figura 27 - Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 1000$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação): (a) após 3 canais, (b) após 27 canais e (c) após 87 canais.....	55
Figura 28 – Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 500$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação): (a) após 6 canais, (b) após 54 canais e (c) após 126 canais.....	55
Figura 29 – Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 500$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação): (a) após 9 canais, (b) após 54 canais e (c) após 171 canais.....	56

Figura 30 – Superfície de folga com desgaste de flanco $v_c = 500$ m/min: a) 1ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot, b) 2ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot, c) 1ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot, d) 2ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot.....	57
Figura 31 – Superfície de folga com desgaste de flanco $v_c = 1000$ m/min: a) 1ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot, b) 2ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot, c) 1ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot, d) 2ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot.....	58
Figura 32 – Resultado comparativo da quantidade de canais usinados em duas velocidades de cortes e dois avanços diferentes para usinagem da liga de Al-Si com 12% Si...	59
Figura 33 – Superfície principal de folga: (a) com adesão; (b) sem adesão.....	69
Figura 34 – Superfície principal de folga após a fim da fida da ferramenta: (a) com adesão; (b) sem adesão.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Nomenclatura para as ligas de alumínio trabalhadas.....	19
Tabela 2	– Nomenclatura para as ligas de alumínio fundidas.....	19
Tabela 3	– Principais ligas de alumínio fundidas.....	20
Tabela 4	– Elementos de liga e suas influências na usinabilidade do alumínio.....	25
Tabela 5	– Variáveis de entrada e os níveis adotados nos ensaios de usinagem.....	35
Tabela 6	– Composição química das ligas de alumínio-silício utilizadas nos ensaios de usinagem (% em peso).....	38
Tabela 7	– Desgaste de flanco em relação à quantidade de canais usinados para a liga Al-Si com 16% Si (v_c em m/min e f em mm/rotação).....	47
Tabela 8	– Quantidade de canais para cada combinação de parâmetros na usinagem da liga de Al-Si com 16% Si (v_c em m/min e f em mm/rotação).....	51
Tabela 9	– Quantidade de canais para cada fator. Liga Al-Si com maior porcentagem de Si.....	52
Tabela 10	– Valores calculados da análise de variância para o modelo de efeitos fixos com dois critérios de classificação. Liga Al-Si com 16% Si.....	52
Tabela 11	– Desgaste de flanco em relação à quantidade de canais usinados para usinagem das ligas Al-Si com menor percentual de Si entre as ligas estudadas (v_c em m/min e f em mm/rotação).....	57
Tabela 12	– Quantidade de canais para cada combinação de parâmetros na usinagem da liga de Al-Si com 12% Si (v_c em m/min e f em mm/rotação).....	61
Tabela 13	– Quantidade de canais usinados para cada fator. Liga Al-Si com 12% Si.....	61
Tabela 14	– Valores calculados da análise de variância para o modelo de efeitos fixos com dois critérios de classificação. Liga Al-Si com 12% Si.....	62
Tabela 15	– Quantidade de canais para cada combinação de parâmetros na usinagem das duas ligas de Al-Si estudadas (v_c em m/min e f em mm/rotação).....	64
Tabela 16	– Quantidade de canais usinados para cada fator (experimento fatorial 2^3).....	65
Tabela 17	– Valores calculados da análise de variância para o modelo de efeitos fixos com três fatores: velocidade de corte, avanço e liga Al-Si.....	65
Tabela 18	– Desgaste de flanco em relação à quantidade de canais usinados.....	69
Tabela 19	– Análise de variância para o modelo de efeito fixo com três fatores.....	78

LISTA DE SÍMBOLOS

AA	<i>Aluminum Association</i> (Associação do Alumínio)
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano de Ferro e Aço)
Al	Alumínio
APC	Aresta postiça de corte
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de testes e Materiais)
Bi	Bismuto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
CVD	<i>Chemical vapor deposition</i> (deposição química a vapor)
DLC	<i>Diamond-like carbono</i>
F	Avanço
F_c	Força de corte [N]
Fe	Ferro
HB	Dureza Brinell
HRC	Dureza Rockwell C
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
K	Classe de ferramenta de usinagem
LAMAT	Laboratório de Ensaios e Análise em Materiais
MCD	Diamante microcristalino
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
MQF	Mínima quantidade de fluido
NCD	Diamante nanocristalino
Ni	Níquel
Pb	Chumbo
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
Si	Silício
Sn	Estanho
Ti	Titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
V_b	Desgaste de flanco [mm]
v_c	Velocidade de corte [m/min]
WC	Carboneto de tungstênio
Zn	Zinco
γ	Ângulo de saída da ferramenta de corte [°]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	CARACTERÍSTICAS DO ALUMÍNIO PURO	17
2.2	LIGAS DE ALUMÍNIO	18
2.3	USINABILIDADE DO ALUMÍNIO	22
2.4	GEOMETRIA DAS FERRAMENTAS DE CORTE APLICADAS ÀS LIGAS DE ALUMÍNIO	25
2.5	DESGASTE E VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	35
	PARÂMETROS DE CORTE	35
3.2	BANCO DE ENSAIOS	36
3.3	CORPOS DE PROVA	37
3.4	FERRAMENTAS DE CORTE	38
3.5	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	39
3.5.1	Primeira etapa de ensaios	39
3.5.2	Segunda etapa de ensaios	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	ETAPA 1 – EFEITO DOS PARÂMETROS DE CORTE NO DESGASTE	43
4.1.1	Liga de alumínio-silício com 16% Si	44
4.1.2	Liga de alumínio-silício com 12% Si	54
4.1.3	Influência dos parâmetros de corte juntamente com a liga de alumínio-silício	63
4.2	ETAPA 2 – EVOLUÇÃO DO DESGASTE	68
5	CONCLUSÕES	71
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	73
	ANEXO A – PLANEJAMENTO FATORIAL 2^K (ANOVA)	76

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios, o homem necessita desenvolver métodos mais eficientes para a fabricação de utensílios de uso diário que visem facilitar sua vida. Com o passar dos anos e com o avanço das tecnologias, o comércio ganha espaço e torna-se um mecanismo importante na sobrevivência da economia. Com isso, os processos de fabricação tornam-se grandes responsáveis pela movimentação da economia mundial e responsáveis também pela produção de variados tipos de peças e ferramentas.

Entre os processos de fabricação, os processos de usinagem são alguns dos mais importantes do mundo, responsáveis pela fabricação de inúmeras peças e ferramentas, sendo o mercado automobilístico um dos que mais movimentam essa indústria. O processo de torneamento, que tem larga aplicação na fabricação de peças automotivas, é um processo versátil na fabricação de peças de formas variadas e de diferentes materiais.

Com tantas vantagens, os processos de torneamento contam com inúmeras tecnologias nas máquinas e nas ferramentas. Ferramentas mais resistentes permitem maiores velocidades de corte e, conseqüentemente, maior produtividade. Um dos materiais para ferramentas de usinagem mais utilizados é o carboneto de tungstênio (WC), pois este pode usinar qualquer tipo de material. As ferramentas de WC são mais eficientes em trabalhos com altas velocidades de corte comparadas com ferramentas de aço rápido, exigindo máquinas mais rígidas e com velocidades de corte superiores (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Uma técnica muito utilizada para melhorar a vida de uma ferramenta de usinagem é a utilização de coberturas nos insertos de WC, aumentando a vida da ferramenta e permitindo que a mesma trabalhe com velocidades de corte ainda maiores. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), os principais materiais utilizados para cobertura de ferramenta são: carboneto de titânio (TiC), óxido de alumínio (Al_2O_3), nitreto de titânio (TiN) e carbonitreto de titânio (TiCN), que conferem às ferramentas características melhoradas como maior estabilidade química a altas temperaturas, redução do atrito na interface cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, maior dureza superficial sem perder a tenacidade do núcleo da ferramenta, entre outras características. No entanto, devido à sua afinidade química com o alumínio, revestimentos a base de titânio devem ser evitados nas ferramentas para usinagem do alumínio e suas ligas por causarem aderência de material da peça na aresta de corte da ferramenta (WEINGAERTNER; SCHROETER, 1990).

Limberger et al. (2010), ao estudar a microestrutura de pistões de motor de combustão interna, identificou que o material utilizado em sua fabricação é uma liga de alumínio-silício que, segundo Viana e Machado (2005), pela concentração de silício, causa desgastes excessivos nas ferramentas de corte por serem materiais muito abrasivos.

A indústria metal-mecânica possui uma série de materiais a serem usinados, cada um com características particulares que influenciam diretamente nos processos de usinagem, sendo assim a ISO (*International Organization for Standardization* - Organização Internacional para Padronização) divide os materiais das peças a serem usinadas em seis principais grupos, cada qual com propriedades únicas em relação à usinabilidade, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Grupos de materiais a serem usinados de acordo com a Norma ISO.

ISO P Aço	ISO M Aço inoxidável	ISO K Ferro Fundido
		
ISO N Alumínio	ISO S Ligas resistentes ao calor	ISO H Materiais endurecidos
		

Fonte: Sandvik (2013).

O processo de usinagem por sangramento radial é um processo de torneamento onde a ferramenta avança perpendicularmente ao eixo principal de rotação da peça segundo uma trajetória retilínea, de modo a obter um entalhe circular ou até mesmo um corte na peça (FERRARESI, 1969). De uma maneira geral, o processo de sangramento é largamente utilizado na indústria automobilística para a fabricação de pistões, pois possuem canais para alojamento de anéis.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo geral realizar um levantamento dos principais tipos de desgaste que ocorrem na usinagem das ligas abrasivas de alumínio-silício. Como metas específicas, visa-se executar canais em pistões automotivos com duas composições químicas diferentes verificando a influência da velocidade de corte (v_c), avanço (f) e do teor de silício contido na liga sobre a vida de um bedame de classe N, além de verificar o efeito do aumento da velocidade de corte, do avanço e do percentual de silício da liga Al-Si na vida da ferramenta.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste item apresenta-se a revisão da literatura sobre as principais características do alumínio e suas ligas, dando ênfase para as ligas de alumínio-silício utilizadas na indústria automobilística. É feita também uma abordagem sobre a usinabilidade do alumínio e suas ligas, geometria das ferramentas de corte indicadas para estes materiais e, por fim, são abordados os principais tipos de desgaste e vida das ferramentas de corte utilizados para tais materiais.

2.1 CARACTERÍSTICAS DO ALUMÍNIO PURO

O alumínio é um metal não ferroso encontrado na natureza em forma de minério chamado bauxita, possui boa condutividade térmica e relativamente alta condutividade elétrica, seu peso específico é de $2,7 \text{ g/cm}^3$ a 20°C , possui ponto de fusão em torno 660°C , módulo de elasticidade de 62 GPa , seu formato cristalino é cúbico de face centrada, não é magnético e apresenta baixo coeficiente de emissão térmica; tais características aliadas à grande disposição de seu minério na natureza torna o alumínio um dos materiais mais importantes, após o ferro (CHIAVERINI, 1986).

O alumínio é aplicado em embalagens de produtos alimentícios, utensílios de cozinha, transportes aéreos, automotivos, ferroviários e navais, cabos de transmissão de energia elétrica, sem contar em uma infinidade de peças na indústria mecânica, entre outros.

Chiaverini (1986) explica que em estado puro o alumínio (99,99% Al) apresenta baixa resistência à tração, entre 49 a 59 MPa, e é muito dúctil, apresentando alongamento entre 60 e 70%; esta alta ductilidade permite que o alumínio seja facilmente conformado mecanicamente, possibilitando a fabricação de chapas, tubos, fios e folhas muito finas.

Quanto mais puro o alumínio, melhor será sua resistência à corrosão e sua eletrocondutividade. Essa resistência à corrosão se dá pela reação do alumínio com o oxigênio formando Al_2O_3 (alumina) em sua superfície; este óxido é transparente mantendo aparência de prata do alumínio, é inerte e aderente, preservando o alumínio de certos meios corrosivos. Porém, todo agente químico que dissolver ou atacar essa película origina processos de corrosão ao alumínio (VOGL, 2007).

2.2 LIGAS DE ALUMÍNIO

Um dos aspectos que torna o alumínio tão sugestivo como material de construção mecânica é o fato de o alumínio poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, formando as ligas e possibilitando o desenvolvimento de materiais com características tecnológicas adaptadas às aplicações do produto final (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO- ABAL, 2007).

A importância técnica do alumínio e suas ligas está relacionada com suas propriedades físicas e mecânicas, principalmente pela relação resistência/peso, trabalhabilidade e temperabilidade de algumas de suas ligas (VOGL, 2007).

As ligas de alumínio são divididas em dois grandes grupos (CHIAVERINI, 1986):

- ligas trabalhadas, que são ligas conformadas mecanicamente sujeitas a trabalhos a quente e a frio, podendo ser ou não tratadas termicamente e;
- ligas fundidas, onde no processo de fundição do alumínio ocorre a introdução dos elementos de liga como Si, Fe, Cu, Mg, Zn e eventualmente Ti, visando melhorar suas propriedades mecânicas.

Uma liga pertencente ao grupo das ligas trabalhadas bastante utilizada é a 3003 com 1,2% de manganês, por apresentar conformabilidade e resistência à corrosão semelhante ao alumínio puro, porém com propriedades mecânicas melhoradas, principalmente quando deformadas a frio. As ligas alumínio-magnésio possuem elevada resistência à corrosão, são facilmente produzidas e soldadas, estando disponíveis no mercado em forma de chapas, lâminas, perfis, tubos, arames etc (ABAL, 2007).

As ligas tratadas termicamente com média resistência mecânica são compostas de magnésio e silício, apresentando boa resistência à corrosão, entretanto perdem um pouco sua trabalhabilidade. Já as ligas de elevada resistência mecânica contendo cobre e zinco como principais elementos de liga, quando tratadas termicamente, apresentam resistência tão elevadas quanto a dos aços estruturais, contudo necessitam de proteção superficial. Seu uso se dá principalmente onde a relação resistência/peso for uma característica fundamental de projeto, como é o caso da aviação (REIS, 2006).

A *Aluminium Association* (AA), amplamente reconhecida nos Estados Unidos, desenvolveu um sistema de identificação das ligas de alumínio fundidas e trabalhadas. O sistema de identificação prevê diferentes nomenclaturas para as ligas fundidas e trabalhadas.

Para a identificação das ligas trabalhadas, foi criado um sistema de quatro dígitos como apresentado no Tabela 1 (AMERICAN SOCIETY FOR MICROBIOLOGY- ASM, 1992).

Tabela 1 – Nomenclatura para as ligas de alumínio trabalhadas.

Nomenclatura	Composição da liga
1xxx	Alumínio Puro sem elementos de liga.
2xxx	Liga em que o cobre é o elemento principal, porém o magnésio pode ser especificado.
3xxx	Liga em que o manganês é o elemento principal.
4xxx	Liga em que o silício é o elemento principal.
5xxx	Liga em que o magnésio é o elemento principal.
6xxx	Liga em que o magnésio e o silício são os elementos principais.
7xxx	Liga em que o zinco é o elemento principal, porém outros elementos, tais como cobre, magnésio, cromo e o zircônio podem ser especificados.
8xxx	Ligas que incluem estanho e algumas composições de lítio que caracterizam composições variadas.

Fonte: American Society for Microbiology- ASM (1992).

Para as ligas de alumínio fundidas, o sistema de identificação consiste em três dígitos seguidos por um valor decimal, o primeiro dígito corresponde ao elemento majoritário da liga, os dois dígitos seguintes indicam a liga dentro do grupo e o dígito decimal indica a forma de obtenção da liga, no qual o valor decimal xxx.0 é para peças fundidas. A nomenclatura das famílias de ligas fundidas é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Nomenclatura para as ligas de alumínio fundidas.

Nomenclatura	Composição da liga
1xx.x	Alumínio Puro sem elementos de liga, especial para a fabricação de rotor
2xx.x	Liga em que o cobre é o elemento principal, porém outros elementos de liga podem ser especificado.
3xx.x	Liga em que o silício é o elemento principal.
4xx.x	Liga em que o silício é o elemento principal.
5xx.x	Liga em que o magnésio é o elemento principal.
6xx.x	Não utilizado
7xx.x	Liga em que o zinco é o elemento principal.
8xx.x	Ligas em que o estanho é o elemento principal.

Fonte: American Society for Microbiology- ASM (1992).

Ao contrário das ligas trabalhadas sujeitas à ação das variações de temperatura durante o processo, é durante o processo de fundição que a maioria das ligas fundidas adquire sua forma estrutural e química. Em geral, as ligas fundidas aplicadas na engenharia contêm silício, pois este melhora a fluidez durante o vazamento da liga no molde e melhora a resistência à trinca do material durante o processo de contração do metal quente no resfriamento (ABAL, 2007).

A Tabela 3 apresenta as principais ligas de alumínio fundidas com suas respectivas aplicações.

Tabela 3 – Principais ligas de alumínio fundidas.

Ligas	Características	Aplicações
150.0	Alumínio comercialmente puro com excelente resistência à corrosão e boa condutividade elétrica, não tratável termicamente. Fundição em molde permanente, areia e sob pressão.	Acessórios utilizados nas indústrias química e de alimentação, rotores, condutores elétricos e equipamentos industriais.
242.0	Excelentes propriedades mecânicas em temperaturas elevadas e muito boa usinabilidade. Baixa resistência à corrosão. Fundição em molde permanente e areia.	Pistões e cabeçotes para aviões, motores a diesel e de motocicletas.
319.0	Resistência mecânica moderada e boas características de fundição e usinagem. Fundição em moldes permanentes e areia.	Uso geral, além de revestimentos em caixas de equipamentos elétricos.
356.0	Média resistência mecânica, excelente fluidez e estanqueidade sob pressão, boa resistência à corrosão e usinabilidade. Fundição em molde permanente e areia.	Peças fundidas e com seções finas, cilindros, válvulas, cabeçotes, blocos de motores, ferramentas pneumáticas, componentes arquiteturais anodizados na cor cinza.
360.0	Excelente estanqueidade sob pressão e resistência à corrosão. Muito boa usinabilidade. Fundição sob pressão.	Recipientes e componentes de iluminação, peças externas de motores e utensílios domésticos.
443.0	Baixa resistência mecânica, muito boa fluidez, excelente estanqueidade sob pressão e resistência à corrosão. Fundição em molde permanente, areia e sob pressão.	Peças fundidas com seções finas, utensílios domésticos, moldes para artefatos de borracha, componentes arquiteturais anodizados na cor cinza.
520.0	Excelente resistência mecânica, inclusive sob cargas de impacto, boas condições de anodização e de polimento, baixa fluidez, excelente usinabilidade e resistência à corrosão, mas susceptível à corrosão sob tensão em temperaturas acima de 120 °C. Fundição em areia.	Peças submetidas a elevadas tensões, na área aeronáutica, marítima e de transporte.
712.0	Boas propriedades mecânicas, envelhece naturalmente e se retempera após soldagem, excelente usinabilidade e resistência. Boa resistência à corrosão. Fundição em areia.	Peças fundidas para conjuntos de brasagem.

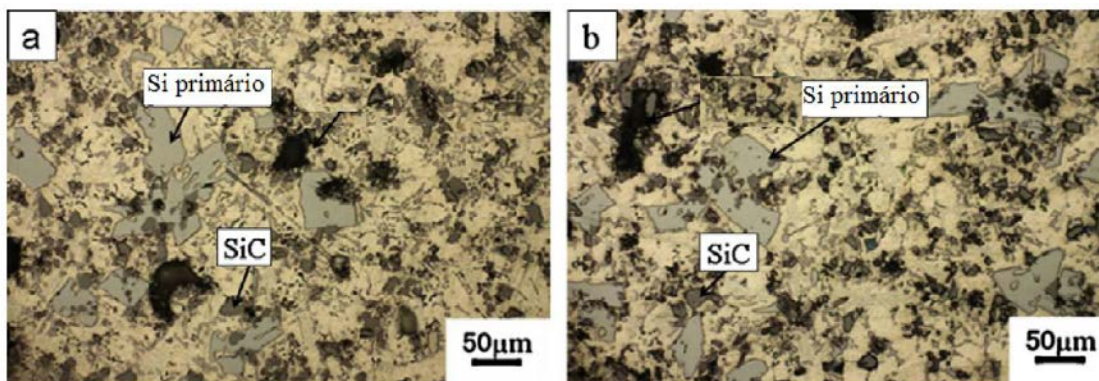
Fonte: ABAL (2007).

Como pode ser observado na Tabela 3, muitas ligas de alumínio são utilizadas na fabricação de componentes automobilísticos e, em geral, as ligas utilizadas para tais componentes são ligas que apresentam boa usinabilidade e quase sempre fundidas em areia ou molde permanente.

As ligas alumínio-silício têm potencial para uma excelente fluidez, boa soldabilidade, boa condutividade térmica, elevada resistência mecânica a altas temperaturas e excelente resistência à corrosão, características que possibilitam importantes aplicações em estruturas aeroespaciais, indústria automobilística, militar etc. A maioria dos pistões automotivos é fundida por uma liga eutética de alumínio-silício devido às propriedades citadas anteriormente (HAQUE; SHARIF, 2001).

Huang et al. (2011) apresentaram em seus estudos um método de fabricação por fundição centrífuga de pistão automotivo em uma liga de alumínio-silício reforçada com SiC. Afirmam que a microestrutura das diferentes zonas do pistão, fabricados por fundição por gravidade em coquilha, não apresentam consideráveis diferenças de volume de silício entre a saia (base) e a cabeça do pistão (topo), sendo 15,2% e 17,6%, respectivamente. A Figura 2 mostra as microestruturas das diferentes zonas do pistão.

Figura 2 – Microestrutura das diferentes zonas do pistão Mahle fabricado por fundição por gravidade em coquilha: a) Saia do pistão; b) Cabeça do pistão.



Fonte: Huang et al. (2011).

Como pode ser observado na Figura 2, a microestrutura de ambas as zonas do pistão apresentam partículas primárias de silício e SiC, não apresentando diferenças consideráveis em sua formação geral.

Limberger et al. (2010) apresentaram um estudo onde foram avaliadas a microestrutura e propriedades mecânicas de um pistão de motor de combustão interna submetido a diferentes condições de trabalho; as micrografias dos pistões revelaram uma estrutura característica das ligas hipereutéticas de Al-Si, sendo a estrutura da borda composta por partículas globulares de silício e a estrutura do centro do pistão composta por agulhas de silício. As ligas fundidas de alumínio-silício utilizadas na indústria automobilística e aeronáutica apresentam um percentual de silício na ordem de 17 a 23%, que está acima da composição eutética (ponto de fusão mais baixo possível para uma liga, onde há a transformação instantânea da fase líquida para pelo menos duas fases sólidas, para a liga de Al-Si a temperatura é em torno de 580 °C e percentual de silício de 12,5%), contendo em sua estrutura grandes grãos de silício, além do silício espalhado finamente na estrutura eutética. Tais grãos aumentam demasiadamente o desgaste das ferramentas na usinagem, até mesmo quando se usa ferramentas de metal duro (VIANA; MACHADO, 2005).

É sempre importante minimizar custos nos processos de fabricação, para tanto a escolha do melhor processo deve estar ligado com a forma, acabamento e tolerância dimensional que a peça irá receber. Os processos de fundição, conformação e soldagem em alguns casos podem até produzir peças com dimensões finais ou próximas à final, porém, em muitos casos, para garantir a funcionalidade e o intercâmbio das peças por meio de tolerâncias dimensionais, geométricas e acabamentos específicos, faz-se necessário o uso de outros processos de manufatura. Os processos de usinagem usualmente produzem peças com melhores tolerâncias dimensionais e geométricas (CUNHA, 2012).

2.3 USINABILIDADE DO ALUMÍNIO

Usinagem é uma operação que confere a uma peça a forma, dimensão ou acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, através da remoção de material em forma de cavaco (FERRARESI, 1969).

Para Diniz, Marcondes e Coppini (2013) e Ferraresi (1969) a usinabilidade de um material pode ser entendida como o grau de dificuldade de se usar um determinado material, e que as propriedades de usinagem de um material são aquelas que interferem diretamente na vida da ferramenta, no acabamento da peça, nos esforços e na temperatura de corte, na produtividade e nas características do cavaco. Um material pode apresentar boa usinabilidade considerando algumas propriedades, como vida da ferramenta, e não possuir boa usinabilidade

para outras propriedades, como acabamento da peça. Explicam ainda que a usinabilidade de um material depende de seu estado metalúrgico, da dureza, das propriedades mecânicas, da composição química, das operações realizadas anteriormente e do eventual encruamento.

Em geral o alumínio pode ser facilmente usinado. A energia consumida por unidade de volume de metal removido é muito baixa, as temperaturas de usinagem são geralmente baixas e altas velocidades de corte podem ser empregadas. No entanto, em relação aos critérios de usinabilidade, no que diz respeito à rugosidade da peça e às características do cavaco, o alumínio não apresenta uma boa usinabilidade, pois em condições normais de usinagem, o cavaco formado é longo e o acabamento da peça obtido não é satisfatório (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

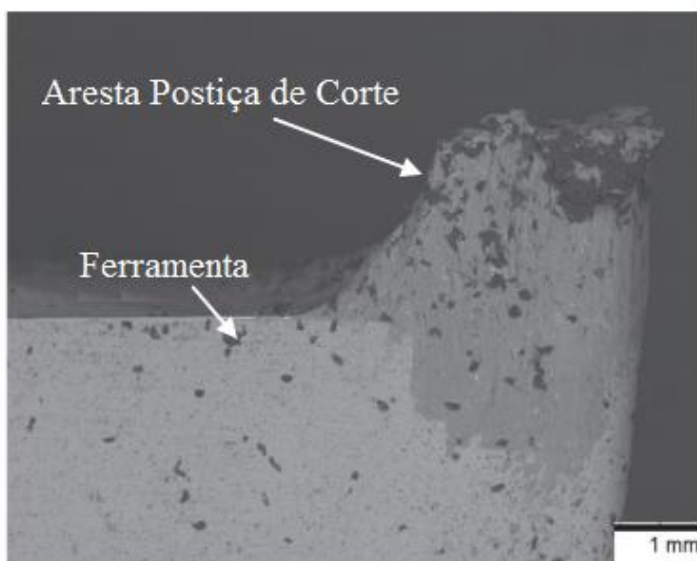
Ao adicionar elementos de liga ao alumínio, produz-se modificações na microestrutura do material, influenciando diretamente na usinabilidade. Estes elementos podem aparecer dissolvidos no metal de base ou precipitados na forma de um composto intermetálico (CuAl_2 , Mg_2Si , MgZn_2) quando o limite de solubilidade do material é extrapolado. O endurecimento causado por solução sólida ou por precipitação tem efeito benéfico na usinabilidade do material, pois fragiliza o cavaco, permitindo o uso de ferramentas com ângulos de cunha maiores, mais robustas e duráveis, obtendo-se, em consequência, um cavaco mais quebradiço e curto (WEINGAERTNER; SCHROETER, 1990).

Em um experimento apresentado por Horváth e Drégelyi-Kiss (2015), os autores usinaram duas ligas de alumínio-silício, uma com 20,03% Si, 4,57% Cu e 1,06% Fe e outra com 11,46% Si. Foi medida a rugosidade das ligas com o objetivo de avaliar o acabamento das peças pelo processo de torneamento; para as condições utilizadas, a liga que apresentou melhor acabamento foi a liga de alumínio com maior percentual de silício, ferro e cobre.

Algumas ligas de alumínio apresentam resistência mecânica equivalente a de alguns aços de baixo teor de carbono em temperatura ambiente, porém, em temperaturas elevadas essa resistência é reduzida demasiadamente, favorecendo a usinagem destas ligas, uma vez que durante os processos de usinagem os materiais usinados estão sujeitos a elevação da temperatura. Assim, a força de corte necessária para usinagem destas ligas é baixa em relação a dos aços. No entanto, a dureza necessária para uma boa usinabilidade das ligas de alumínio é de, no mínimo, 80 HB; durezas menores tendem a formar aresta postiça de corte (APC), dificultando a obtenção de rugosidades baixas da peça usinada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Este fenômeno foi observado por Barzani et al. (2015), ao usinar uma liga de alumínio-silício com dureza de 76 HB. A Figura 3 mostra a aresta postiça de corte formada

sobre a aresta principal de corte, ao usinar uma liga de alumínio-silício com 11,3% Si e 2% Cu, com velocidade de corte de 250 m/min e avanço de 0,15 mm/rotação.

Figura 3 – Aresta postiça de corte em uma ferramenta de torneamento após usinar uma liga de alumínio-silício.



Fonte: Barzani et al. (2015).

As ligas fundidas de alumínio-silício com teores de silício que podem chegar a 12% ou mais apresentam caráter altamente abrasivo, ocasionando níveis acentuados de desgaste nas ferramentas de corte; a velocidade de corte deve ser reduzida à medida que o teor de silício aumenta e nenhuma liga com teor de silício superior a 5% permite a obtenção de superfícies brilhantes (WEINGAERTNER; SCHROETER, 1990).

A Tabela 4 apresenta alguns elementos químicos utilizados na obtenção de ligas de alumínio com suas influências na usinabilidade da liga.

Como pode ser notado na Tabela 4, a presença do silício no alumínio aumenta a abrasividade nos processos de usinagem, as partículas grandes e duras de silício geram altas taxas de desgaste de flanco. Ferramentas de diamante policristalino têm sido utilizadas na usinagem destas ligas sem um desgaste excessivo, o que geralmente ocorre ao usinar com ferramentas de metal duro (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Tabela 4 – Elementos de liga e suas influências na usinabilidade do alumínio.

Elementos de Liga	Características
Sn, Bi e Pb	Atuam como lubrificantes e como fragilizadores do cavaco.
Fe, Mn, Cr, e Ni	Combinam entre si e com o alumínio e/ou com o silício para formarem partículas duras, que favorecem a quebra do cavaco e que, com o aumento destes elementos na liga, aumentam o efeito abrasivo sobre a ferramenta.
Mg	Em teores baixos (cerca de 0,3%) aumenta a dureza do cavaco e diminui o coeficiente de atrito entre o cavaco e ferramenta.
Si	Aumenta a abrasividade da peça – a vida da ferramenta diminui com o aumento do tamanho da fase primária do silício.
Cu	Forma o intermetálico CuAl_2 que fragiliza o cavaco.
Zn	Não exerce influência na usinabilidade.

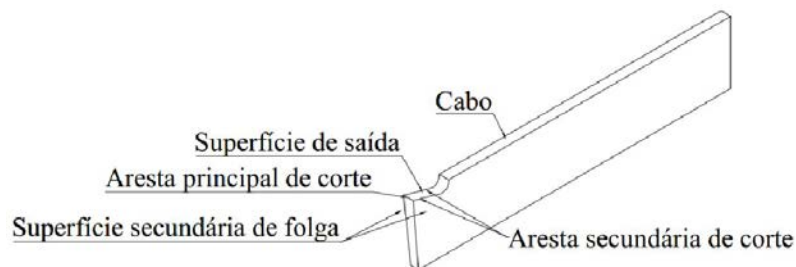
Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

2.4 GEOMETRIA DAS FERRAMENTAS DE CORTE APLICADAS ÀS LIGAS DE ALUMÍNIO

Em geral, as ferramentas de corte apresentam como partes construtivas a cunha de corte, que é a cunha da ferramenta formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga, a superfície de saída, que é a superfície da cunha de corte por onde o cavaco é formado e escoado durante sua saída da região de corte e a superfície principal de folga, que é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém a aresta principal de corte e que defronta com a superfície principal de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

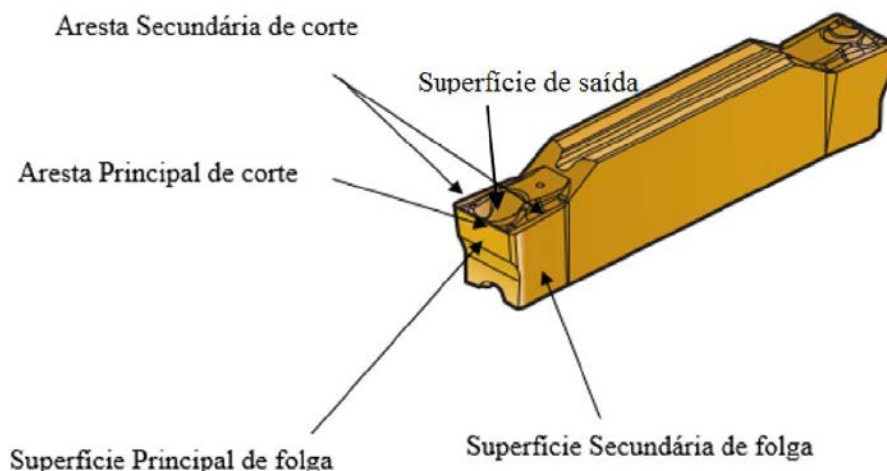
As ferramentas de sangramento (bedames) apresentam uma aresta principal de corte e uma superfície de saída do cavaco, entretanto apresentam duas arestas secundárias de corte e duas superfícies secundárias de folga. A Figura 4 apresenta as arestas de corte e as principais superfícies da parte de corte de um bedame de aço rápido. A Figura 5 mostra um bedame intercambiável semelhante ao utilizado neste trabalho.

Figura 4 – Superfícies e arestas de corte de uma ferramenta de sangramento.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 5 – Superfícies de folga e arestas de corte de um bedame intercambiável.



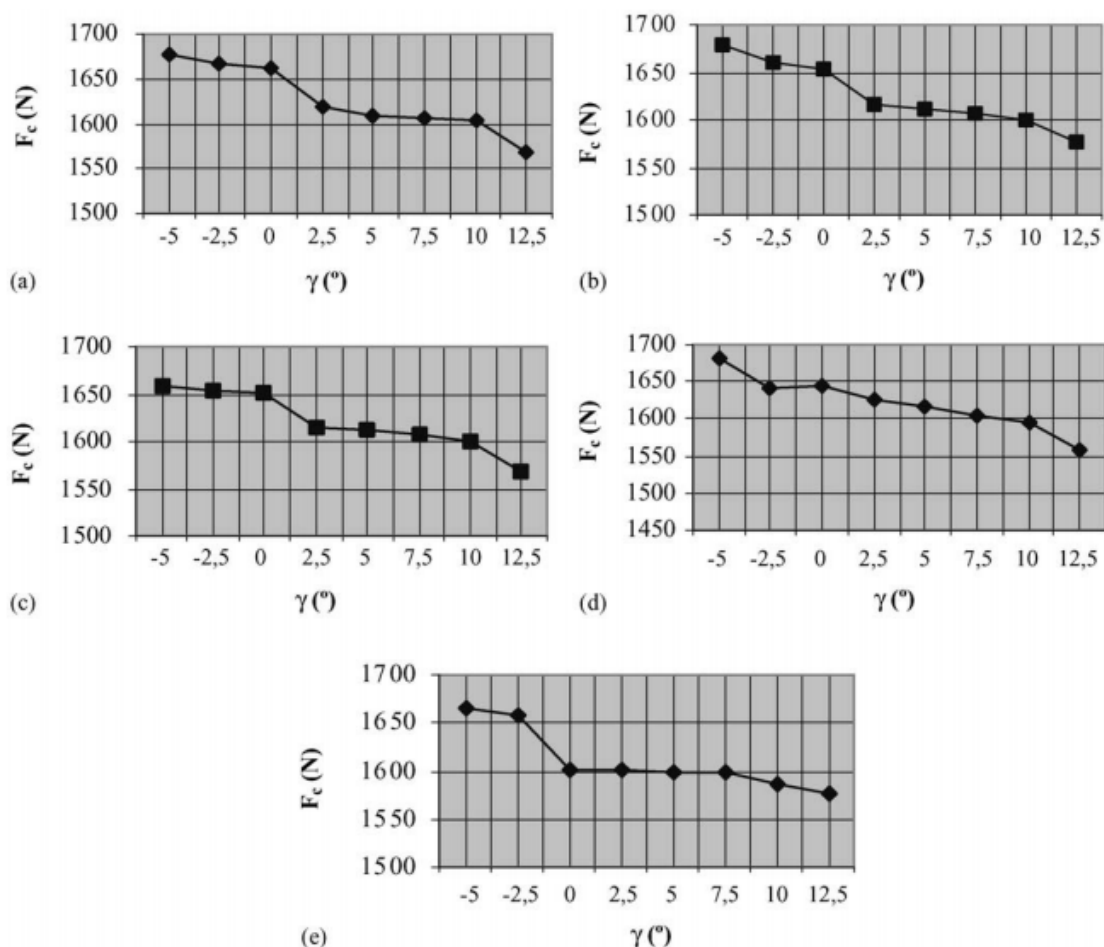
Fonte: Sandvik (2013).

O ângulo de saída da ferramenta de corte por onde o cavaco escoa pode assumir valores negativos e positivos; quanto maiores os valores positivos deste ângulo, menor será a pressão específica de corte necessária durante a usinagem, no entanto, o aumento do ângulo de saída diminui a resistência mecânica da ferramenta, tornando-a sensível ao impacto (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Sempre que possível, é desejável que o ângulo de saída assumira valores menores, visando aumentar a cunha da ferramenta, o que consequentemente melhora a resistência mecânica e proporciona, assim, uma maior vida útil da ferramenta de corte.

Um estudo sobre torneamento realizado por Günay et al. (2005) apresenta a influência do ângulo de saída sobre a força de corte em diferentes velocidades de corte, na usinagem de um aço AISI 1040, no qual cinco ferramentas com diferentes ângulos de saída foram testadas. A Figura 6 mostra os gráficos de força de corte *versus* ângulo de saída.

Ao observar a Figura 6, é fácil notar que o aumento do ângulo de saída, independente da velocidade de corte utilizada, diminui a força de corte gradativamente; isso se deve ao fato de que com ângulos de saída positivos, as forças necessárias para o dobramento do cavaco é cada vez menor.

Figura 6 – Força de corte (F_c) versus ângulo de saída (γ): a) $v_c = 80$ m/min, b) $v_c = 100$ m/min, c) $v_c = 120$ m/min, d) $v_c = 150$ m/min, e) $v_c = 180$ m/min.



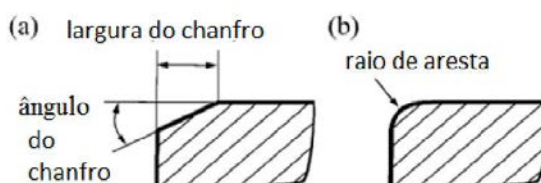
Fonte: Günay et al. (2005).

Quando se usa materiais dúcteis, a influência do ângulo de saída é ainda mais marcante, pois estes materiais se deformam muito antes de se romperem. Para a usinagem de ligas de alumínio que, em geral, apresentam alta ductilidade, é recomendado o uso de ferramentas com geometria positiva em qualquer tipo de operação, facilitando o corte e diminuindo a potência de corte necessária (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O fato de o alumínio apresentar pouca resistência ao corte e ter uma tendência à ocorrência de aresta postiça de corte, indica que a geometria de corte mais apropriada para garantir o cisalhamento perfeito do cavaco é aquela com arestas afiadas (sem raio na aresta) e com ângulos bastante positivos (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Um estudo feito sobre geometria de ferramentas de corte apresentados por Frang e Wu (2005) analisa diferentes tipos de geometrias de ferramentas de corte bem afiadas na usinagem de três diferentes ligas de alumínio 7076-T6, 6061-T6 e 2024-T351. A geometria da aresta das ferramentas utilizadas estão apresentadas na Figura 7, sendo o chanfro e o raio de arredondamento mostrados nas Figuras 7(a) e 7(b), respectivamente. Neste estudo, os autores concluíram que as altas velocidades de corte empregadas na usinagem das ligas diminuíram a força de corte necessária e que para as condições utilizadas, a ferramenta chanfrada necessitou de uma força de corte maior, porém com espessura do cavaco menor em relação à ferramenta com raio na aresta, mostrando que nem sempre forças maiores de usinagem são acompanhadas por espessuras maiores do cavaco.

Figura 7 – Geometria típica de ferramentas de corte comerciais: a) ferramenta com chanfro; b) ferramenta com raio de aresta.



Fonte: Frang e Wu (2005).

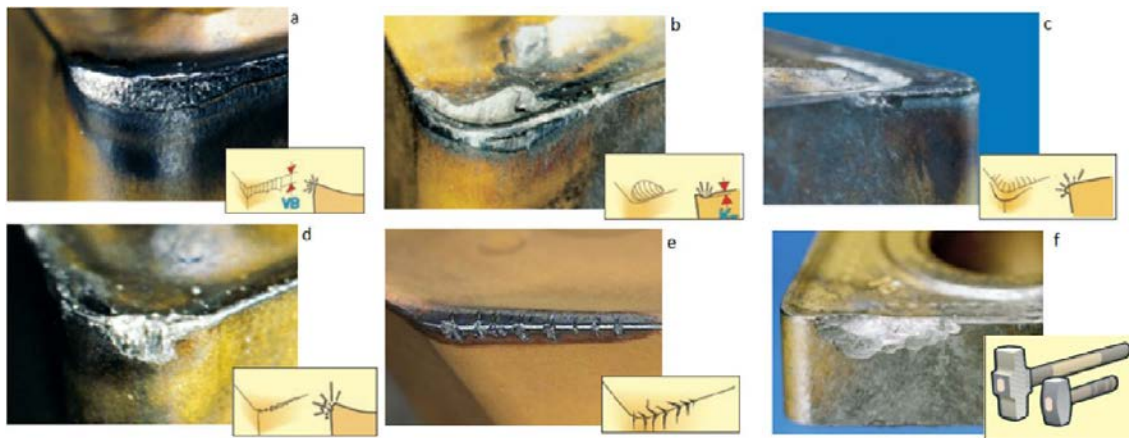
2.5 DESGASTE E VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE

Existem vários tipos de desgaste e avarias que ocorrem nas ferramentas durante os processos de usinagem. Diniz, Marcondes e Coppini (2013) reforçam a importância de diferenciar desgaste de avaria; sendo assim, os autores definem desgaste como a perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte e todas as outras ocorrências são denominadas avarias.

Os principais desgastes e avarias que ocorrem nas ferramentas de corte durante os processos de usinagem, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), são:

- Desgaste frontal (ou de flanco) – ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre a ferramenta e a peça, como mostra a Figura 8(a). É o desgaste mais comum nas ferramentas aplicadas em processos de usinagem;
- Desgaste de cratera – ocorre na superfície de saída da ferramenta, originado pelo atrito entre o cavaco e a ferramenta; dependendo do material da peça e da ferramenta, este tipo de desgaste pode não ocorrer. A evolução do desgaste de cratera, mostrado na Figura 8(b), pode acarretar na quebra da ferramenta, se o mesmo aumentar a ponto de encontrar com o desgaste de flanco;
- Deformação plástica da aresta de corte – um tipo de avaria da ferramenta causado devido à pressão aplicada na ponta da ferramenta juntamente com as altas temperaturas de usinagem, de forma bem característica como mostra a Figura 8(c). Esta avaria provoca deterioração do acabamento da peça e deficiência no controle do cavaco;
- Lascamento – avaria onde partes maiores da ferramenta de corte são retiradas de uma só vez em comparação com os desgastes de cratera e de flanco, como mostra a Figura 8(d). Geralmente é causado por arestas de corte pouco reforçadas ou com ferramentas compostas de materiais frágeis;
- Trincas – avarias causadas por variação de temperatura e/ou variação dos esforços mecânicos durante os processos de usinagem, como mostra a Figura 8(e). As trincas decorrentes de variação térmica são perpendiculares à aresta de corte, ao passo que as origens mecânicas aparecem paralelas à aresta de corte;
- Quebra – pode ser proveniente dos desgastes acentuados vistos anteriormente ou também ocorrer inesperadamente em ferramentas muito duras, carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponta, ângulo de ponta ou ângulo de cunha pequenos, entupimento dos canais de expulsão de cavacos, entre outros. A quebra de uma ferramenta pode ocasionar danos não só à ferramenta, mas também ao porta-ferramentas e até mesmo à peça. A Figura 8(f) ilustra um inserto de metal duro cuja aresta principal sofreu uma quebra.

Figura 8 – Desgastes e avarias das ferramentas de corte.



Fonte: Sandvik (2013).

Santos Junior (2012) afirma que o principal mecanismo de desgaste para as ligas de alumínio são os de flanco abrasivo e flanco adesivo.

O desgaste por meios abrasivo é o deslocamento de pequenas porções de material devido a presença de partículas duras entre duas superfícies em contato e em movimento relativo entre si (GAHR, 1987).

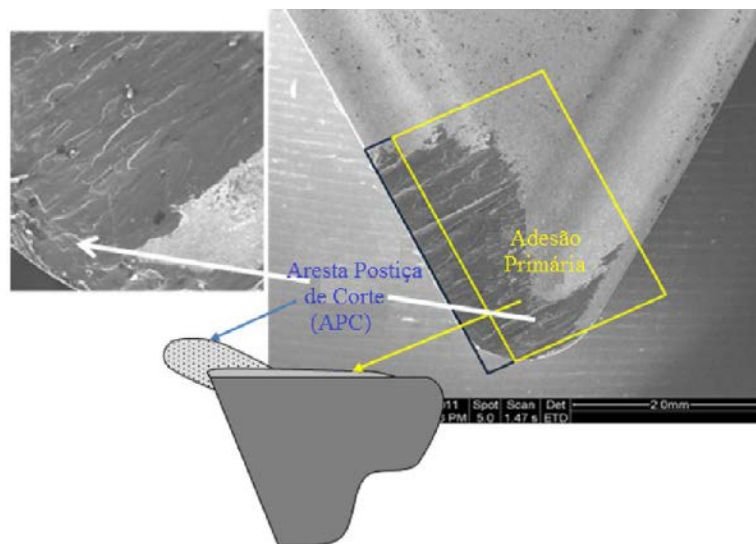
Gahr (1987) diz que o mecanismo de adesão é a formação de solda fria na interface de contato entre as partes de dois materiais devido a altas pressões exercidas entre dois materiais, havendo uma deformação plástica que, por consequência, o material é aderido à superfície. A tendência à adesão está diretamente ligada às características físico-químicas de cada material.

Aderência nos processos de usinagem pode ocorrer a baixas velocidades de corte e baixas temperaturas, na qual um extrato metálico é formado entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, o que provoca aderência, e tal extrato possui uma resistência elevada, ao ponto de haver ruptura de um dos materiais ao se tentar removê-lo. Este fenômeno pode causar por si só desgaste das ferramentas de corte, e é também o principal fenômeno presente na formação de aresta postiça de corte (APC), que é a aderência de material do cavaco na superfície de saída da ferramenta de corte, modificando seu comportamento em relação às forças de corte, acabamento da peça e desgaste da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Gómez-Parra et al. (2013) afirmam que o desgaste das ferramentas de corte pelo mecanismo de adesão podem ocorrer de duas maneiras; desgaste por adesão primária ou adesão direta, causado pela incorporação de partículas da ferramenta no cavaco, e desgaste por adesão indireta ou adesão secundária, causado pela incorporação de fragmentos do material da peça à

ferramenta dando origem à aresta postiça de corte (APC). Ao usinar uma liga Al-Zn, o autor observou os dois tipos de adesão na superfície de saída da ferramenta, como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Superfície de saída de uma ferramenta de torneamento com adesão de alumínio e APC.



Fonte: Gómez-Parra et al. (2013).

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) e Gómez-Parra et al. (2013) explicam que em baixas velocidades de corte, a parte inferior do cavaco em contato com a superfície de saída da ferramenta, sob a pressão de corte na zona de aderência, mantém esse contato sem que haja movimento relativo por tempo suficiente para se soldar à ferramenta, separando-se de outras partes de cavaco e permanecendo presa à superfície de saída. Essa camada de cavaco soldada à ferramenta com a continuidade do processo de usinagem se deforma e encrua, aumentando sua resistência mecânica e fazendo às vezes de aresta de corte. Esta aresta vai crescendo gradualmente até que se desprende, levando parte da ferramenta de corte e causando um desgaste de flanco considerável.

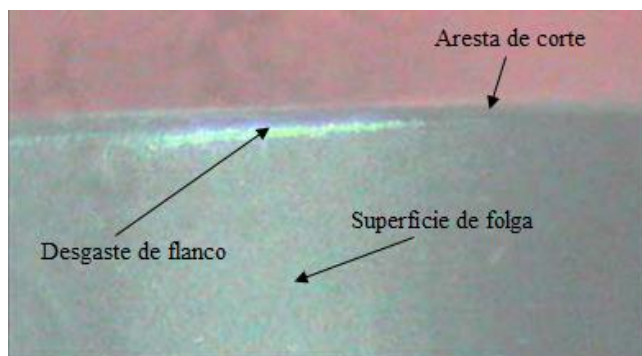
Nos ensaios feitos por Gómez-Parra et al. (2013), na usinagem de uma liga Al-Zn, foi observada a presença dos dois tipos de adesão, a primária e a secundária

Chen e Sun (2013) usinaram uma liga de alumínio-silício com ferramentas de nitreto de silício revestidas com camadas de diamante depositadas pelo processo de deposição química a vapor (CVD); para este estudo os autores usaram múltiplas camadas de revestimento de diamante microcristalino (MCD) e nanocristalino (NCD) e, para comparação, utilizaram revestimentos convencionais com monocamadas de MCD e NCD, e também ferramentas sem

revestimento. Todas as ferramentas revestidas apresentaram vantagens em relação às ferramentas sem revestimento, pois o filme de diamante depositado sobre as ferramentas protegeu o substrato contra o desgaste severo, devido à sua alta dureza e resistência ao desgaste, tendo um papel decisivo no aumento da vida útil da ferramenta. O desgaste de flanco foi o principal mecanismo de desgaste registrado neste trabalho, ocasionando o fim de vida destas ferramentas, sendo que as ferramentas revestidas com múltiplas camadas de MCD/NCD foram as que apresentaram o menor desgaste de flanco; somente após 3000 m de material usinado, o desgaste de flanco começou a aparecer.

A Figura 10 apresenta o desgaste de flanco de uma ferramenta para torneamento, revestida com múltiplas camadas de filmes de diamante MCD/NCD após 3000 m de comprimento de material usinado (liga de alumínio-silício).

Figura 10 – Desgaste de flanco de um inserto de nitreto de silício revestido com multicamadas de diamante MCD/NCD após 3000 m de comprimento de corte.

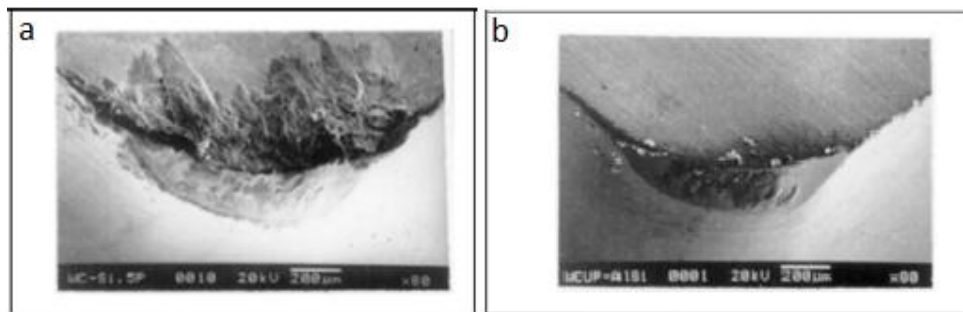


Fonte: Chen e Sun (2013).

Liang, Vohra e Thompson (2008) usinaram uma liga de alumínio-silício A390 com ferramentas revestidas com diamante policristalino (PCD); a presença de partículas abrasivas de silício desgastou o filme de diamante gradativamente até o aparecimento do substrato de WC.

Roy et al. (2009) observaram em seu estudo desgastes de flanco consideráveis na ferramenta de usinagem, no torneamento de uma liga de alumínio-silício com 12% de silício; os principais mecanismos de desgaste observados foram o desgaste abrasivo e a adesão da liga na ponta da ferramenta. A Figura 11 mostra a adesão na ponta de uma ferramenta de metal duro classe K10 sem revestimentos após 30 segundos de usinagem.

Figura 11 – Adesão (a) e desgaste de flanco (b) em uma ferramenta classe K10 na usinagem de uma liga de alumínio-silício após o tempo de corte de 30 s.



Fonte: Roy et al. (2009).

As ferramentas de metal duro da classe K são compostas de carboneto de tungstênio aglomerado pelo cobalto. Esse tipo de metal duro não é resistente ao mecanismo que gera o desgaste de cratera, sendo assim, é indicado para a usinagem de materiais frágeis e que formam cavacos curtos, como é o caso do ferro fundido e do bronze. O alumínio, mesmo apresentando cavacos contínuos, não pode ser usinado por metais duros à base de carboneto de titânio, devido à afinidade química entre o alumínio e o titânio (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; WEINGAERTNER; SCHROETER, 1990). Assim, ligas de alumínio são usinados por metal duro da classe K, respeitando a nova denominação da norma ISO 513:2004E, que expandiu o número de classes de metal duro criando três novas classes. Uma das novas classes criadas foi a classe N indicada para usinagem de metais não ferrosos. Nesta nova abordagem, a ISO não classifica o metal duro baseado somente em sua composição química, mas também na aplicação do material. Nesta nova classificação, a classe N tem composição química similar à classe K (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013)

Fox-Rabinovich et al. (2011) apresentaram em seus estudos a usinagem com mínima quantidade de fluido (MQF) de uma liga fundida de alumínio-silício B319; para tanto, utilizaram brocas de metal duro com vários revestimentos. Dentre os revestimentos utilizados, os dois que apresentaram os melhores resultados foram os revestimentos de diamante e de DLC (*Diamond Like Carbon*) baixo hidrogênio. Inicialmente, os testes apresentaram desgaste mais acentuado para as brocas revestidas com DLC em comparação com as brocas revestidas com diamante, tornando o revestimento de diamante mais promissor. Porém, com a continuidade dos testes, foram obtidos resultados inesperados; as ferramentas revestidas com DLC apresentaram ao final de sua vida desgastes menores em relação às ferramenta revestidas com

diamante e, conseqüentemente, maior vida útil. O principal mecanismo de desgaste observado em seu trabalho foi a intensa adesão do material da peça nas ferramentas revestidas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este item apresenta os materiais e os métodos utilizados para a realização dos testes de usinagem visando acompanhar e avaliar a evolução do desgaste da ferramenta. Este capítulo está dividido em, planejamento experimental, banco de ensaios, corpos de prova, ferramentas de corte e equipamentos e procedimentos experimentais.

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O presente trabalho consiste na usinagem por sangramento de duas diferentes ligas de alumínio-silício utilizando um centro de torneamento. Os parâmetros de corte adotados como variáveis de entrada foram velocidade de corte (v_c) e avanço por volta (f), compreendidos dentro da faixa de parâmetros indicados pelo fabricante da ferramenta em estudo, que é de 190 a 1875 m/min para velocidade de corte e de 0,04 a 0,17 mm/rotação para o avanço. Todos os ensaios foram realizados sem o uso de fluido lubrificante-refrigerante.

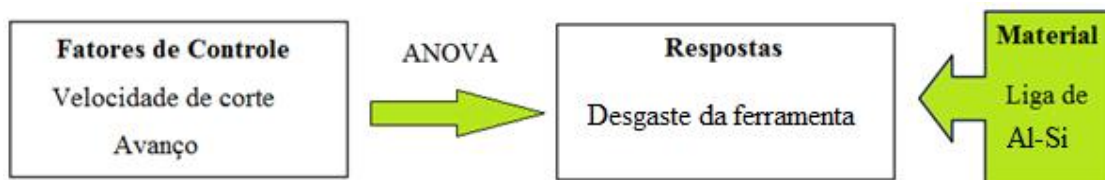
Os ensaios foram divididos em duas etapas. Na primeira etapa, foram usinados duas ligas de alumínio-silício com diferentes quantidades de silício; para tanto, foram utilizadas duas velocidades de corte e dois avanços, e a cada três canais executados a ferramenta era submetida ao estereomicroscópio para o acompanhamento da evolução do desgaste. A Tabela 5 apresenta as variáveis de entrada (fatores de controle) e o número respectivo de variações (níveis).

Tabela 5 – Variáveis de entrada e os níveis adotados nos ensaios de usinagem.

Ligas de Al-Si	16,4% Si				12,5% Si			
	v_c [m/min]		f [mm/rot]		v_c [m/min]		f [mm/rot]	
	500	1000	0,08	0,15	500	1000	0,08	0,15

Fonte: Elaboração do próprio autor

Como pode ser observado na Tabela 5, foram estudados três fatores, a liga de alumínio-silício, a velocidade de corte e o avanço, sendo dois níveis para cada fator. A variável de saída foi o desgaste das ferramentas. O critério adotado como fim de vida da ferramenta foi desgaste de flanco (V_b) igual 0,3 mm. A Figura 12 mostra de maneira esquemática os fatores de controle e as variáveis de saída. Para a análise dos resultados, foi utilizada análise de variância (ANOVA) em um experimento fatorial 2^k com duas réplicas (2 observações) e com nível de significância de 5%, tendo em vista verificar se os fatores de controle tem influência nas variáveis de saída e o quanto é essa influência.

Figura 12 – Fatores de controle e resposta

Fonte: Elaboração do próprio autor

Na segunda etapa dos ensaios, procurou-se executar canais continuamente simulando condições reais de fabricação sem paradas para acompanhamento da evolução do desgaste. Para tanto, uma das ligas de alumínio-silício foram usinados com canais radiais assim como nos primeiros ensaios, porém nesta etapa a velocidade de corte e o avanço foram fixados em 1000 m/min e 0,08 mm/rotação, respectivamente. O critério de fim de vida adotado para esta ferramenta foi o desgaste de flanco $V_b = 0,3$ mm.

3.2 BANCO DE ENSAIOS

Os ensaios de usinagem foram realizados em um centro de torneamento marca Romi, modelo GL-240M, que se encontra no Laboratório de Usinagem da Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP).

As amostras foram fixadas em uma placa universal de três castanhas, com auxílio de um contraponto rotativo, ambos com acionamento hidráulico. As castanhas utilizadas na fixação dos corpos de prova são conhecidas como “castanhas moles”, pois elas podem ser usinadas com o objetivo de melhorar a fixação dos corpos de prova. A Figura 13 mostra os dispositivos de fixação utilizados.

Figura 13 – Dispositivos de fixação utilizados nos ensaios de usinagem.



Fonte: Elaboração do próprio autor

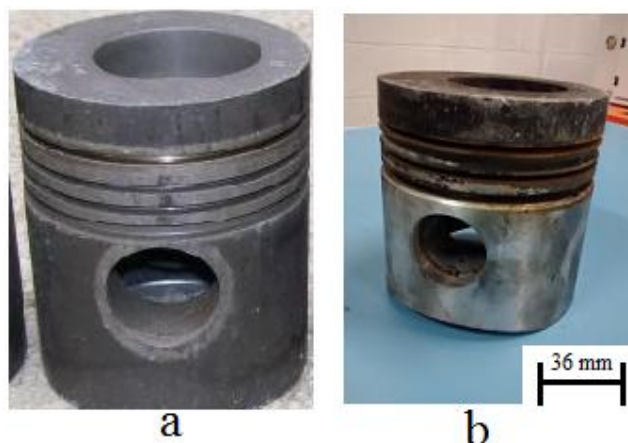
As ferramentas de corte foram fixadas em um suporte para bedame Sandvik BF123G20-2020B, que por sua vez foi fixado na torre do centro de torneamento.

Os desgastes de flanco observados foram acompanhados pelo estereo-microscópio marca ZEISS, modelo SteREO Discovery V8, pertencente ao laboratório de Caracterização Microestrutural da FEIS/UNESP.

3.3 CORPOS DE PROVA

Para a realização dos ensaios, foram utilizados como corpo de prova pistões de motor de combustão interna diesel da marca Mahle, adquiridos em retífica de motores e oficinas de mecânica diesel. Todos os pistões adquiridos eram usados. O primeiro grupo de pistões adquiridos era de um motor Mercedes OM 355, sendo utilizadas cinco unidades com diâmetro de 127 mm e altura de 155 mm, como mostra a Figura 14(a). O segundo grupo de pistões, com 80 peças, eram de motores MWM d229 com diâmetro de 102 mm e altura de 100 mm, como mostrado na Figura 14(b).

Figura 14 – Corpos de prova utilizados nos ensaios de usinagem: (a) diâmetro 127 x 155 mm; (b) diâmetro 102 x 100 mm.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Os dois grupos de corpos de prova foram fabricados com diferentes ligas de alumínio-silício, a Tabela 6 mostra a composição química dos diferentes corpos de prova. As análises das composições químicas dos corpos de prova foram feitas por Espectrometria Ótica, no LAMAT (Laboratório de Ensaios e Análise em Materiais) do SENAI de Itaúna Minas Gerais.

Tabela 6 – Composição química das ligas de alumínio-silício utilizadas nos ensaios de usinagem (% em peso).

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
1º Grupo	16,414	0,456	1,241	0,018	1,024	0,008	0,957	0,020	0,020
2º Grupo	12,490	0,291	1,237	0,250	0,914	0,007	1,033	0,020	0,0766

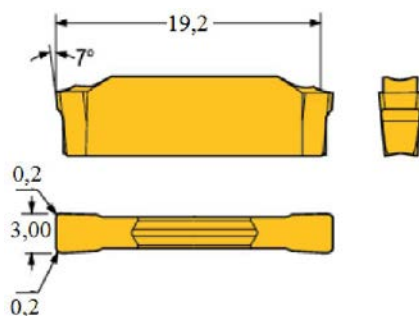
Fonte: Laboratório de Materiais- LAMAT (2015).

Como pode ser observado na Tabela 6, os elementos de liga tem valor percentual absoluto aproximado, com exceção do silício que apresenta uma diferença de aproximadamente 4% em peso.

3.4 FERRAMENTAS DE CORTE

Para ambos os testes de sangramento radial, foram utilizados nove insertos tipo bedame N123G2-0300-0002-GF H13A de classe de usinagem “N” do fabricante “Sandvik”, indicados para usinagem de ligas de alumínio, cujas dimensões são apresentadas na Figura 15.

Figura 15 – Inserto Sandvik N123G2-0300-0002-GF H13A.



Fonte: Sandvik (2013).

3.5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O procedimento experimental foi dividido em duas etapas de ensaios. Na primeira etapa foram realizados os ensaios de usinagem para análise de variância e na segunda etapa, foram executados ensaios buscando simular condições reais aplicadas no dia-a-dia das indústrias de usinagem.

3.5.1 Primeira etapa de ensaios

Para os ensaios de usinagem, os corpos de prova foram usinados com canais radiais, distantes axialmente entre si de 1 mm, empregando-se a operação de sangramento. O volume de material removido permaneceu constante em todos os ensaios no valor de 5600 mm³ por canal usinado.

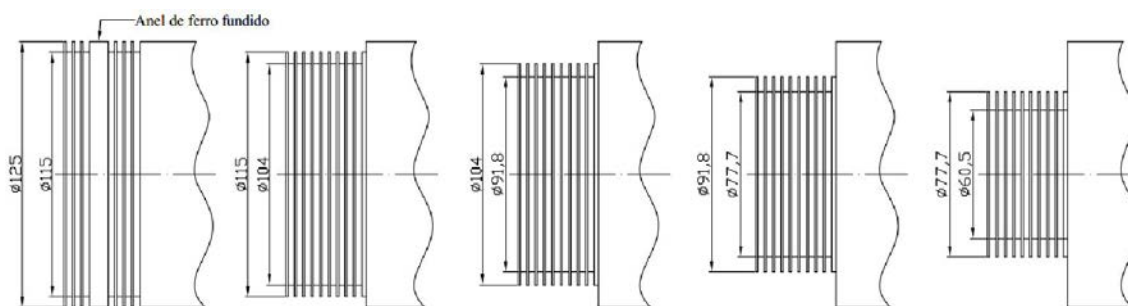
Para a primeira etapa de ensaios, as velocidades de corte (v_c) e os avanços (f) utilizado foram de 500 m/min, 1000 m/min e 0,08 mm/rotação, 0,15 mm/rotação, respectivamente.

Para esta primeira etapa, os ensaios foram divididos em dois momentos. No primeiro momento, foram usinados os corpos de prova com maior porcentagem de silício, ou seja, o grupo com 5 pistões e, no segundo momento, foi usinado o outro grupo de pistões com o percentual de silício inferior (73 pistões).

Para o primeiro momento, os pistões foram enumerados de 1 a 5. Inicialmente os corpos de prova foram torneados para o diâmetro de 125 mm, retirando imperfeições da superfície, uma vez que os mesmos eram usados. A usinagem dos canais teve início então com os corpos de prova apresentando diâmetro de 125 mm; a medida que os canais foram usinados,

a superfície cilíndrica do corpo de prova era torneada, permitindo a execução de novos canais; este procedimento foi repetido até que os corpos de prova apresentassem diâmetro de 77,7 mm. A Figura 16 mostra um desenho esquemático dos pistões a medida em que os mesmos foram usinados.

Figura 16 – Quantidade de canais executados por diâmetro usinado para cada pistão do primeiro grupo.

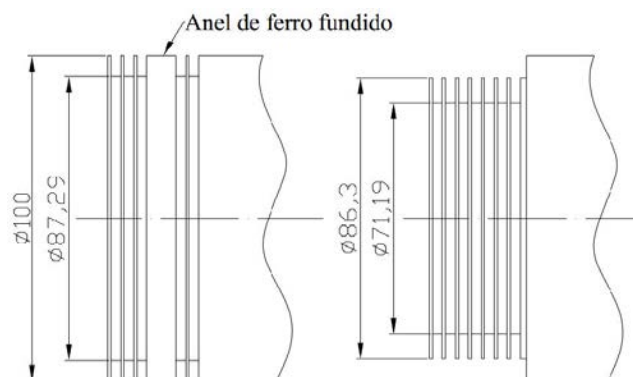


Fonte: Elaboração do próprio autor

Como pode ser observado na Figura 16, para o primeiro diâmetro usinado foram executados 5 canais, pois os pistões possuíam um anel de ferro fundido no meio da cabeça do pistão; ao usinar a cabeça do pistão para o diâmetro de 115 mm, este anel de ferro fundido foi retirado, permitindo a usinagem de 9 canais por diâmetro torneado. Podem ser observadas também na Figura 16 as medidas dos diâmetros iniciais e do diâmetros do fundo do canal.

Para o segundo momento dos primeiros ensaios, foi utilizado o segundo grupo de pistões; os corpos de prova foram enumerados de 1 a 73. Inicialmente, os corpos de prova foram torneados para o diâmetro de 100 mm afim de regularizar a superfície, uma vez que os mesmos eram usados. A usinagem dos canais teve início com os corpos de prova com diâmetro de 100 mm, sendo usinados 5 canais para este diâmetro; à medida que os canais foram usinados, a superfície cilíndrica do corpo de prova era torneada para o diâmetro de 86,3 mm, onde foram executados mais 7 canais para cada corpo de prova. A Figura 17 mostra um desenho esquemático dos pistões à medida em que os mesmos foram usinados.

Figura 17 – Quantidade de canais executados por diâmetro usinado para o segundo grupo de pistões.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Como pode ser observado na Figura 17, para o primeiro diâmetro usinado, foram executados 5 canais, pois os pistões possuíam um anel de ferro fundido no meio da cabeça do pistão; ao usinar a cabeça do pistão para o diâmetro de 86,3 mm, este anel de ferro fundido foi retirado, permitindo a usinagem de mais 7 canais em cada pistão. Podem ser observadas também na Figura 17 as medidas dos diâmetros iniciais e dos diâmetros do fundo do canal.

Para esta primeira etapa de ensaios, a cada três canais executados, a ferramenta foi submetida ao estéreo-microscópio para análise visual e dimensional. Antes de levar a ferramenta ao estéreo-microscópio, o excesso de alumínio acumulado na superfície de folga da ferramenta, que impedia a visualização do desgaste, era removido. Após a execução das medições e das análises visuais, a ferramenta retornava ao centro de torneamento e, então, o procedimento era repetido até o fim da vida da ferramenta.

3.5.2 Segunda etapa de ensaios

A segunda etapa de testes consistiu em usinar canais nas mesmas condições da primeira etapa de ensaios, porém com velocidade de corte e avanço constantes no valor de 1000 m/min e 0,08 mm/rotação, respectivamente. Nesta etapa de ensaios, procurou-se simular condições reais de usinagem, em que a ferramenta trabalharia sem interrupção para medição do desgaste e sem que a mesma fosse limpa a cada três canais, para verificar se a limpeza das ferramentas poderia influenciar na produtividade de canais até que a mesma atingisse o fim de sua vida. Para este ensaio, foram utilizados corpos de prova semelhantes aos da Figura 14(b) e os canais foram executados como mostrado na Figura 17. Foram utilizados 7 corpos de prova

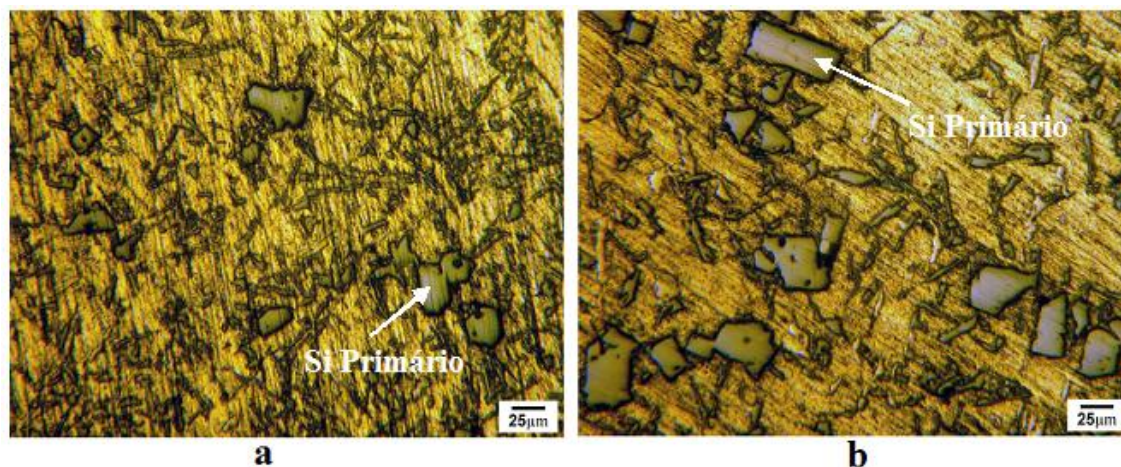
sendo os mesmos enumerados de 74 a 80. Para análise visual e dimensional a ferramenta foi submetida ao estéreo-microscópio após o fim de sua vida.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados e discussões dos testes realizados. Os testes foram divididos em duas etapas, na primeira foram utilizadas oito arestas de corte e na segunda etapa, apenas uma aresta de corte.

Com o objetivo de verificar a existência de partículas de silício potencialmente abrasivas nas ligas estudadas, foi feita uma análise micrográfica. A Figura 18 apresenta as micrografias realizadas nos corpos de prova mostrando a presença do silício na liga. Sendo a Figura 18(a) a micrografia da liga de alumínio com 12,490 % de Si, e a Figura 18(b) a micrografia da liga de alumínio com 16,414 % de Si.

Figura 18 – Foto micrografia das ligas de alumínio: (a) liga com 12,49 % de Si; (b) liga com 16,414 % de Si.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Como pode ser notado na Figura 18(b), qualitativamente mostra maior fração volumétrica de partículas de silício. Tornando estes corpos de prova potencialmente mais abrasivos durante a usinagem.

4.1 ETAPA 1 – EFEITO DOS PARÂMETROS DE CORTE NO DESGASTE

A primeira etapa do trabalho foi dividida em dois momentos de ensaios, pois foram usinadas duas ligas de alumínio-silício com diferentes porcentagens de silício. No primeiro momento, foram utilizadas 4 arestas de corte na usinagem da liga com 16% de silício e no

segundo momento foram utilizadas mais 4 arestas de corte na usinagem da liga com 12% de silício.

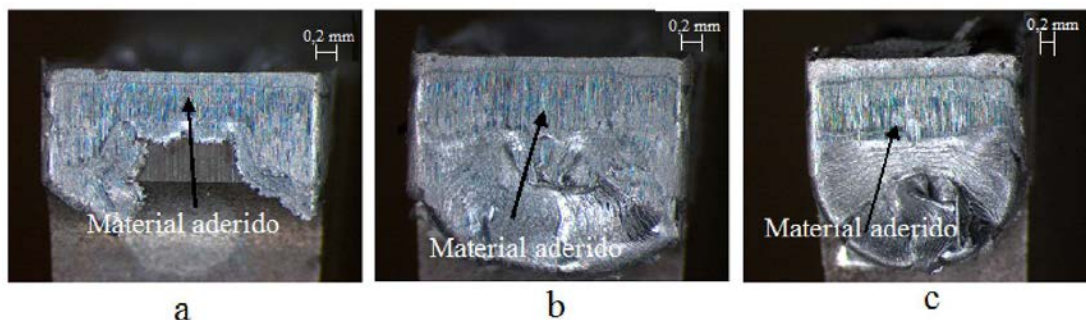
4.1.1 Liga de alumínio-silício com 16% Si

Durante a usinagem da liga de alumínio-silício com 16% de silício, foi observada em todos os canais executados a aderência da liga de alumínio, tanto na superfície principal de folga, como nas superfícies de saída e secundárias de folga. À medida que o desgaste de flanco aumentava, a quantidade de material aderido à superfície também aumentava.

As Figuras 19 a 22 mostram a adesão do material na superfície principal de folga das ferramentas ao longo de sua vida.

A ferramenta representada na Figura 19 foi utilizada com $v_c = 1000$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação. A Figura 19(a) mostra a adesão do material após 3 canais usinados e $V_b = 0,10$ mm; a Figura 19(b) mostra a adesão do material após 6 canais usinados e $V_b = 0,18$ mm; por fim, a Figura 19(c) mostra a adesão do material após 12 canais usinados e $V_b = 0,3$ mm. Em uma análise qualitativa é possível afirmar que a medida que o desgaste de flanco evoluiu, a quantidade de material aderido à superfície principal de folga aumentou.

Figura 19 – Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 1000$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação): (a) após 3 canais, (b) após 6 canais e (c) após 12 canais.

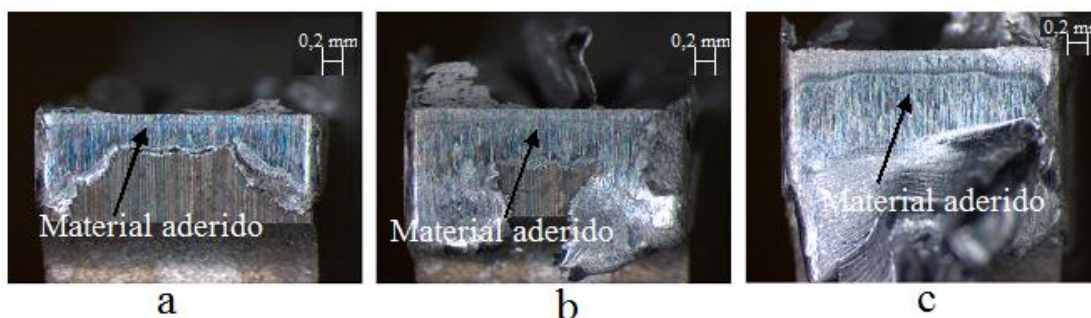


Fonte: Elaboração do próprio autor

A ferramenta representada na Figura 20 foi utilizada com $v_c = 1000$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação. A Figura 20(a) mostra a adesão do material após 3 canais usinados e $V_b = 0,10$ mm; a Figura 20(b) mostra a adesão do material após 6 canais usinados e $V_b = 0,15$ mm; por fim, a Figura 20(c) mostra a adesão do material após 18 canais usinados e

$V_b = 0,31$ mm. Em uma análise qualitativa é possível afirmar que a medida que o desgaste de flanco evoluiu, a quantidade de material aderido à superfície principal de folga aumentou.

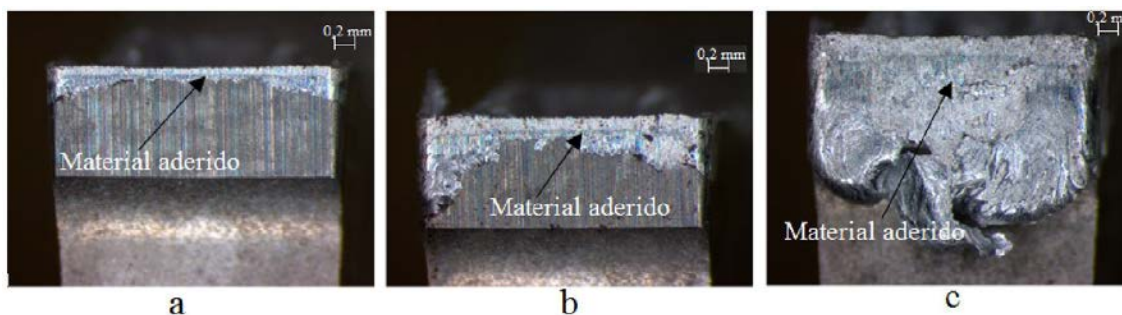
Figura 20 – Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 1000$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação): (a) após 3 canais, (b) após 6 canais e (c) após 18 canais.



Fonte: Elaboração do próprio autor

A ferramenta representada na Figura 21 foi utilizada com $v_c = 500$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação. A Figura 21(a) mostra a adesão do material após 3 canais usinados e $V_b = 0,07$ mm; a Figura 21(b) mostra a adesão do material após 9 canais usinados e $V_b = 0,16$ mm; por fim, a Figura 21(c) mostra a adesão do material após 24 canais usinados e $V_b = 0,30$ mm. Em uma análise qualitativa é possível afirmar que a medida que o desgaste de flanco evoluiu, a quantidade de material aderido à superfície principal de folga aumentou.

Figura 21 – Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 500$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação): (a) após 3 canais, (b) após 9 canais e (c) após 24 canais.

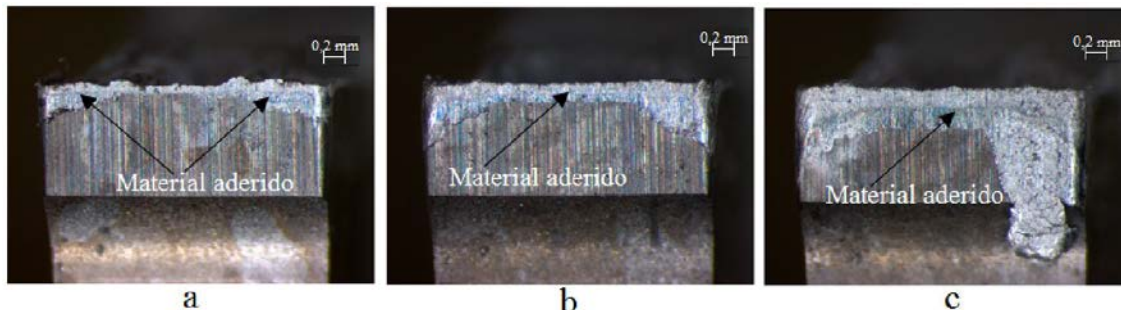


Fonte: Elaboração do próprio autor

A ferramenta representada na Figura 22 foi utilizada com $v_c = 500$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação. A Figura 22(a) mostra a adesão do material após 3 canais usinados e $V_b = 0,09$ mm; a Figura 22(b) mostra a adesão do material após 15 canais usinados e

$V_b = 0,16$ mm; por fim, a Figura 22(c) mostra a adesão do material após 39 canais usinados e $V_b = 0,30$ mm. Em uma análise qualitativa é possível afirmar que a medida que o desgaste de flanco evoluiu, a quantidade de material aderido à superfície principal de folga aumentou.

Figura 22 – Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 500$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação): (a) após 3 canais, (b) após 15 canais e (c) após 39 canais.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Para as condições apresentadas anteriormente, através de uma análise visual é possível notar pelas Figuras 19 e 20 que, à medida que o desgaste de flanco evoluiu, as ferramentas que usinaram com velocidade de corte de 1000 m/min apresentaram maior quantidade de material aderido à superfície principal de folga em comparação com as ferramentas que usinaram com velocidade de corte de 500 m/min (Figuras 21 e 22). Independente da velocidade de corte, por meio das análises visuais (Figuras 19 e 21), o avanço de 0,08 mm/rotação apresentou maior quantidade de material aderido à superfície principal de folga da ferramenta em comparação ao avanço de 0,15 mm/rotação (Figuras 20 e 22). A medida em que os canais eram usinados, tanto o desgaste de flanco quanto a adesão do material na superfície principal de folga da ferramenta aumentaram, provavelmente a medida que o material aderido à superfície da ferramenta foi se destacando levou parte do material da ferramenta contribuindo para evolução do desgaste.

A Tabela 7 apresenta a evolução do desgaste de flanco do bedame em relação à quantidade de canais usinados. Para cada combinação de parâmetros, foram realizadas duas réplicas do teste (2 observações).

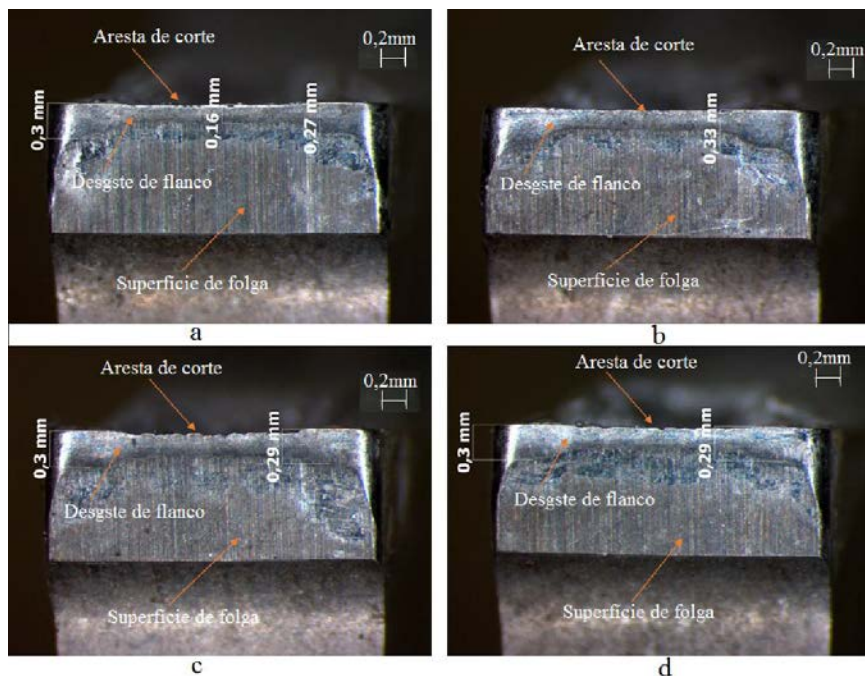
Tabela 7 – Desgaste de flanco em relação à quantidade de canais usinados para a liga Al-Si com 16% Si (v_c em m/min e f em mm/rotação).

Parâmetros	$v_c=500$ $f=0,08$		$v_c=500$ $f=0,15$		$v_c=1000$ $f=0,08$		$v_c=1000$ $f=0,15$	
Réplicas	1	2	1	2	1	2	1	2
Quantidade de canais	V_b [mm]							
3	0,07	0,08	0,09	0,09	0,1	0,1	0,1	0,12
6	0,12	0,12	0,09	0,1	0,18	0,18	0,15	0,17
9	0,15	0,15	0,11	0,12	0,2	0,23	0,2	0,17
12	0,18	0,21	0,14	0,15	0,3	0,28	0,23	0,23
15	0,22	0,23	0,16	0,17	-	0,33	0,29	0,28
18	0,25	0,26	0,17	0,18	-	-	0,31	0,32
21	0,28	0,27	0,19	0,19	-	-	-	-
24	0,3	0,29	0,21	0,21	-	-	-	-
27	-	0,3	0,23	0,22	-	-	-	-
30	-	-	0,26	0,26	-	-	-	-
33	-	-	0,27	0,27	-	-	-	-
36	-	-	0,28	0,29	-	-	-	-
39	-	-	0,3	0,29	-	-	-	-
42	-	-	-	0,33	-	-	-	-

Fonte: Elaboração do próprio autor

As ferramentas que usinaram os canais com $v_c = 500$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação produziram 24 canais para primeira réplica e 27 canais para segunda réplica; as Figuras 23(a) e (b) mostram, respectivamente, a superfície principal de folga com o desgaste de flanco após o fim da vida da ferramenta para as duas réplicas. As ferramentas que usinaram com $v_c = 500$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação produziram 39 canais para primeira réplica e 42 canais para segunda réplica; as Figuras 23(c) e (d) mostram, respectivamente, a superfície principal de folga com o desgaste de flanco após o fim da vida da ferramenta para as duas réplicas.

Figura 23 – Superfície de folga com desgaste de flanco $v_c = 500$ m/min: a) 1ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot., b) 2ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot., c) 1ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot., d) 2ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot.

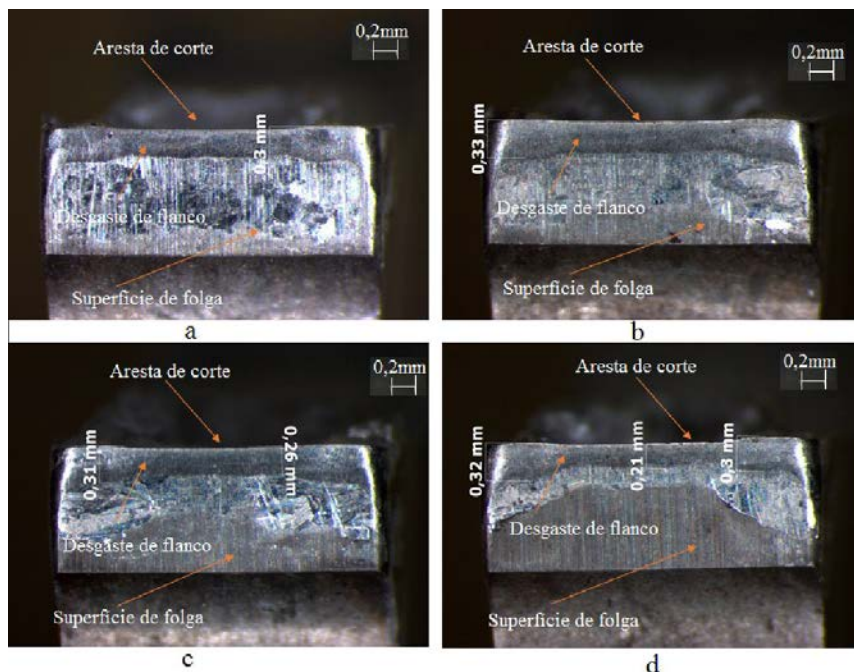


Fonte: Elaboração do próprio autor

As ferramentas que usinaram os canais com $v_c = 1000$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação produziram 12 canais para primeira réplica e 15 canais para segunda réplica; as Figuras 24(a) e (b) mostram, respectivamente, a superfície principal de folga com o desgaste de flanco após o fim da vida da ferramenta para as duas réplicas. As ferramentas que usinaram com $v_c = 1000$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação produziram 18 canais para ambas as réplicas; as Figuras 24(c) e (d) mostram, respectivamente, a superfície principal de folga com o desgaste de flanco após o fim da vida da ferramenta para as duas réplicas.

As ferramentas que usinaram os canais com velocidade de corte de 500 m/min apresentaram pequenas avarias na aresta de corte como observado na Figura 23; este fato pode estar relacionado com o maior volume de material cortado, o que pode ter motivado a formação de aresta postiça de corte (APC), em comparação aos bedames que usinaram com $v_c = 1000$ m/min, nos quais tais avarias não ocorreram como observado na Figura 24.

Figura 24 – Superfície de folga com desgaste de flanco $v_c = 1000$ m/min: a) 1ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot., b) 2ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot., c) 1ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot., d) 2ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot.

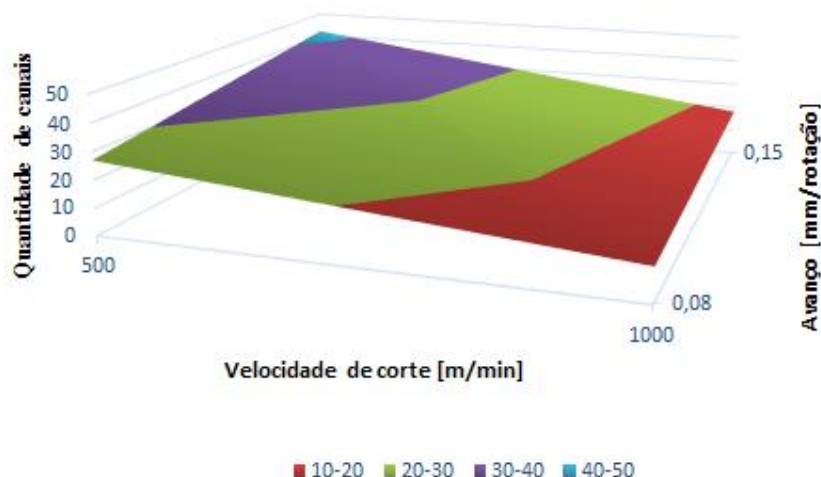


Fonte: Elaboração do próprio autor

A segunda réplica do bedame que usinou os canais com $v_c = 500$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação obteve maior vida da ferramenta usinando 42 canais; o bedame que apresentou pior vida da ferramenta foi o da primeira réplica do bedame que usinou os canais com $v_c = 1000$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação, usinando 12 canais.

Analisando a variação da velocidade de corte para o avanço de 0,08 mm/rotação, pode ser observado através da Figura 25 que ao diminuir a velocidade de corte em 50%, passando de 1000 m/min para 500 m/min, a ferramenta usinou 125% (de 12 para 27 canais) mais canais, passando da região vermelha (10-20 canais) para a região verde (20-30 canais) do gráfico. E ao analisar a variação da velocidade de corte para o avanço de 0,15 mm/rotação, pode ser observado através da Figura 25 que ao diminuir a velocidade de corte em 50%, a ferramenta usinou 133% (de 18 para 42 canais) mais canais, passando da região vermelha (10-20 canais) para a região azul (40-50 canais) do gráfico. Como esperado, com o aumento da velocidade de corte, a ferramenta obteve uma diminuição considerável na quantidade de canais usinados; possivelmente com o aumento da velocidade de corte, houve uma elevação da temperatura na região de corte, aumentando o desgaste da ferramenta de corte.

Figura 25 – Resultado comparativo da quantidade de canais usinados em duas velocidades de cortes e dois avanços diferentes na usinagem da liga de Al-Si com 16% Si.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Analisando ainda a Figura 25, ao aumentar o avanço em 87,5%, de 0,08 mm/rotação para 0,15 mm/rotação, e mantendo a velocidade de corte fixa em 500 m/min, a quantidade de canais usinados aumentou 55% (de 27 para 42 canais), passando da região verde (20-30 canais) para região azul (40-50 canais) do gráfico. E para a velocidade de corte de 1000 m/min, como observado na Figura 25, ao aumentar o avanço na mesma proporção, a quantidade de canais usinados aumentou 50% (de 12 para 18 canais) permanecendo na região vermelha do gráfico. O efeito da variação benéfica do avanço na produtividade da ferramenta, em termos percentuais, é menos expressivo que o efeito deletério da velocidade de corte, uma vez que a velocidade de corte é o fator mais influente na vida de uma ferramenta. Como pode ser notado, com o aumento do avanço, houve um aumento na produtividade da ferramenta, possivelmente pelo fato de que com o aumento do avanço, o comprimento de material cortado é menor.

Uma prévia análise dos resultados mostra o quanto é significativa a influência da velocidade de corte em relação à quantidade de canais executados até o fim da vida de cada ferramenta. O avanço também foi fator importante na vida da ferramenta, porém com menos intensidade que a velocidade de corte. Entretanto, para uma análise mais detalhada de tais influências, utilizou-se a ANOVA, a fim de investigar todas as combinações possíveis dos parâmetros de corte utilizados.

Para a realização da análise estatística, cada variável em estudo é dividida em fatores; neste trabalho foram estudados dois parâmetros, a velocidade de corte (v_c), chamada de fator

A, e o avanço (f), chamado de fator B, em 2 níveis cada fator e duas réplicas em cada combinação. As informações a respeito do método estatístico utilizado estão apresentadas no Anexo A. Esta primeira análise consiste em verificar a influência e o efeito dos parâmetros velocidade de corte e avanço na usinagem da liga de alumínio com 16% de silício. Para tanto, foram levantadas as hipóteses a serem testadas:

- H_{0A} : a velocidade de corte (v_c) não influencia na vida da ferramenta;
- H_{1A} : a velocidade de corte (v_c) influencia na vida da ferramenta;
- H_{0B} : o avanço (f) não influencia na vida da ferramenta;
- H_{1B} : o avanço (f) influencia na vida da ferramenta;
- H_{0AB} : a interação entre a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f) não influencia na vida da ferramenta;
- H_{1AB} : a interação entre a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f) influencia na vida da ferramenta.

A Tabela 8 mostra a quantidade de canais para cada combinação de parâmetros, onde as linhas (fator A) correspondem às velocidades de corte e as colunas (fator B), aos avanços.

Tabela 8 – Quantidade de canais para cada combinação de parâmetros na usinagem da liga de Al-Si com 16% Si (v_c em m/min e f em mm/rotação).

v_c	F				Soma
	0,08	0,08	0,15	0,15	
500	24	27	39	42	132
1000	12	15	18	18	63
Soma	78		117		195

Fonte: Elaboração do próprio autor

Com base nos resultados apresentados na Tabela 8, e pela Eq. (4) do Anexo A, foi determinada a soma quadrática total $SQ_T = 853,875$.

Para determinar a soma dos quadrados de A, B e AB, foi apresentada a Tabela 9 com o total de canais usinados para cada combinação de parâmetros.

Tabela 9 – Quantidade de canais para cada fator. Liga Al-Si com maior porcentagem de Si.

Combinação de tratamentos	Canais
a	27
ab	36
b	81
(1)	51

Fonte: Elaboração do próprio autor

Com base nos resultados apresentados na Tabela 9 e pelas Eq. (1) a (3) e (5), do Anexo A, foram determinadas $SQ_A = 595,125$, $SQ_B = 190,125$, $SQ_{AB} = 55,125$ e $SQ_E = 13,475$, respectivamente.

Para análise de variância completa, foi montada com base na Tabela 19 do Anexo A a Tabela 10 com os valores da soma dos quadrados, os graus de liberdade, a média quadrática, F_{0cal} , F_{0tab} e o resultado. O valor de F_{0tab} foi extraído de Fonseca e Martins (1989), com nível de significância $\alpha = 5\%$.

Tabela 10 – Valores calculados da análise de variância para o modelo de efeitos fixos com dois critérios de classificação. Liga Al-Si com 16% Si.

Variável	SQ	Fi	MQ	F_{0cal}	F_{0tab}	α	Resultado
A	595,125	1	595,125	176,333	7,71	5%	Influencia
B	190,125	1	190,125	56,333	7,71	5%	Influencia
A × B	55,125	1	55,125	16,333	7,71	5%	Influencia
Erro	13,5	4	3,375	-	-		-
Total	853,875	7	-	-	-		-

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As variáveis apresentadas na Tabela 10 foram definidas como SQ a soma quadrática, Fi graus de liberdade e MQ média quadrática.

Comparando os resultados entre F_{0cal} e F_{0tab} apresentados na Tabela 10, pode ser observado que para o fator A (velocidade de corte) o valor de F_{0calc} é maior que o valor de F_{0tab} ; então para um nível de significância $\alpha = 5\%$, rejeita-se a hipótese H_{0A} e conclui-se que a velocidade de corte (v_c) influencia na vida da ferramenta. Pela grande diferença entre o F_{0calc} e F_{0tab} , é possível afirmar que a velocidade de corte é fator fundamental no que diz respeito à vida da ferramenta, para usinagem da liga em estudo.

Para o fator B (avanço), o valor de F_{0calc} é maior que F_{0tab} ; então para um nível de significância $\alpha = 5\%$, rejeita-se a hipótese H_{0B} e conclui-se que o avanço (f) também influencia na vida da ferramenta.

Para a interação $A \times B$ (velocidade de corte e avanço), o valor de F_{0calc} também é maior que F_{0tab} ; então para um nível de significância de $\alpha = 5\%$, rejeita-se a hipótese H_{0AB} , e conclui-se que a interação entre a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f) influencia na vida da ferramenta. Isso significa que a variação da quantidade de canais usinados na liga de 16% Si, do menor avanço para o maior, não é a mesma variação quando se usina da menor para a maior velocidade de corte. De outra forma, o efeito do avanço na produtividade depende da velocidade de corte associada. Esta significância (estatística) pode ter sido alcançada (potencializada) em função da maior abrasividade do material da peça.

Para finalizar o estudo para esta liga, foi determinado o quanto a produtividade dos bedames foi afetada com a mudança dos parâmetros de corte; para tanto, foram calculados os efeitos principais dos fatores A, B e a interação entre A e B.

Utilizando as Eq. (15) a (17) apresentadas no Anexo A, determinou-se os efeitos principais para os fatores em estudo, sendo: $A = -17,25$ canais, $B = 9,74$ canais e $AB = -5,25$ canais.

Analisando os efeitos, pode-se afirmar que para as condições realizadas nesta etapa do trabalho, o efeito do aumento da velocidade, de corte de 500 m/min para 1000 m/min, a ferramenta usinou 17,25 menos canais, como esperado pois o aumento da velocidade de corte normalmente diminui a vida das ferramentas.

O efeito do aumento do avanço, de 0,08 mm/rotação para 0,15 mm/rotação, a ferramenta usinou 9,74 mais canais, provavelmente o efeito benéfico do aumento do avanço na produtividade de canais pode estar ligado com o comprimento de corte, uma vez que ao aumentar o avanço, o comprimento de corte é diminuído justificando o resultado obtido.

E, por fim, o efeito do aumento combinado entre velocidade de corte e avanço, o bedame usinou 5,25 menos canais, o que também era previsto devido a influência negativa do aumento da velocidade de corte ser mais significativa do que o efeito benéfico do aumento do avanço por volta da ferramenta.

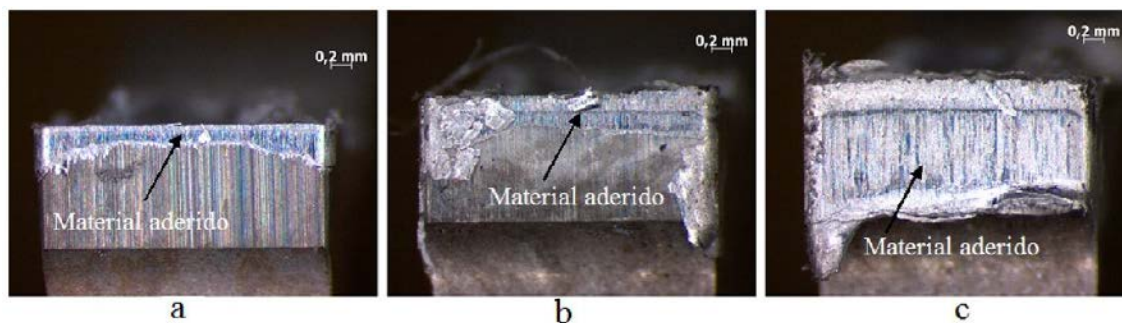
4.1.2 Liga de alumínio-silício com 12% Si

Durante a usinagem da liga de alumínio-silício com 12% de silício, foi observada, assim como nos primeiros ensaios, a aderência da liga de alumínio em todos os canais executados, tanto na superfície principal de folga, como nas superfícies de saída e secundárias de folga. À medida que o desgaste de flanco aumentava, a quantidade de material aderido à superfície também aumentava.

As Figuras 26 a 29 mostram a adesão do material na superfície principal de folga das ferramentas ao longo de sua vida.

A ferramenta representada na Figura 26 foi utilizada com $v_c = 1000$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação. A Figura 26(a) mostra a adesão do material após 3 canais usinados e $V_b = 0,05$ mm; a Figura 26(b) mostra a adesão do material após 18 canais usinados e $V_b = 0,18$ mm; por fim, a Figura 26(c) mostra a adesão do material após 54 canais usinados e $V_b = 0,30$ mm. Em uma análise qualitativa é possível afirmar que a medida que o desgaste de flanco evoluiu, a quantidade de material aderido à superfície principal de folga aumentou.

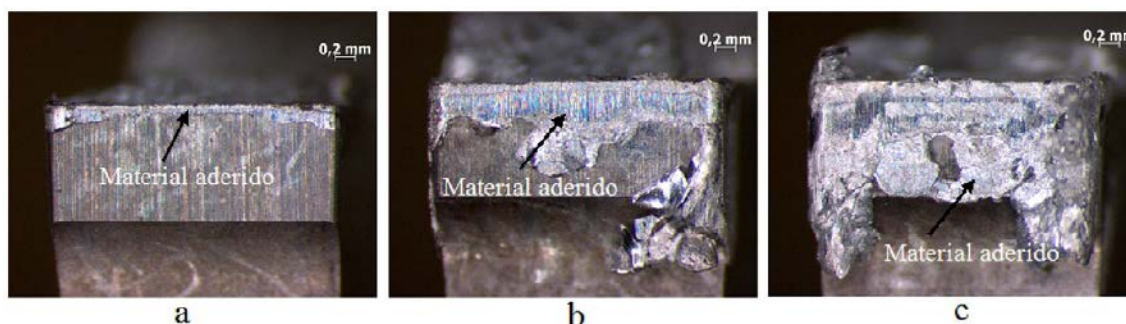
Figura 26 – Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 1000$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação): (a) após 3 canais, (b) após 18 canais e (c) após 54 canais.



Fonte: Elaboração do próprio autor

A ferramenta representada na Figura 27 foi utilizada com $v_c = 1000$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação. A Figura 27(a) mostra a adesão do material após 3 canais usinados e $V_b = 0,04$ mm; a Figura 27(b) mostra a adesão do material após 27 canais usinados e $V_b = 0,15$ mm; por fim, a Figura 27(c) mostra a adesão do material após 87 canais usinados e $V_b = 0,31$ mm. Em uma análise qualitativa é possível afirmar que a medida que o desgaste de flanco evoluiu, a quantidade de material aderido à superfície principal de folga aumentou.

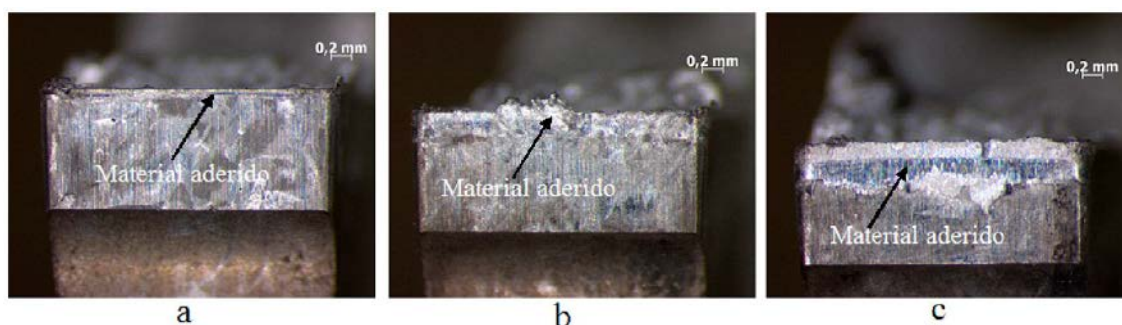
Figura 27 - Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 1000$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação): (a) após 3 canais, (b) após 27 canais e (c) após 87 canais.



Fonte: Elaboração do próprio autor

A ferramenta representada na Figura 28 foi utilizada com $v_c = 500$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação. A Figura 28(a) mostra a adesão do material após 6 canais usinados e $V_b = 0,04$ mm; a Figura 28(b) mostra a adesão do material após 54 canais usinados e $V_b = 0,16$ mm; por fim, a Figura 28(c) mostra a adesão do material após 126 canais usinados e $V_b = 0,30$ mm. Em uma análise qualitativa é possível afirmar que a medida que o desgaste de flanco evoluiu, a quantidade de material aderido à superfície principal de folga aumentou.

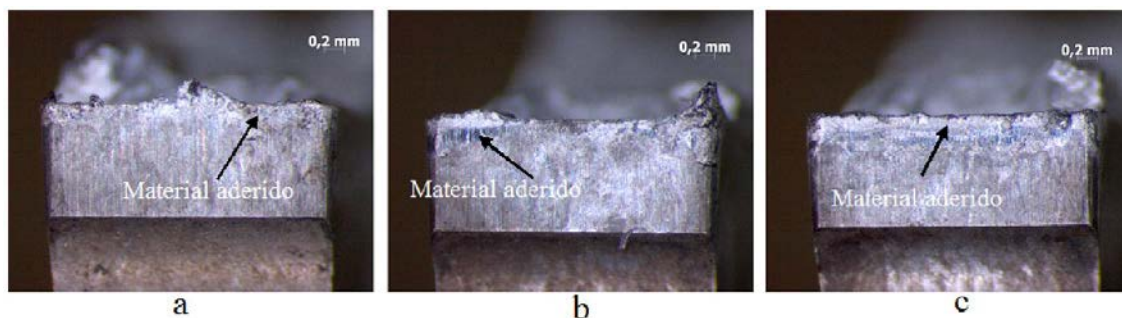
Figura 28 – Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 500$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação): (a) após 6 canais, (b) após 54 canais e (c) após 126 canais.



Fonte: Elaboração do próprio autor

A ferramenta representada na Figura 29 foi utilizada com $v_c = 500$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação. A Figura 29(a) mostra a adesão do material após 9 canais usinados e $V_b = 0,07$ mm; a Figura 29(b) mostra a adesão do material após 54 canais usinados e $V_b = 0,16$ mm; por fim, a Figura 29(c) mostra a adesão do material após 171 canais usinados e $V_b = 0,30$ mm. Em uma análise qualitativa é possível afirmar que a medida que o desgaste de flanco evoluiu, a quantidade de material aderido à superfície principal de folga aumentou.

Figura 29 – Superfície principal de folga com adesão de material ($v_c = 500$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação): (a) após 9 canais, (b) após 54 canais e (c) após 171 canais.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Para as condições apresentadas anteriormente, através das análises visuais é possível notar pelas Figuras 26 e 27 que à medida que o desgaste de flanco evoluiu, as ferramentas que usinaram com velocidade de corte de 1000 m/min apresentaram maior quantidade de material aderido à superfície principal de folga em comparação com as ferramentas que usinaram com velocidade de corte de 500 m/min (Figuras 28 e 29). Independente da velocidade de corte, por meio das análises visuais (Figuras 26 a 28), os avanços de 0,08 e 0,15 mm/rotação não apresentaram diferenças consideráveis de material aderido sob a superfície de folga.

A Tabela 11 apresenta a evolução do desgaste de flanco do bedame em relação à quantidade de canais usinados. Para cada combinação de parâmetros, foram realizadas duas réplicas do teste (2 observações).

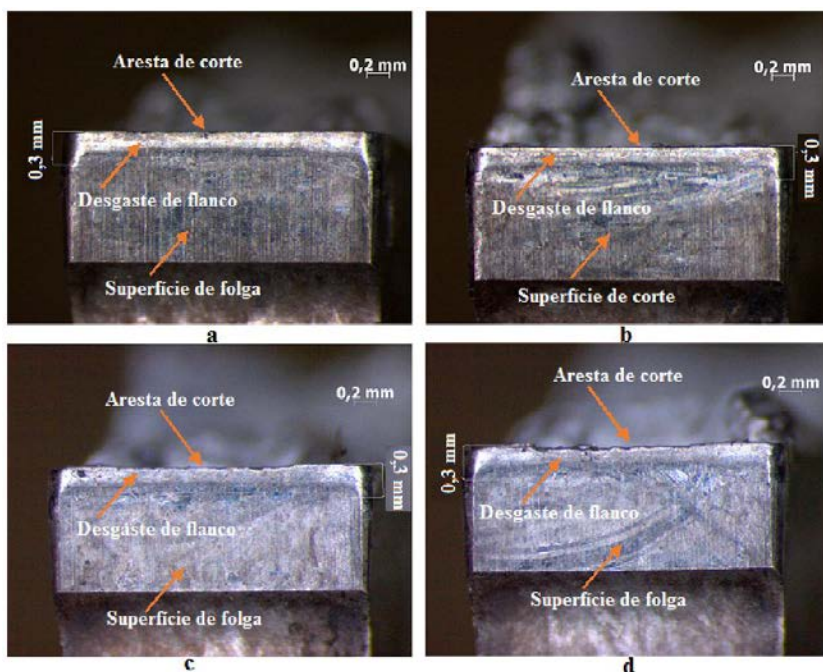
As ferramentas que usinaram os canais com $v_c = 500$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação produziram 114 canais para primeira réplica e 126 canais para segunda réplica; as Figuras 30(a) e (b) mostram, respectivamente, a superfície principal de folga com o desgaste de flanco após o fim da vida da ferramenta para as duas réplicas. As ferramentas que usinaram com $v_c = 500$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação produziram 162 canais para primeira réplica e 171 canais para segunda réplica; as Figuras 30(c) e (d) mostram, respectivamente, a superfície principal de folga com o desgaste de flanco após o fim da vida da ferramenta para as duas réplicas.

Tabela 11 – Desgaste de flanco em relação à quantidade de canais usinados para usinagem das ligas Al-Si com menor percentual de Si entre as ligas estudadas (v_c em m/min e f em mm/rotação).

Parâmetros	$v_c = 500$ $f = 0,08$		$v_c = 500$ $f = 0,15$		$v_c = 1000$ $f = 0,08$		$v_c = 1000$ $f = 0,15$	
Réplicas	1	2	1	2	1	2	1	2
Quantidade de canais	V_b [mm]							
9	0,06	0,05	0,08	0,07	0,09	0,09	0,07	0,07
18	0,10	0,07	0,11	0,09	0,18	0,14	0,10	0,11
24	0,12	0,10	0,12	0,10	0,21	0,17	0,13	0,14
36	0,14	0,12	0,13	0,13	0,23	0,19	0,16	0,18
48	0,17	0,13	0,17	0,15	0,28	0,24	0,18	0,21
54	0,18	0,15	0,18	0,16	0,30	0,29	0,20	0,22
60	0,20	0,18	0,18	0,17	-	0,30	0,21	0,23
81	0,23	0,21	0,19	0,20	-	-	0,24	0,28
87	0,25	0,24	0,20	0,20	-	-	0,31	0,30
90	0,27	0,25	0,21	0,20	-	-	-	-
114	0,30	0,28	0,24	0,22	-	-	-	-
126	-	0,30	0,25	0,24	-	-	-	-
144	-	-	0,27	0,26	-	-	-	-
162	-	-	0,30	0,29	-	-	-	-
171	-	-	-	0,30	-	-	-	-

Fonte: Elaboração do próprio autor

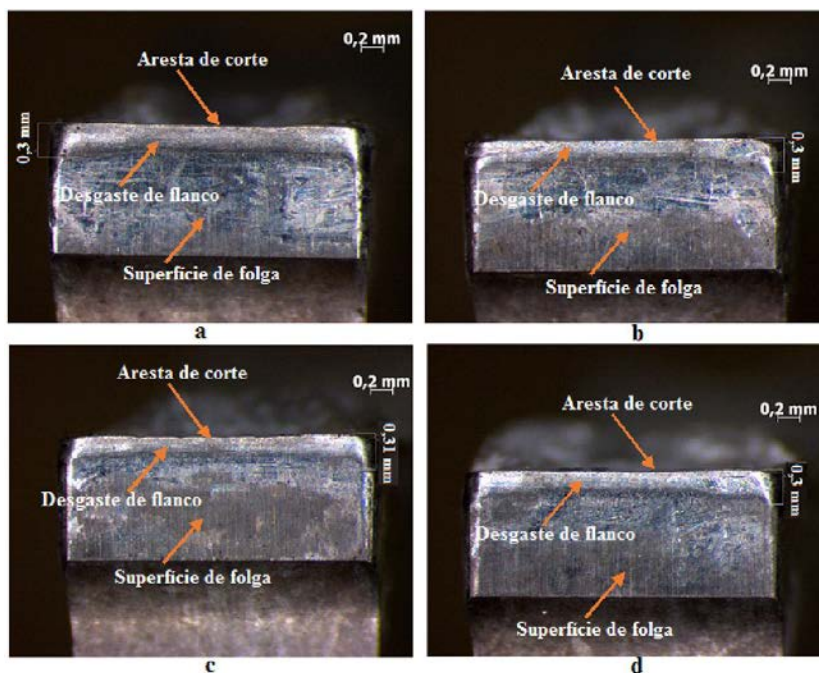
Figura 30 – Superfície de folga com desgaste de flanco $v_c = 500$ m/min: a) 1ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot., b) 2ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot., c) 1ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot., d) 2ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot.



Fonte: Elaboração do próprio autor

As ferramentas que usinaram os canais com $v_c = 1000$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação produziram 54 canais para primeira réplica e 60 canais para segunda réplica; as Figuras 31(a) e (b) mostram, respectivamente, a superfície principal de folga com o desgaste de flanco após o fim da vida da ferramenta para as duas réplicas. As ferramentas que usinaram com $v_c = 1000$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação produziram 87 canais para ambas as réplicas; as Figuras 31(c) e (d) mostram, respectivamente, a superfície principal de folga com o desgaste de flanco após o fim da vida da ferramenta para as duas réplicas.

Figura 31 – Superfície de folga com desgaste de flanco $v_c = 1000$ m/min: a) 1ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot., b) 2ª réplica com $f = 0,08$ mm/rot., c) 1ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot., d) 2ª réplica com $f = 0,15$ mm/rot.



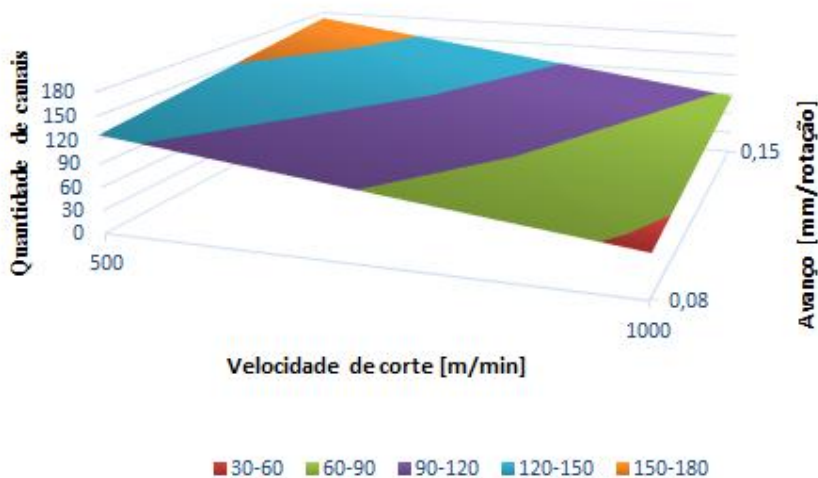
Fonte: Elaboração do próprio autor

As ferramentas que usinaram os canais com velocidade de corte de 500 m/min e avanço 0,15 mm/rotação apresentaram pequenas avarias na aresta de corte, como observado na Figura 30(c) e (d); este fato pode estar relacionado ao maior volume de material cortado, uma vez que para estes parâmetros a ferramenta usinou uma quantidade superior de canais em comparação a todas as outras combinações de parâmetros, o que pode ter motivado a formação de aresta postiça de corte (APC), causando as avarias.

A segunda réplica do bedame que usinou os canais com $v_c = 500$ m/min e $f = 0,15$ mm/rotação obteve maior vida da ferramenta usinando 171 canais; o bedame que apresentou pior vida da ferramenta foi o da primeira réplica do bedame que usinou os canais com $v_c = 1000$ m/min e $f = 0,08$ mm/rotação, usinando 54 canais.

Analizando a variação da velocidade de corte para o avanço de 0,08 mm/rotação, pode ser observado por meio da Figura 32 que ao diminuir a velocidade de corte em 50%, passando de 1000 m/min para 500 m/min, a ferramenta usinou 133% (de 54 para 126 canais) mais canais, passando da região vermelha (30-60 canais) para a região azul (120-150 canais) do gráfico. E ao analisar a variação da velocidade de corte para o avanço de 0,15 mm/rotação, pode ser observado através da Figura 32 que ao diminuir a velocidade de corte em 50%, a ferramenta usinou 97% (de 87 para 171 canais) mais canais, passando da região verde (60-90 canais) para a região laranja (150-180 canais) do gráfico. Como esperado, com a diminuição da velocidade de corte, a ferramenta obteve um aumento considerável na quantidade de canais usinados; possivelmente ao diminuir a velocidade de corte, houve uma diminuição da temperatura na região de corte, aumentando a produtividade da ferramenta.

Figura 32 – Resultado comparativo da quantidade de canais usinados em duas velocidades de cortes e dois avanços diferentes para usinagem da liga de Al-Si com 12% Si.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Analizando ainda a Figura 32, ao aumentar o avanço em 87,5%, de 0,08 mm/rotação para 0,15 mm/rotação, e mantendo a velocidade de corte fixa em 500 m/min, a quantidade de canais usinados aumentou 36% (de 126 para 171 canais), passando da região azul (120-150

canais) para região laranja (150-180 canais) do gráfico. E para a velocidade de corte de 1000 m/min, como observado na Figura 32, ao aumentar o avanço na mesma proporção, a quantidade de canais usinados aumentou 61% (de 54 para 87 canais), passando da região vermelha (30-60 canais) para a região verde (de 60-90 canais) do gráfico. Assim, como na usinagem da liga de alumínio-silício com 16% de silício, o efeito da variação benéfica do avanço na produtividade da ferramenta, em termos percentuais, é menos expressivo que o efeito deletério da velocidade de corte, uma vez que a velocidade de corte é o fator mais influente na vida de uma ferramenta. Como pode ser notado, com o aumento do avanço, houve um aumento na produtividade da ferramenta, possivelmente pelo fato de que, com o aumento do avanço, o comprimento de material usinado é menor.

Para a verificação da influência da velocidade de corte e do avanço na usinagem da liga de alumínio-silício com menor percentual de silício entre as ligas estudadas, utilizou-se a ANOVA, a fim de investigar todas as combinações possíveis dos parâmetros de corte utilizados. Esta segunda análise consiste em verificar a influência e o efeito dos parâmetros velocidade de corte e avanço na usinagem da liga de alumínio com 12% Si. Para tanto, foram levantadas as hipóteses a serem testadas:

- H_{0A} : a velocidade de corte (v_c) não influencia na vida da ferramenta;
- H_{1A} : a velocidade de corte (v_c) influencia na vida da ferramenta;
- H_{0B} : o avanço (f) não influencia na vida da ferramenta;
- H_{1B} : o avanço (f) influencia na vida da ferramenta;
- H_{0AB} : a interação entre a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f) não influencia na vida da ferramenta;
- H_{1AB} : a interação entre a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f) influencia na vida da ferramenta.

A Tabela 12 mostra a quantidade de canais para cada combinação de parâmetros, onde as linhas (fator A) correspondem às velocidades de corte e as colunas (fator B), aos avanços.

Tabela 12 – Quantidade de canais para cada combinação de parâmetros na usinagem da liga de Al-Si com 12% Si (v_c em m/min e f em mm/rotação).

v_c	F				Soma
	0,08	0,08	0,15	0,15	
500	114	126	162	171	573
1000	54	60	87	87	288
Soma	354		507		861

Fonte: Elaboração do próprio autor

Com base nos resultados apresentados na Tabela 12, e pela Eq. (4) do Anexo A, foi determinada a soma quadrática total $SQ_T = 13345,875$.

Para determinar a soma dos quadrados de A, B e AB, foi apresentado a Tabela 13 com o total de canais usinados para cada combinação de parâmetros.

Tabela 13 – Quantidade de canais usinados para cada fator. Liga Al-Si com 12% Si.

Combinação de tratamentos	Canais
a	114
ab	174
b	333
(1)	240

Fonte: Elaboração do próprio autor

Com base nos resultados apresentados na Tabela 13 e pelas Eq. (1) a (3) e (5), do Anexo A, foram determinadas $SQ_A = 10153,125$, $SQ_B = 2926,125$, $SQ_{AB} = 136,12$ e $SQ_E = 130,5$, respectivamente.

Para análise de variância completa, foi montada com base na Tabela 19 do Anexo A a Tabela 14 com os valores da soma dos quadrados, os graus de liberdade, a média quadrática, F_{0cal} , F_{0tab} e o resultado. O valor de F_{0tab} foi extraído de Fonseca e Martins (1989), com nível de significância $\alpha = 5\%$.

Tabela 14 – Valores calculados da análise de variância para o modelo de efeitos fixos com dois critérios de classificação. Liga Al-Si com 12% Si.

Variável	SQ	Fi	MQ	F _{0cal}	F _{0tab}	α	Resultado
A	10153,13	1	10153,13	311,21	7,71	5%	Influencia
B	2926,125	1	2926,125	89,69	7,71	5%	Influencia
A × B	136,125	1	136,125	4,17	7,71	5%	Não Influencia
Erro	130,5	4	32,625	-	-		-
Total	13345,88	7	-	-	-		-

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As variáveis apresentadas na Tabela 14 foram definidas como SQ a soma quadrática, Fi graus de liberdade e MQ média quadrática.

Comparando os resultados entre F_{0cal} e F_{0tab} apresentados na Tabela 14, pode ser observado que para o fator A (velocidade de corte) o valor de F_{0calc} é maior que o valor de F_{0tab}; então para um nível de significância $\alpha = 5\%$, rejeita-se a hipótese H_{0A} e conclui-se que a velocidade de corte (v_c) influencia na vida da ferramenta. Pela grande diferença entre o F_{0calc} e F_{0tab}, é possível afirmar que a velocidade de corte é fator fundamental no que diz respeito à vida da ferramenta na usinagem da liga em estudo.

Para o fator B (avanço), o valor de F_{0calc} é maior que F_{0tab}; então para um nível de significância $\alpha = 5\%$, rejeita-se a hipótese H_{0B} e conclui-se que o avanço (f) também influencia na vida da ferramenta.

No entanto, para a interação A × B (velocidade de corte e avanço), o valor de F_{0calc} foi menor que F_{0tab}; então para um nível de significância de $\alpha = 5\%$ não se rejeita a hipótese H_{0AB}, e conclui-se que a interação entre a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f) provavelmente não influencia na vida da ferramenta. Isso significa que a variação da quantidade de canais usinados na liga de menor teor de Si, do menor avanço para o maior, pode ser considerada a mesma variação quando se usina da menor para a maior velocidade de corte. De outra forma, o efeito do avanço na produtividade independe da velocidade de corte combinada. Esta não significância (estatística) pode ter sido alcançada em função da menor abrasividade do material da peça.

Para finalizar o estudo para esta liga, foi determinado o quanto a produtividade dos bedames foi afetada com a mudança dos parâmetros de corte; para tanto, foram calculados os efeitos principais dos fatores A, B e a interação entre A e B.

Utilizando as Eq. (15) a (17) apresentadas no Anexo A, determinou-se os efeitos principais para os fatores em estudo, sendo: $A = -71,25$ canais, $B = 38,25$ canais e $AB = -8,25$ canais.

Analisando os efeitos, pode-se afirmar que para as condições realizadas nesta etapa do trabalho, o efeito do aumento da velocidade, de corte de 500 m/min para 1000 m/min, a ferramenta usinou 71,25 menos canais, como esperado, pois o aumento da velocidade de corte normalmente diminui a vida das ferramentas.

O efeito do aumento do avanço, de 0,08 mm/rotação para 0,15 mm/rotação, a ferramenta usinou 38,15 mais canais, provavelmente o efeito benéfico do aumento do avanço na produtividade de canais pode estar ligado ao comprimento de corte, uma vez que ao aumentar o avanço, o comprimento de corte é diminuído justificando o resultado obtido.

E, por fim, o efeito do aumento combinado entre velocidade de corte e avanço, o bedame usinou 8,25 menos canais, como esperado devido à influência da velocidade de corte; no entanto para as condições testadas, a interação entre velocidade de corte e avanço não influenciou na produtividade de canais para um nível de significância $\alpha = 5\%$.

4.1.3 Influência dos parâmetros de corte juntamente com a liga de alumínio-silício

Até o momento, foi feita a ANOVA de modo a verificar a influência dos parâmetros de corte para usinagem de duas ligas de alumínio-silício; esta análise foi feita de maneira individual para cada liga. Neste ponto é inserido na ANOVA além do fator A (velocidade de corte) e do fator B (avanço), o fator C (teor de Si na liga), também com dois níveis, um alto e um baixo. O nível alto de C será a liga com 16% Si e o nível baixo, a liga com 12% Si. O intuito desta análise é verificar o efeito e a influência dos parâmetros de corte juntamente com a mudança de material da peça, determinando qual fator teve maior influência na produtividade de canais e, consequentemente, na vida da ferramenta.

Para a análise de variância foram determinadas as hipóteses a serem estudadas:

- H_{0A} : a velocidade de corte (v_c) não influencia na vida da ferramenta;
- H_{1A} : a velocidade de corte (v_c) influencia na vida da ferramenta;
- H_{0B} : o avanço (f) não influencia na vida da ferramenta;
- H_{1B} : o avanço (f) influencia na vida da ferramenta;
- H_{0C} : o teor de Si na liga não influencia na vida de ferramenta;
- H_{1C} : o teor de Si na liga influencia na vida de ferramenta;

- H_{0AB} : a interação entre a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f) não influencia na vida da ferramenta;
- H_{1AB} : a interação entre a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f) influencia na vida da ferramenta;
- H_{0AC} : a interação entre a velocidade de corte e o teor de Si na liga não influenciam na vida da ferramenta;
- H_{1AC} : a interação entre a velocidade de corte e o teor de Si na liga influenciam na vida da ferramenta;
- H_{0BC} : a interação entre o avanço e o teor de Si na liga não influenciam na vida da ferramenta;
- H_{1BC} : a interação entre o avanço e o teor de Si na liga influenciam na vida da ferramenta;
- H_{0ABC} : a interação entre a velocidade de corte, o avanço e o teor de Si na liga não influenciam na vida da ferramenta;
- H_{1ABC} : a interação entre a velocidade de corte, o avanço e o teor de Si na liga influenciam na vida da ferramenta;

A Tabela 15 mostra a quantidade de canais para cada combinação de parâmetros, onde fator A corresponde às velocidades de corte, o fator B corresponde aos avanços e o fator C corresponde ao teor de silício da liga Al-Si. A liga com 16% de silício foi chamada de Al-Si alto e a liga com 12% de silício foi chamada de Al-Si baixo.

Tabela 15 – Quantidade de canais para cada combinação de parâmetros na usinagem das duas ligas de Al-Si estudadas (v_c em m/min e f em mm/rotação).

v_c	Liga Al-Si	F				Soma
		0,08		0,15		
500	Al-Si alto	24	27	39	42	132
	Al-Si baixo	114	126	162	171	573
1000	Al-Si alto	12	15	18	18	63
	Al-Si baixo	54	60	87	87	288
Soma		432		624		1056

Fonte: Elaboração do próprio autor

Com base nos resultados apresentados na Tabela 15, e pela Eq. (13) do Anexo A, foi determinada a soma quadrática total $SQ_T = 41922,00$.

Para determinar a soma dos quadrados de A, B, C, AB, AC, BC e ABC, foi apresentada a Tabela 16 com o total de canais usinados para cada combinação de parâmetros.

Tabela 16 – Quantidade de canais usinados para cada fator (experimento fatorial 2^3).

Combinação de tratamentos	Canais
(1)	240
a	114
b	333
ab	174
c	51
ac	27
bc	81
abc	36

Fonte: Elaboração do próprio autor

Com base nos resultados apresentados na Tabela 16 e pelas Eqs. (6) a (12) do Anexo A, foram determinadas $SQ_A = 7832,25$, $SQ_B = 2304,00$, $SQ_C = 27722,25$, $SQ_{AB} = 182,25$, $SQ_{AC} = 2916,00$, $SQ_{BC} = 812,25$, $SQ_{ABC} = 9,00$, respectivamente. E pela Eq. (14) do Anexo A, foi determinado o $SQ_E = 144,00$.

Para análise de variância completa, foi montada com base na Tabela 19 do Anexo A a Tabela 17 com os valores da soma dos quadrados, os graus de liberdade, a média quadrática, F_{0cal} , F_{0tab} e o resultado. O valor de F_{0tab} foi extraído de Fonseca e Martins (1989), com nível de significância $\alpha = 5\%$.

Tabela 17 – Valores calculados da análise de variância para o modelo de efeitos fixos com três fatores: velocidade de corte, avanço e liga Al-Si.

Variável	SQ	Fi	MQ	F_{0cal}	F_{0tab}	Resultado
A	7832,25	1	7832,25	435,125	7,57	Influencia
B	2304	1	2304	128	7,57	Influencia
C	27722,25	1	27722,25	1540,125	7,57	Influencia
AB	182,25	1	182,25	10,125	7,57	Influencia
AC	2916	1	2916	162	7,57	Influencia
BC	812,25	1	812,25	45,125	7,57	Influencia
ABC	9	1	9	0,5	7,57	Não influencia
Erro	144	8	18			
Total	41922	15				

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As variáveis apresentadas na Tabela 17 foram definidas como SQ a soma quadrática, Fi graus de liberdade e MQ média quadrática.

Comparando os resultados entre F_{0cal} e F_{0tab} apresentados na Tabela 17, pode ser observado que, para os fatores A, B, C, AB, AC e BC, o valor de F_{0calc} é maior que o valor de F_{0tab} , rejeitando-se a hipótese H_0 . E para o fator ABC, o valor de F_{0calc} é menor que o valor de

F_{0tab} , não rejeitando a hipótese H_0 . Então para um nível de significância $\alpha = 5\%$, é possível fazer as seguintes conclusões:

- A velocidade de corte influencia na vida da ferramenta;
- O avanço influencia na vida da ferramenta;
- A liga Al-Si influencia na vida da ferramenta;
- A interação entre velocidade de corte e avanço influencia na vida da ferramenta;
- A interação entre velocidade de corte e a liga Al-Si influencia na vida da ferramenta;
- A interação entre o avanço e a liga Al-Si influencia na vida da ferramenta;
- E a interação entre a velocidade de corte, o avanço e a liga Al-Si não influencia na vida da ferramenta.

Pela grande diferença entre F_{0cal} e F_{0tab} da velocidade de corte e da liga Al-Si, pode ser afirmado que são os fatores mais importantes para a vida da ferramenta em estudo, e entre estes fatores, a liga Al-Si foi o que apresentou maior influência.

Para finalizar o estudo, foi determinado o quanto a produtividade dos bedames foi afetada com a mudança dos parâmetros de corte e da liga Al-Si; para tanto, foram calculados os efeitos principais dos fatores A, B, C, AB, AC, BC e ABC.

Utilizando as Eq. (18) a (24) apresentadas no Anexo A, determinou-se os efeitos principais para os fatores em estudo, sendo: $A = -44,25$ canais, $B = 24$ canais, $C = -83,25$ canais, $AB = -6,75$ canais, $AC = 27$ canais, $BC = -14,25$ canais, $ABC = 1,5$ canais.

Analisando os efeitos, pode-se afirmar que, para as condições realizadas neste trabalho, o efeito do aumento da velocidade de corte, de 500 m/min para 1000 m/min, a ferramenta irá usinar 44,25 menos canais, o que era esperado uma vez que a velocidade de corte é o parâmetro de corte mais influente na vida de uma ferramenta.

O efeito do aumento do avanço, de 0,08 mm/rotação para 0,15 mm/rotação, a ferramenta usinou 24 mais canais. Mesmo sabendo-se que a velocidade de corte é o principal agente governante da vida da ferramenta, o aumento do avanço acarreta, em geral, maior desgaste da ferramenta em qualquer processo de usinagem, mas este comportamento é altamente dependente das condições de corte empregadas. No caso deste trabalho, o aumento do avanço não foi suficiente para afetar negativamente a vida da ferramenta e, ao contrário, aumentou o número de canais usinados, provavelmente devido ao menor tempo de contato peça-ferramenta. Em outras palavras, o efeito positivo do menor tempo de corte na vida da

ferramenta superou o efeito negativo de um possível aumento da temperatura de corte na produtividade dos canais.

Com o aumento do percentual de silício na liga em 3,9%, de 12,5% para 16,4%, a ferramenta usinou 83,25 menos canais. A diminuição da produtividade de canais com o aumento do percentual de silício era esperado, pois ao elevar a quantidade de silício, intensificava-se a abrasividade da liga de Al-Si, diminuindo, consequentemente, a vida da ferramenta.

Com o aumento combinado entre velocidade de corte e avanço, a ferramenta usinou 6,25 menos canais, o que também era esperado, pois o aumento da velocidade de corte apresentou maior influência na diminuição da produtividade da ferramenta e o aumento do avanço influenciou positivamente na vida da ferramenta. Então, pode-se concluir que, neste caso, o efeito negativo da velocidade de corte na vida da ferramenta sobrepõe o efeito positivo do avanço, tornando este balanço desfavorável (em detrimento da produtividade).

Com o aumento combinado entre velocidade de corte e percentual de silício na liga, a ferramenta usinou 27 mais canais. Ao observar estes critérios isoladamente ambos diminuíram a produtividade de canais, porém o efeito combinado mostra o contrário, infere-se que maior quantidade de silício na liga Al-Si em contato com outros elementos em temperaturas elevadas pode ter mudado o comportamento da liga durante a usinagem. Segundo Hudelson et al. (2010) um composto de silício, cobre, níquel e ferro pode baixar o ponto de fusão do silício de 1414 °C para menos de 900 °C em um fenômeno chamado de fusão reversa. Como as ligas estudadas apresentam os elementos citados, pode ser que este fenômeno tenha influenciado positivamente na produtividade de canais ao analisar o efeito combinado do aumento da velocidade de corte e do teor de silício na liga. No entanto maiores investigações necessitam ser conduzidas, para constatar se a temperatura de corte, nas condições de usinagem empregadas, atinge a temperatura eutética da liga, empregando algum modelo térmico para estimar a temperatura de usinagem na região de corte, e investigar também se estes elementos nos percentuais presentes na liga realmente influenciam na produtividade de canais.

O efeito do aumento combinado entre o avanço e o percentual de silício da liga Al-Si, a ferramenta usinou 14,25 menos canais, como esperado, pois o aumento do Si na liga diminui a produtividade de canais (maior abrasividade), que sobrepõe o efeito positivo do avanço, pois aumenta a produção de canais, uma vez que diminui o tempo de corte.

E o efeito do aumento combinado da velocidade de corte, do avanço e do percentual de silício na liga, a ferramenta usinou 1,5 mais canais. Porém, como a interação entre velocidade

de corte, avanço e liga Al-Si não influencia na vida da ferramenta, para um nível de significância $\alpha = 5\%$, este resultado estatístico e prático (1,5 canal a mais) não tem significância.

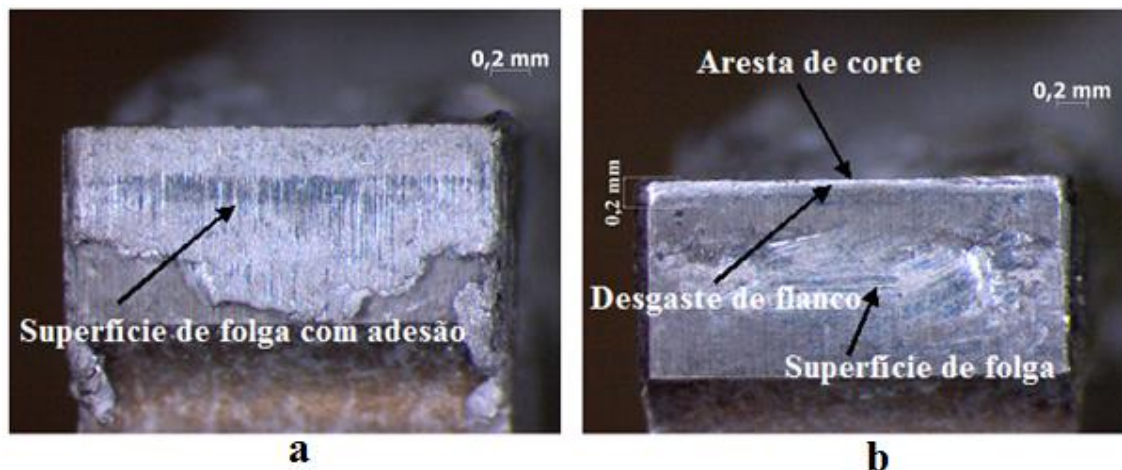
4.2 ETAPA 2 – EVOLUÇÃO DO DESGASTE

A fim de verificar se a limpeza da ferramenta, realizada após a usinagem de três canais, influenciaria na vida da mesma, um bedame seria submetido a usinagem sem interrupção para a limpeza, pois em geral nas empresas de usinagem as ferramentas são colocadas na máquina e são retiradas somente ao fim de sua vida.

Para essa etapa de ensaios foram utilizados como corpo de prova os pistões fabricados com a liga de alumínio com 12% Si, pois eram os corpos de prova disponíveis, e os parâmetros de corte escolhidos foram velocidade de corte igual a 1000 m/min e o avanço de 0,08 mm/rotação, estes parâmetros foram escolhidos pois apresentaram menor vida da ferramenta com o objetivo de reduzir o tempo de ensaio realizado.

Ao longo da usinagem, o material da liga de Al-Si foi aderindo sobre a superfície principal de folga e superfície de saída da ferramenta. Ao atingir 20 canais, a ferramenta apresentou ruído elevado ao usinar. Para evitar a possibilidade de quebra da ferramenta, a mesma foi limpa e seu desgaste medido no estéreo-microscópio. A Figura 33(a) mostra a superfície principal de folga do bedame com material aderido; é possível perceber que a adesão de material cobriu a aresta principal de corte e é possível que esta adesão tenha feito a função de aresta de corte, aumentando o ruído de usinagem. Com a continuação da usinagem, é possível que tenha havido um aumento na quantidade de material aderido, o que poderia levar a ferramenta à quebra ao se destacar da superfície de folga ou da aresta de corte. A Figura 33(b) mostra a superfície principal de folga do bedame sem adesão; nela é possível perceber o desgaste de flanco com 0,20 mm.

Figura 33 – Superfície principal de folga: (a) com adesão; (b) sem adesão



Fonte: Elaboração do próprio autor

Como a primeira limpeza da ferramenta foi com 20 canais, optou-se por fazer a limpeza a cada 20 canais. A Tabela 18 mostra a evolução do desgaste de flanco de acordo com a quantidade de canais executados.

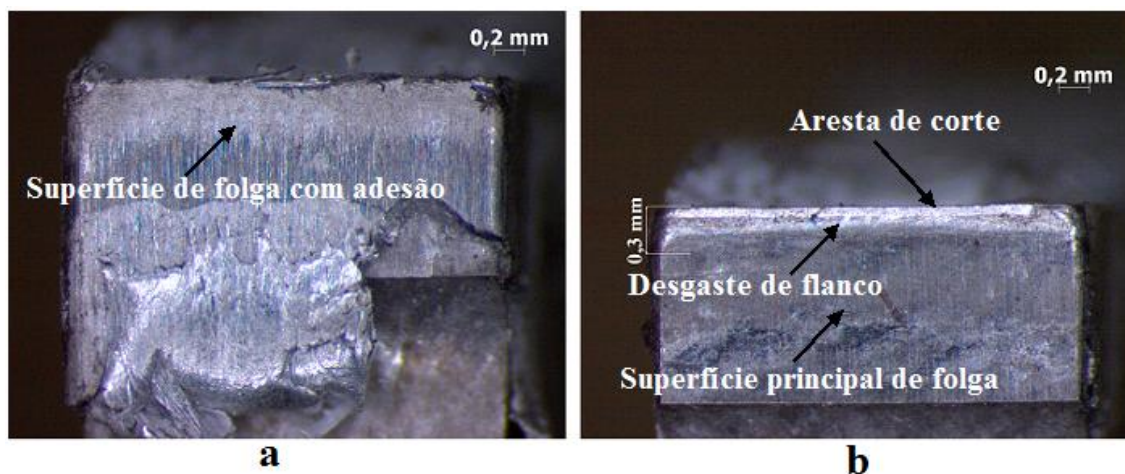
Tabela 18 – Desgaste de flanco em relação à quantidade de canais usinados.

Quantidade de canais	Desgaste de flanco
20	0,2
40	0,22
60	0,25
80	0,3

Fonte: Elaboração do próprio autor

Como pode ser observado na Tabela 18, a ferramenta chegou ao final de sua vida com 80 canais executados. Na etapa anterior, esta mesma liga foi usinada com os mesmos parâmetros de corte, porém com limpeza a cada três canais; este bedame usinou 60 canais, 20 canais a menos que nesta nova condição de limpeza da ferramenta. A figura 34(a) mostra a superfície principal de folga com adesão da liga de Al-Si após o fim da vida da ferramenta, e a Figura 34(b) mostra a superfície principal de folga sem adesão com o desgaste de flanco medindo 0,3 mm.

Figura 34 – Superfície principal de folga após a fim da fida da ferramenta: (a) com adesão; (b) sem adesão.



Fonte: Elaboração do próprio autor

Provavelmente com a continuidade da usinagem sem a limpeza da ferramenta, o material aderido à superfície principal de folga (Figura 34a) diminuiu o contato entre a peça e a ferramenta, minimizando o desgaste de flanco. No caso em que a ferramenta foi limpa a cada três canais, a cada novo canal usinado após a limpeza não havia presença de adesão na superfície principal de folga, possivelmente este fato permitiu maior abrasão na superfície, diminuindo a produtividade de canais.

5 CONCLUSÕES

Em resposta ao objetivo do trabalho e de acordo com as condições testadas, pode-se concluir que:

- 1) O principal tipo de desgaste que ocorre na usinagem de ligas de alumínio-silício é o desgaste de flanco e os principais mecanismos causadores deste desgaste são a adesão e a abrasão;
- 2) O fator mais influente na vida do bedame em estudo foi o teor de Si na liga do material da peça; o aumento do percentual de silício aumentou o desgaste da ferramenta;
- 3) O parâmetro de corte mais influente foi velocidade de corte; seu aumento diminuiu a produtividade da ferramenta;
- 4) O avanço também influenciou na vida da ferramenta, porém com efeito menos expressivo que a velocidade de corte. Nas condições testadas, o aumento do avanço acarretou numa melhor vida da ferramenta;
- 5) Para a análise de variância com dois fatores, a interação entre velocidade de corte e avanço influencia na vida da ferramenta para usinagem da liga com 16% Si, e não influencia na usinagem das liga de alumínio com 12% Si;
- 6) A interação entre velocidade de corte e a composição da liga Al-Si influencia na vida da ferramenta, no qual, o efeito combinado do aumento da velocidade de corte com o aumento de silício na liga aumentou a produtividade da ferramenta em estudo;
- 7) A interação entre o avanço e a composição da liga Al-Si influencia na vida da ferramenta; em que o efeito combinado do aumento do avanço com aumento do percentual de silício na liga diminuiu produtividade do bedame;
- 8) A interação entre a velocidade de corte, o avanço e a composição da liga Al-Si não influencia na vida da ferramenta;
- 9) A ferramenta cuja limpeza foi executada a cada 20 canais, obteve melhor produtividade comparada a ferramenta limpa a cada 3 canais.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Refazer os testes com diferentes ligas de alumínio silício além das que foram usadas nesse trabalho;
- Repetir os testes monitorando a temperatura de corte para verificar se a mesma tem influência no comportamento da liga durante a usinagem;
- Variar o percentual do cobre, do níquel e do ferro na liga de alumínio silício, para verificar se o fenômeno da fusão reversa atua durante os processos de usinagem dessas ligas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO- ABAL. **Fundamentos e aplicações do alumínio**. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio, 2007.

ASMA METALS HANDBOOK. **Properties and selection: nonferrous alloys and special – purpose materials**. 10. ed. [S.l.]: ASM, 1992. v. 2.

BARZANI, M. M. et al. Investigating the machinability of Al–Si–Cu cast alloy containing bismuth and antimony using coated carbide insert. **Measurement**, Kuala Lumpur, v. 62, p. 170-178, 2015.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: MM Editora, 2013.

CHEN, N.; SUN, F. Cutting performance of multilayer diamond coated silicon nitride inserts in machining aluminum–silicon alloy. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, China, v. 23, n. 7, p. 1985-1992, 2013.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: materiais de construção mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

CUNHA, D. F. da. **Furação de uma liga Al-Si com brocas de aço-rápido revestidas**. 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

FANG, N.; WU, Q. The effects of chamfered and honed tool edge geometry in machining of three aluminum alloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Logan, v. 45, n. 10, p. 1178-1187, 2005.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Carlos: EDGARD BLÜCHER, 1969.

FONSECA, J. S. da; MARINS, G. de A. **Curso de estatística**. São Paulo: Atlas, 1989.

FOX-RABINOVICH, G. et al. Cutting performance of different coatings during minimum quantity lubrication drilling of aluminum silicon B319 cast alloy. **Surface and Coatings Technology**, Ontario, v. 205, n. 16, p. 4107-4116, 2011.

GAHR, K. Z. **Microstructure and wear of materials**. [S.l.]: Elsevier, 1987.

GÓMEZ-PARRA, A. et al. Analysis of the evolution of the built-up edge and built-up layer formation mechanisms in the dry turning of aeronautical aluminium alloys. **Wear**, Candiz, v. 302, n. 1, p. 1209-1218, 2013.

GÜNAY, M. et al. Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force. **Journal of Materials Processing Technology**, Ankara, v. 166, n. 1, p. 44-49, 2005.

HAQUE, M. M.; SHARIF, A. Study on wear properties of aluminium–silicon piston alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, Dhaka, v. 118, n. 1, p. 69-73, 2001.

HORVÁTH, R.; DRÉGELYI-KISS, Á. Analysis of surface roughness of aluminum alloys fine turned: United phenomenological models and multi-performance optimization, **Measurement**, Budapest, v. 65, p. 181-192, 2015.

HUANG, X. et al. Aluminum alloy pistons reinforced with SiC fabricated by centrifugal casting. **Journal of Materials Processing Technology**, Chongqing, v. 211, n. 9, p. 1540-1546, 2011.

HUDELSON, S. et al. Retrograde Melting and Internal Liquid Gettering in Silicon. **Massachusetts Institute of Technology Cambridge**, Massachusetts, v. 22, n. 35, p. 3948-3953, 2010.

LIANG, Q.; VOHRA, Y. K.; THOMPSON, R. High speed continuous and interrupted dry turning of A390 aluminum/silicon alloy using nanostructured diamond coated WC–6 wt.% cobalt tool inserts by MPCVD. **Diamond and Related Materials**, Birmingham, v. 17, n. 12, p. 2041-2047, 2008.

LIMBERGER, I. et al. Avaliação da microestrutura e propriedades mecânicas de pistões de um motor endotérmico submetidos a diferentes condições de trabalho. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 6., 2010, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: CONEM, 2010.

REIS, M. N. dos. **Processo de produção e uso do alumínio na construção civil: contribuição à especificação técnica das esquadrias de alumínio**. 2006. 342 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)– Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ROY, P. et al. Machinability study of pure aluminium and Al–12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts. **Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, Sambalpur, v. 27, n. 3, p. 535-544, 2009.

SANTOS JUNIOR, M. C. dos. **Emprego de ferramentas estatísticas para avaliação da usinabilidade de ligas de alumínio**. 2012. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

VIANA, R.; MACHADO, Á. R. Furação de uma liga Al-Si com brocas de aço-rápido revestidas. In: - SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA- POSMEC, 15., 2005, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: FEMEC/UFU, 2005.

VOGL, F. W. **Estudo do comportamento da liga AA7050-T74 em operações de usinagem por torneamento.** 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Faculdade de Engenharia de Taubaté, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2007.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas.** São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 1990.

ANEXO A – PLANEJAMENTO FATORIAL 2^k (ANOVA)

Para este trabalho, foi utilizada a ANOVA a fim de investigar todas as combinações possíveis dos parâmetros de corte com os materiais da peça utilizados.

Para a realização da análise estatística, cada variável em estudo é dividida em fatores; neste trabalho foram estudados três fatores, a velocidade de corte (v_c), chamada de fator A, o avanço (f), chamado de fator B, e o percentual de silício na liga, chamado de fator C.

O planejamento fatorial 2^2 é o tipo mais simples do planejamento fatorial 2^k , onde há apenas dois fatores, A e B, com dois níveis cada. Estes níveis são considerados, um alto e outro baixo. Para este trabalho, o nível alto de A é 1000 m/min e o baixo, 500 m/min; o nível alto de B é 0,15 mm/rotação e o baixo é 0,08 mm/rotação. A combinação dos níveis alto de A com alto de B foi chamado de “AB”, a combinação dos níveis alto de A com baixo de B foi chamado de “A”, a combinação baixo de A com alto de B foi chamado de “B” e baixo de A com baixo de B foi chamado de “1”. Os termos A, B, AB e 1 são a soma da quantidade de canais usinados para cada combinação de parâmetros.

Para um planejamento 2^3 , foram testados três fatores, A, B e C, todos com um nível alto e outro baixo. Para este trabalho, o nível alto de C é a liga de alumínio-silício com maior porcentagem de silício, e o nível baixo de C é a liga de alumínio-silício com menor porcentagem de silício. A combinação dos níveis alto de A, B e C foi chamado de “ABC”; a combinação dos níveis alto de A com baixo de B e C foi chamado de “A”, a combinação dos níveis alto de A e B com baixo de C foi chamado “AB”, a combinação dos níveis de alto de A e C com baixo de B foi chamado de “AC”, a combinação dos níveis de alto B com baixo de A e C foi chamado de “B”, a combinação dos níveis de alto de B e C com baixo de A foi chamado de “BC”, a combinação dos níveis de alto de C com baixo de A e B foi chamado de “C”, e por fim a combinação dos níveis baixos de A, B e C foi chamada de “1”.

Para a verificação da influência dos fatores sobre a vida da ferramenta, por meio da análise de variância, foram determinadas a soma quadrática dos fatores e do erro. Assim, a soma de quadrados total é particionada em uma soma de quadrados para cada fator e para cada interação possível, sendo: o fator A (SQ_A), o fator B (SQ_B), o fator C (SQ_C), a interação entre A e B (SQ_{AB}), a interação entre A e C (SQ_{AC}), a interação entre B e C (SQ_{BC}), a interação entre A, B e C (SQ_{ABC}) e uma soma de quadrados devida ao erro (SQ_E). É necessário, no mínimo, duas replicações para que se possa obter uma soma de quadrados do erro diferente de zero.

Para o experimento fatorial 2^2 , a soma dos quadrados para A, B, AB, total e do erro são:

$$SQ_A = \frac{[a + ab - b - (1)]^2}{4n}, \quad (1)$$

$$SQ_B = \frac{[b + ab - a - (1)]^2}{4n}, \quad (2)$$

$$SQ_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{4n}. \quad (3)$$

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (4)$$

$$SQ_E = SQ_T - (SQ_{AB} + SQ_A + SQ_B) \quad (5)$$

Para a soma de quadrados total (SQ_T), os valores de “A” e “B” são as quantidades de níveis dos fatores “A” e “B”, e “n” é o número de réplicas do experimento.

Para o experimento fatorial 2^3 , a soma dos quadrados para A, B, C, AB, AC, BC, ABC, total e do erro são

$$SQ_A = \frac{[a + ab + ac + abc - b - c - bc - (1)]^2}{n \bullet 2^3}, \quad (6)$$

$$SQ_B = \frac{[b + ab + bc + abc - a - c - (1)]^2}{n \bullet 2^3}, \quad (7)$$

$$SQ_C = \frac{[c + ac + bc + abc - a - b - ab - (1)]^2}{n \bullet 2^3}, \quad (8)$$

$$SQ_{AB} = \frac{[ab + (1) + abc + c - a - b - ac - bc]^2}{n \bullet 2^3}, \quad (9)$$

$$SQ_{AC} = \frac{[ac + (1) + abc + b - a - c - ab - bc]^2}{n \bullet 2^3}, \quad (10)$$

$$SQ_{BC} = \frac{[bc + (1) + abc + a - b - c - ab - ac]^2}{n \bullet 2^3}, \quad (11)$$

$$SQ_{ABC} = \frac{[a + b + c + abc - (1) - ab - ac - bc]^2}{n \bullet 2^3}, \quad (12)$$

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{....}^2}{abcn} \quad (13)$$

$$SQ_E = SQ_T - (SQ_{ABC} + SQ_{AB} + SQ_{AC} + SQ_{BC} + SQ_A + SQ_B + SQ_C) \quad (14)$$

Para a soma de quadrados total (SQ_T), os valores de “A”, “B” e “C” são as quantidades de níveis dos fatores “A”, “B” e “C”, e “n” é o número de réplicas do experimento.

O procedimento completo da análise de variância para um planejamento fatorial de três fatores é mostrada na Tabela 19.

Tabela 19 – Análise de variância para o modelo de efeito fixo com três fatores.

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F ₀
<i>A</i>	SQ_A	$a - 1$	MQ_A	$\frac{MQ_A}{MQ_E}$
<i>B</i>	SQ_B	$b - 1$	MQ_B	$\frac{MQ_B}{MQ_E}$
<i>C</i>	SQ_C	$c - 1$	MQ_C	$\frac{MQ_C}{MQ_E}$
<i>AB</i>	SQ_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	MQ_{AB}	$\frac{MQ_{AB}}{MQ_E}$
<i>AC</i>	SQ_{AC}	$(a - 1)(c - 1)$	MQ_{AC}	$\frac{MQ_{AC}}{MQ_E}$
<i>BC</i>	SQ_{BC}	$(b - 1)(c - 1)$	MQ_{BC}	$\frac{MQ_{BC}}{MQ_E}$
<i>ABC</i>	SQ_{ABC}	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	MQ_{ABC}	$\frac{MQ_{ABC}}{MQ_E}$
Erro	SQ_E	$abc(n - 1)$	MQ_E	
Total	SQ_T	$abcn - 1$		

Fonte: Adaptado de Fonseca e Martins (1989)

Para finalizar o estudo, foram determinados os efeitos principais dos fatores A, B e a interação AB, para o experimento fatorial 2², e os efeitos principais dos fatores A, B, C e a interação AB, AC, BC e ABC, para o experimento fatorial 2³.

O efeito principal para cada fator de um experimento fatorial 2² é determinado pelas seguintes equações:

$$A = \frac{1}{2n} [a + ab - b - (1)], \quad (15)$$

$$B = \frac{1}{2n} [b + ab - a - (1)], \quad (16)$$

$$AB = \frac{1}{2n} [ab + (1) - a - b], \quad (17)$$

O efeito principal para cada fator de um experimento fatorial 2^3 é determinado pelas seguintes equações:

$$A = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - b - c - bc - (1)], \quad (18)$$

$$B = \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - a - c - ac - (1)], \quad (19)$$

$$C = \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - a - b - ab - (1)], \quad (20)$$

$$AB = \frac{1}{4n} [ab + (1) + abc + c - b - a - bc - ac], \quad (21)$$

$$AC = \frac{1}{4n} [ac + (1) + abc + b - a - c - ab - bc], \quad (22)$$

$$BC = \frac{1}{4n} [bc + (1) + abc + a - b - c - ab - ac], \quad (23)$$

$$ABC = \frac{1}{4n} [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)], \quad (24)$$