

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SERRAMENTO NO CORTE DE
CAPACITORES DE FILME METALIZADO ULTRAFINO

por

Tiago Chaves Mello

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, abril de 2015.

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SERRAMENTO NO CORTE DE
CAPACITORES DE FILME METALIZADO ULTRAFINO

por

Tiago Chaves Mello
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Dilson José Aguiar de Souza

UNISINOS

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

PROMECC / UFRGS

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

PROMECC / UFRGS

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, abril de 2015.

AGRADECIMENTOS

Ao PROMEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao meu orientador, André João de Souza, por acreditar no meu potencial e com seriedade, competência e dedicação, proporcionou a elaboração do trabalho com riquezas de informações práticas e científicas.

À Epcos do Brasil Ltda. pelo apoio ao projeto e pelo fornecimento de insumos.

À minha família, pela paciência e apoio.

RESUMO

Visando determinar os valores ótimos para o processo de serramento de anéis bobinados de filme metalizado ultrafino de alumínio com dielétrico de poliéster a partir das condições atuais do processo de fabricação de capacitores pela empresa Epcos do Brasil, realizou-se a avaliação de diferentes tipos de serras circulares variando-se a velocidade de rotação (n) e o tempo de corte (t_c). Desenvolvido projeto de experimento desses três fatores a fim de obter o resultado das interações entre eles quanto à resistência de isolamento (R_{iso}) das peças cortadas. A serra de 160 dentes de metal-duro com revestimento de filme de carbono tipo diamante (DLC) apresentou os melhores resultados quanto à “ R_{iso} ” acima de $0,378\text{ G}\Omega$ e quanto ao número de peças com valor abaixo deste. Constatou-se que “ n ” não influencia significativamente para a distribuição de “ R_{iso} ”; porém, gera menos peças abaixo do especificado. Já “ t_c ” não influencia significativamente o processo. Quanto ao tipo de dente, o perfil reto obteve melhor resultado para lâminas de serra com 80 dentes e perfil curvo para lâminas com 160 dentes. Já a espessura da lâmina não influenciou de forma expressiva o processo. A lâmina de aço-rápido apresentou adesão de alumínio na lateral do corpo da serra e, conseqüentemente, adesão de material na superfície de corte. As lâminas de metal-duro sem revestimento apresentaram falhas no filme metalizado por causa do atrito gerado entre a superfície de corte e a lateral da lâmina; esse inconveniente é eliminado quando ela é revestida com filme DLC apresentando melhorias quanto à “ R_{iso} ” das peças para “ n ” menores. Também houve adesão de alumínio na parte inferior do dente devido a uma delaminação da camada de filme DLC.

Palavras-chave: Capacitor; Serra Circular; Resistência de Isolamento; Serramento; Filme Metalizado Ultrafino.

ABSTRACT

In order to determine the optimal values for the sawing process of wound rings of metalized ultra-thin film with dielectric of polyester from current conditions of capacitor manufacturing process by Epcos company in Brazil, it was performed the evaluation of different types of circular saws varying the rotational speed (n) and the cutting time (t_c). Developed experiment design methodology for these three factors in order to get the result of the interactions between them regarding to the insulation resistance (R_{iso}) of cut parts. Through the analysis of the main effects, the cemented carbide saw with 160 teeth and diamond-like carbon (DLC) film coating showed the best results in terms of " R_{iso} " above 0,378 G and regarding to the number of parts with value below the specified. It was found that " n " does not influence significantly the distribution of " R_{iso} "; however, generates fewer parts below the specified. Now " t_c " does not significantly influence the process. Regarding the tooth type, straight profile obtained better results for saw blades with 80 teeth and curved profile for blades with 160 teeth. However the thickness of the blade did not influence significantly the process. The high speed steel blade presented adhesion of aluminum on the side of the saw body and, consequently, adhesion of material on the cutting surface. The cemented carbide blades uncoated presented failures on metalized film because of the friction generated between the cutting surface and the side of the blade; this drawback is eliminated when it is coated with DLC film presenting improvements to the parts " R_{iso} " for lower " n ". There was also aluminum adhesion on the bottom of the tooth due to a delamination of the DLC film layer.

Keywords: Capacitor; Circular Saw Blade; Insulation Resistance; Sawing; Metallized Ultra-thin Film.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO	4
1.1.1	<i>Desgaste da lâmina</i>	4
1.1.2	<i>Materiais aderidos na lateral da serra</i>	5
1.2	OBJETIVOS.....	6
2	CAPACITORES	7
2.1	HISTÓRIA.....	8
2.2	TIPOS DE CAPACITORES	10
3	CAPACITORES DE FILME POR CAMADAS	13
3.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO	13
3.2	FILMES POLIMÉRICOS	14
4	PROPRIEDADES ELÉTRICAS	16
4.1	CAPACITÂNCIA	16
4.2	RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO.....	18
4.2.1	<i>Fatores que afetam a resistência de isolamento</i>	19
4.3	PROCESSO DE AUTORREGENERAÇÃO.....	20
5	PROCESSO DE CORTE COM SERRA.....	22
5.1	ARCO DE SERRA	22
5.2	SERRA DE FITA.....	23
5.3	SERRA CIRCULAR	24
6	PARÂMETROS DE CORTE COM SERRAS CIRCULARES	26
6.1	GEOMETRIA DO DISCO DE SERRA	26
6.1.1	<i>Diâmetro da lâmina</i>	26
6.1.2	<i>Número de dentes</i>	27
6.1.3	<i>Número de dentes por centímetro</i>	28
6.1.4	<i>Geometria dos dentes</i>	29

6.1.5	<i>Slots de expansão</i>	31
6.2	MATERIAIS DO DISCO DE SERRA	33
6.2.1	<i>Lâminas de aço-rápido</i>	34
6.2.2	<i>Lâminas de metal-duro</i>	36
6.3	PARÂMETROS DE CORTE.....	37
6.3.1	<i>Velocidade de rotação e velocidade de corte</i>	37
6.3.2	<i>Avanço e velocidade de avanço</i>	39
6.3.3	<i>Espessura e largura de corte</i>	39
6.3.4	<i>Tempo de corte</i>	40
6.3.5	<i>Ângulo de pressão</i>	41
6.4	CORTE DE POLÍMEROS	41
7	METODOLOGIA	43
7.1	CORTE DE ANÉIS BOBINADOS.....	43
7.2	O PRODUTO TESTADO	43
7.3	METODOLOGIA DO EXPERIMENTO	44
7.3.1	<i>Fatores controláveis e não controláveis</i>	44
7.3.2	<i>Plano de experimentos</i>	45
8	RESULTADOS	50
8.1	INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DAS SERRAS NOS EXPERIMENTOS.....	53
8.1.1	<i>Serra 1 – Experimentos 1 e 2</i>	53
	Histograma da resistência de isolamento	53
	Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378 \text{ G}\Omega$	54
	Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$	54
	Aspecto da superfície lateral da serra	55
8.1.2	<i>Serra 2 – Experimentos 3 e 4</i>	56
	Histograma da resistência de isolamento	56
	Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378 \text{ G}\Omega$	57
	Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$	57
	Aspecto da superfície lateral da serra	57
8.1.3	<i>Serra 3 – Experimentos 5 e 6</i>	58
	Histograma da resistência de isolamento	58
	Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378 \text{ G}\Omega$	59
	Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$	60

Aspecto da superfície lateral da serra	60
8.1.4 Serra 4 – Experimentos 7 e 8.....	61
Histograma da resistência de isolamento	61
Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378 \text{ G}\Omega$	62
Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$	62
Aspecto da superfície lateral da serra	63
8.1.5 Serra 5 – Experimentos 9 e 10.....	64
Histograma da resistência de isolamento	64
Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378 \text{ G}\Omega$	64
Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$	65
Aspecto da superfície lateral da serra	65
8.1.6 Serra 6 – Experimentos 11 e 12.....	66
Histograma da resistência de isolamento	66
Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378 \text{ G}\Omega$	67
Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$	67
Aspecto da superfície lateral da serra	68
8.1.7 Serra 7 – Experimentos 13 e 14.....	69
Histograma da resistência de isolamento	69
Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378 \text{ G}\Omega$	69
Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$	70
Aspecto da superfície lateral da serra	71
8.1.8 Serra 8 – Experimentos 15 e 16.....	72
Histograma da resistência de isolamento	72
Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378 \text{ G}\Omega$	72
Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$	73
Aspecto da superfície lateral da serra	73
8.2 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DA SERRA.....	74
8.2.1 Influência do Número de Dentes.....	74
8.2.2 Influência do Tipo de Dente.....	75
8.2.3 Influência da Espessura da Lâmina.....	76
8.2.4 Influência quanto ao Material/Revestimento.....	77
9 CONCLUSÕES	79
10 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	81
11 REFERÊNCIAS.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Capacitor de filme metalizado.	1
Figura 1.2 – Aresta de corte de uma serra de HSS desgastada, ampliada em: (a) 300x; (b) 1750x.	4
Figura 1.3 –Serra de HSS avaliada: (a) lado A; (b) lado B	5
Figura 2.1 – Esquema representativo de um capacitor de placas paralelas e sua simbologia [Mussoi e Villaça, 2000].....	7
Figura 2.2 – Jarra de Leyden [Williams, 1999].....	9
Figura 2.3 – Classificação dos capacitores conforme material utilizado [Mussoi e Villaça, 2000; Boylestad e Nashelsky, 2004]	10
Figura 2.4 – Capacitor de impregnado com cera [Jupiter, 2014].	11
Figura 2.5 – Capacitor de mica [The Online Tutorials, 2014].	11
Figura 2.6 – Capacitor cerâmico [Murata, 2014].	11
Figura 2.7 – Capacitor de filme polimérico [Mult Comercial, 2015].....	12
Figura 3.1 – Esquema da estrutura do polímero: (a) antes da têmpera (emaranhado); (b) após a têmpera (cristalizado, reticulado) [WIMA, 2014].	13
Figura 3.2 – Esquema de obtenção das peças serradas [TDK, 2012].....	14
Figura 3.3 – Molécula do poliéster (PET)	15
Figura 4.1 – Representação esquemática da seção de um capacitor de placas paralelas.	17
Figura 4.2 – Variação da constante de tempo τ com a temperatura para capacitores de camadas (tipo <i>stacked</i>) [TDK, 2012].....	19
Figura 4.3 Variação da resistência de isolamento R_{iso} com a temperatura para capacitores de camadas (tipo <i>stacked</i>) [Vishay, 2014].....	19
Figura 4.4 – Processo de autoregeneração: (a) partícula metálica no dielétrico; (b) tensão aplicada e abertura do arco; (c) região isolada após o processo.	20
Figura 4.5 – Variação da capacitância com o número de regenerações sofridas [Dicken, 2010].	21
Figura 5.1 – Arco de Serra Starrett modelo Heavy-Duty 145 [Starrett, 2015].....	23
Figura 5.2 – Exemplos de máquinas de serra de fita: (a) vertical [Laguna Tools, 2014]; (b) horizontal [Klaeger, 2014].....	24

Figura 5.3 – Exemplos de máquinas de serra circular: (a) manual; (b) de bancada; (c) de trilho [Makita, 2015]	25
Figura 6.1 – Diâmetro de uma lâmina de serra circular [adaptado de Tramontina, 2014].....	26
Figura 6.2 – Exemplos de lâminas de serra circular de acordo com o número de dentes: (a) 28 dentes; (b) 60 dentes [Skil Tools, 2014].....	27
Figura 6.3 – Direções de corte em madeira: (a) longitudinal; (b) transversal.	28
Figura 6.4 – Ângulos de folga (α), de cunha (β) e de saída (γ) de uma lâmina de serra.....	30
Figura 6.5 – (a) <i>Slots</i> de expansão em serra circular; (b) Ranhuras antivibração [Bosch, 2014].	32
Figura 6.6 – Esquema representativo do ângulo entre a serra e o material, da profundidade de corte (h) e da largura de corte (b).	39
Figura 6.7 – Parâmetros para obtenção do tempo de corte [Adaptado de Tramontina, 2014].	40
Figura 6.8 – Esquema representativo do ângulo de pressão, da espessura do material e do diâmetro da serra [Adaptado de Tramontina, 2014].....	41
Figura 7.1 – Serra de HSS utilizado em corte de anéis bobinados.....	43
Figura 7.2 – Capacitor de filme B32529C0335K289 [Digi-key, 2014].....	44
Figura 7.3 – Lâminas de serra circular utilizadas nos experimentos.....	47
Figura 7.4 – Megaohmímetro Hioki DSM-8104.....	49
Figura 8.1 – Resultado quanto à resistência de isolamento para o fator tipo de serra.....	51
Figura 8.2 – Resultado quanto a NP com 0,378 G Ω para o fator tipo de serra.	51
Figura 8.3 – Influência do fator velocidade de rotação: (a) quanto à média da R_{iso} ; (b) quanto à NP com $R_{iso} < 0,378$ G Ω	52
Figura 8.4 – Influência do fator tempo de corte: (a) quanto à média da R_{iso} ; (b) quanto à NP com $R_{iso} < 0,378$ G Ω	52
Figura 8.5 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 1 e 2.	53
Figura 8.6 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 1 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	54
Figura 8.7 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 1 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	55
Figura 8.8 – Serra 1 após os experimentos 1 e 2 (imagens ampliadas 3x).....	56
Figura 8.9 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 3 e 4.	56

Figura 8.10 – Exemplo de amostras geradas pela Serra 2 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	57
Figura 8.11 – Exemplo de amostras geradas pela Serra 2 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	58
Figura 8.12 – Serra 2 após os experimentos 3 e 4 (imagens ampliadas 3x).	58
Figura 8.13 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 5 e 6.	59
Figura 8.14 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 3 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	59
Figura 8.15 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 3 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	60
Figura 8.16 – Serra 3 após os experimentos 5 e 6 (imagens ampliadas 3x).	61
Figura 8.17 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 5 e 6.	61
Figura 8.18 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 4 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	62
Figura 8.19 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 4 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	63
Figura 8.20 – Serra 4 após os experimentos 7 e 8 (imagens ampliadas 3x).	63
Figura 8.21 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 9 e 10.	64
Figura 8.22 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 5 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	65
Figura 8.23 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 5 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	65
Figura 8.24 – Serra 5 após os experimentos 9 e 10 (imagens ampliadas 3x).	66
Figura 8.25 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 11 e 12.	66
Figura 8.26 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 6 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	67
Figura 8.27 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 6 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	68
Figura 8.28 – Serra 6 após os experimentos 11 e 12 (imagens ampliadas 3x).	68
Figura 8.29 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 13 e 14.	69
Figura 8.30 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 7 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	70

Figura 8.31 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 7 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	70
Figura 8.32 – Serra 7 após os experimentos 13 e 14 (imagens ampliadas 3x).	71
Figura 8.33 – Delaminação da camada de DLC da Serra 7 (imagem ampliada 32x).	71
Figura 8.34 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 15 e 16.	72
Figura 8.35 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 8 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	73
Figura 8.36 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 8 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).	73
Figura 8.37 – Serra 8 após os experimentos 15 e 16 (imagens ampliadas 3x).	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Composição química dos lados A e B de uma lâmina de serra de HSS usada.	6
Tabela 3.1 – Propriedades dos principais dielétricos [Wima, 2014].	15
Tabela 5.1 – Comparativo entre os tipos de serra [Bralla, 1997]	22
Tabela 5.2 – Precisão das serras circulares [Tschätsch e Dietrich, 2008].	25
Tabela 6.1 – Número de dentes por centímetro e velocidade de corte para vários polímeros [Lokesnsgard, 2010]	42
Tabela 7.1 – Serras utilizadas no experimento.	46
Tabela 7.2 – Rotações e tempos de corte e avaliados.....	48
Tabela 7.3 – Plano de experimentos.....	48
Tabela 8.1 – Resultado do experimento.	50
Tabela 8.2 – Resultado dos experimentos das Serras 3 e 4 (influência de z_w).	74
Tabela 8.3 – Resultado dos experimentos das Serras 1 e 3 (influência do tipo de dente).....	76
Tabela 8.4 – Resultado dos experimentos das Serras 4 e 5 (influência do tipo de dente).....	76
Tabela 8.5 – Resultado dos experimentos das Serras 2 e 3 (influência da espessura b)	77
Tabela 8.6 – Resultado dos experimentos das Serras 5, 6 e 7 (influência do material/revestimento)	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	corrente alternada
AISI	Instituto Americano de Ferro e Aço (<i>American Iron and Steel Institute</i>)
CVD	deposição química por vapor (<i>chemical vapor deposition</i>)
DC	corrente contínua
DIN	Instituto Alemão para Normatização (<i>Deutsches Institut für Normung</i>)
DLC	Revestimento de carbono tipo diamante (<i>Diamond-Like Carbon</i>)
DOE	plano de experimentos (<i>design of experiments</i>)
ESR	resistência série equivalente
HSS	aço-rápido (<i>high speed steel</i>)
ISO	Organização Internacional para Padronização (<i>International Organization for Standardization</i>)
MKP (MFP)	capacitor de filme de polipropileno (<i>Metallisierte Polypropylen Kondensatoren</i>) ou (<i>Metallized Polypropylene Film</i>)
MKT (MFT)	capacitor de filme de poliéster (<i>Metallisierte Kondensatoren Typen</i>) ou (<i>Metallized Polyester Film</i>)
PCI	placa de circuito impresso
PET	poliéster
PP	polipropileno
PTFE	politetrafluoretileno (Teflon [®])
PVD	deposição física de vapor (<i>physical vapor deposition</i>)
PVDF	fluoreto de polivinilideno
RF	rádio frequência
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos (<i>Society of Automotive Engineers</i>)
VDC	tensão contínua

LISTA DE SÍMBOLOS

ε_0	constante dielétrica, adimensional
R_S	superfície resistente do filme, em mm^2
R_V	volume resistente do filme, em mm^3
R_{iso}	resistência de isolamento, em Ω
Z_E	número de dentes, adimensional
Z_W	número de dentes, adimensional
d_m	largura da borda livre, em m
l_W	largura do material serrado no sentido do corte, em mm
t_c	tempo de corte, em min
v_f	velocidade de avanço da lâmina, m/min
σ_S	condutividade superficial do filme, em $(\Omega\text{m})^{-1}$
σ_v	condutividade elétrica do dielétrico, em $(\Omega\text{m})^{-1}$
φ_S	ângulo de pressão, em graus
A	área, em m^2
a_p	largura do corte, em mm
b	espessura da lâmina de corte, em mm
B	espessura do material base serrado, em mm
C	capacitância, em farad
D	diâmetro da serra, em mm
E	campo elétrico, em N/C
f	frequência, em hertz
f_z	avanço por dente, em mm
h	a profundidade de corte, em mm
n	rotações por minuto, em rpm
p	passo da serra, em mm
q	carga elétrica
T	temperatura, em $^{\circ}\text{C}$
V	diferença de potencial, em V
v_c	velocidade de corte, em m/min
L	comprimento do capacitor, em m

- LS comprimento total percorrido pela serra, em mm
- d espessura do filme metalizado, em m
- τ constante de tempo, em s

1 INTRODUÇÃO

Capacitores são equipamentos capazes de armazenar energia potencial elétrica durante um intervalo de tempo. Eles são construídos utilizando um campo elétrico uniforme. Os capacitores são compostos por duas peças condutoras, chamadas armaduras, e um material isolante com propriedades específicas, chamado dielétrico. Eles são encontrados nas mais diversas formas e tamanhos em praticamente todos os equipamentos eletrônicos, sendo um componente fundamental para a influência sobre o circuito tendo aplicação em circuitos digitais e analógicos com tensões menores que 1 V até vários milhares de volts [Segre, 1984].

Os capacitores podem ser divididos em basicamente dois tipos: eletroestático e eletrolítico. Capacitores eletrostáticos têm construção simétrica não polar. São utilizados materiais como filme plástico como o dielétrico enquanto uma variedade de metais é utilizada como eletrodo. Como não são polarizados, podem ser inseridos nos circuitos eletrônicos sem considerar em que ponto cada terminal deve ser conectado. Capacitores eletrolíticos, por outro lado, são assimétricos e apresentam polaridade na sua construção. Utilizam um eletrólito que tem o papel de manter a camada dielétrica e também criar uma conexão negativa (cátodo). A vantagem são as altas capacitâncias atingidas; porém apresentam maiores volumes e não atingem a precisão de um capacitor eletrostático [Fitzgerald, 1876].

Capacitores de filme são componentes capazes de armazenar energia através de um campo elétrico gerado através de várias placas em paralelo, ou seja, são filmes metalizados que são bobinados a fim de estruturar uma pilha de placas metálicas sobrepostas. Através de uma camada de *spray* metálico, as placas são postas em contato elétrico uma com as outras de forma intercalada, conforme ilustrado na Figura 1.1. Essas placas são formadas por um filme de poliéster metalizado (alumínio) [Fowler *et al.*, 2008].

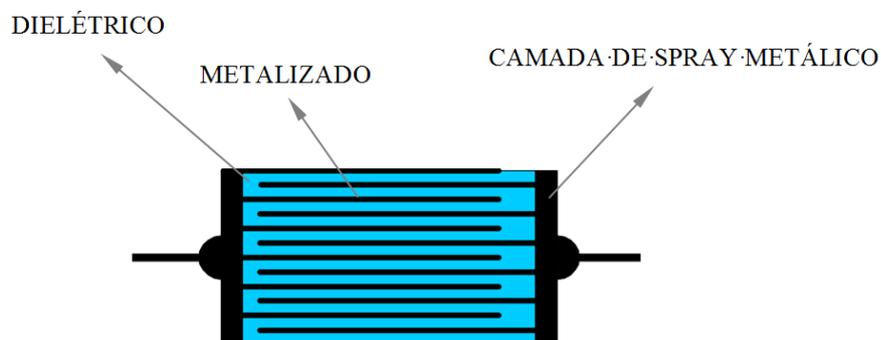


Figura 1.1 – Capacitor de filme metalizado.

O filme base exerce a função de camada isolante entre duas placas metálicas, ou seja, o dielétrico. Essas placas são postas em camadas para formar vários capacitores em paralelo e, assim, através da soma dessas, atingir a capacitância especificada [Fowler *et al.*, 2008].

Os capacitores podem ser utilizados em aplicações de filtragem com o objetivo de remover sinais em frequências não desejadas. Por exemplo, em dissociação, permitindo transferir repentinamente correntes enquanto mantêm estáveis os níveis de tensão, ou em associação, bloqueando a componente DC (corrente contínua) em circuitos AC (corrente alternada). Estes componentes são também muito críticos, apesar de o seu princípio de funcionamento ser muito simples. Então, dessa forma, uma falha no componente pode causar uma falha no circuito como um todo. O desempenho em determinada aplicação está ligado diretamente ao material utilizado como dielétrico. Um dos mais utilizados para exercer a função de dielétrico é o polipropileno devido ao baixo fator de dissipação permitindo altas correntes AC e ao autoaquecimento baixo, além de apresentar bom desempenho na faixa de temperaturas de aplicações eletrônicas de potência. Outro amplamente utilizado é o poliéster, utilizado para filtros leves; porém, devido ao elevado fator de dissipação, faz com que apresente baixo desempenho para aplicações com corrente AC ou onde a corrente apresenta altos picos [Dubilier, 2014].

Existem basicamente três maneiras de como um capacitor pode falhar: 1) capacitância fora do especificado; 2) alto fator de perdas; e 3) baixa resistência de isolamento. O último tipo (considerado no presente trabalho) é o fator que indica a capacidade do componente em manter sua carga, medida em Ω (ohms), ou seja, um capacitor deve ter resistência de isolamento maior que o especificado em norma para o produto [Fowler, 2008].

Um dos principais processos que afetam a resistência de isolamento de um capacitor é o processo de corte dos elementos bobinados geralmente realizado através de lâmina de serra (serra circular), pois partículas metálicas do próprio metalizado são arrastadas durante o corte fazendo com que se depositem no dielétrico. O arraste dessas partículas pode fazer com que estas se juntem à lateral da lâmina de serra, fazendo com que entre em contato com a superfície de corte durante o processo ou simplesmente haja a adesão de material diretamente sobre a superfície de corte. Através dessa partícula metálica, a resistência de isolamento elétrica é diminuída. Quando essa partícula é grande o suficiente para fazer com que duas placas adjacentes entrem em contato, os terminais do capacitor entram em curto circuito e ele perde sua função de capacitor, ou pelo menos, essas partículas depositadas diminuem a resistência de isolamento. Esta diminuição chega ao ponto de o capacitor perder carga durante

a aplicação final (isto é, perde a capacidade de armazenar a carga em nível conforme determinado em projeto). Esse defeito é ainda mais crítico para tipos de elevada capacitância onde são utilizados filmes chamados de ultrafinos nos quais a espessura do filme (d) está entre 1,2 e 2,0 μm devido à limitação de espaço físico disponível. A fim de retirar os curtos gerados e isolar novamente uma camada metálica de suas adjacentes, uma tensão maior que a tensão nominal de operação é aplicada. Para essa tensão aplicada, é dado o nome de tensão de regeneração. Um capacitor com uma inclusão entre duas camadas metálicas apresenta resistência de isolamento baixa, na ordem de megaohm ($\text{M}\Omega$) apesar de não afetar significativamente a capacitância (salvo quando as placas estão completamente em curto circuito). Após a aplicação da tensão de regeneração, o material que está gerando o curto acaba evaporando devido ao pulso de corrente aplicado induzido pela ruptura local. Então, as placas são novamente isoladas uma da outra, a resistência de isolamento aumenta até a ordem de gigaohm ($\text{G}\Omega$) e, devido à evaporação de parte das placas metálicas na área onde estava a inclusão, parte da capacitância é perdida por causa da redução da área das placas. Portanto, quanto menor a tensão necessária para isolar as camadas, menos a vida útil do capacitor é afetada [Tortai *et al.*, 2001].

Bradbury *et al.*, 1995, avaliaram o desempenho de serras circulares quanto à sua vida útil verificando que os defeitos de fabricação (durante a confecção do formato do dente) assim como o acabamento superficial são os principais responsáveis pela resistência ao desgaste. Já Lewis *et al.*, 1995, avaliaram o desempenho do corte de serras circulares de aço-rápido revestidas (HSS – *high-speed steel*) de acordo com a qualidade da superfície do material base utilizado na confecção das serras. Segundo o estudo, a qualidade final do corte está associada ao acabamento do processo de fabricação da serra, particularmente no acabamento do formato do dente, a redução da delaminação entre o revestimento e o material-base. Em estudo similar realizado por D’Errico *et al.*, 1997, avaliaram o desgaste do revestimento cerâmico aplicado em serras circulares no corte de aço SAE 1045. Como resultado, concluíram que a resistência do revestimento está ligada diretamente à sua microdureza e à sua espessura e não pode ser correlacionado com o comportamento antidesgaste. Esse comportamento está provavelmente ligado pelos mecanismos de desgaste durante um processo descontínuo de corte devido à complexidade da interação entre a peça e o revestimento. Bradbury *et al.*, 1995, diferentemente dos estudos de Lewis *et al.*, 1995, e D’Errico *et al.*, 1997, que focaram na utilização de revestimentos, avaliou a performance de corte de serras circulares com a

utilização de processos de tratamento superficial (implantação de íons) para a serra. Como resultado, o tratamento superficial proposto não influi no desempenho do corte em baixas velocidades, porém encontraram-se melhorias para altas velocidades de corte quanto ao desgaste gerado nos dentes da serra.

1.1 Motivação para o Estudo

Como motivação, foi realizada uma análise dos desgastes das lâminas de serra a partir dos dados fornecidos pela empresa fabricante de capacitores Epcos do Brasil (apoiadora do estudo). Esta análise tem como objetivo identificar as causas das falhas geradas no corte de anéis bobinados de filmes metalizados ultrafinos de alumínio e dielétrico de poliéster utilizando lâminas de aço-rápido (HSS).

1.1.1 Desgaste da lâmina

Após determinado número de ciclos a lâmina apresenta desgaste da aresta de corte aumentando os danos gerados à peça serrada, Figura 1.2.

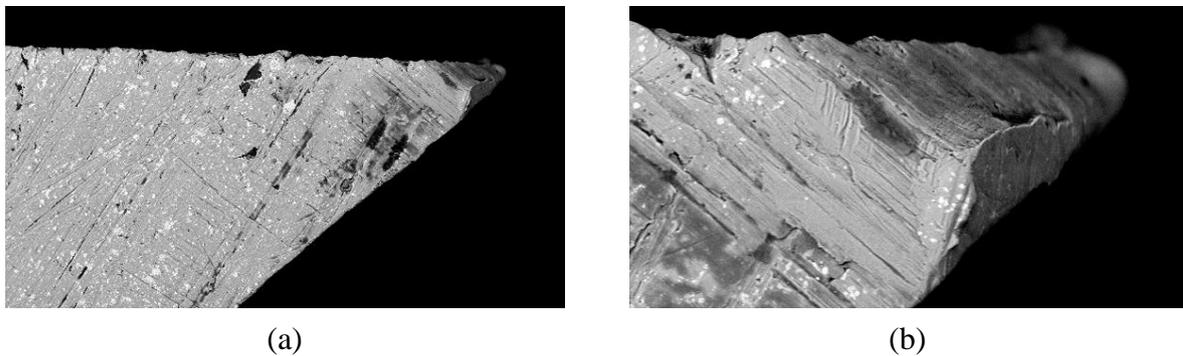


Figura 1.2 – Aresta de corte de uma serra de HSS desgastada, ampliada em: (a) 300x; (b) 1750x.

Portanto é especificado um número de ciclos (quantidade de peças cortadas) onde a lâmina é substituída antes de começar a apresentar peças serradas com baixa resistência de isolamento. A lâmina de serra desgastada gera maior arraste de material fazendo com que as camadas metálicas sejam transferidas para o dielétrico causando a redução da resistência de isolamento da peça como um todo. Quando esse dano excessivo não pode ser removido através do processo de autorregeneração ocorre um dano elétrico permanente à peça.

1.1.2 Materiais aderidos na lateral da serra

Ligado a um desvio de processo ou simplesmente a utilização de uma lâmina ou de parâmetros inadequados ao processo, outra causa geradora de uma peça com resistência de isolamento baixa é a adesão de material serrado (cavaco) gerado pelo processo de corte na superfície lateral da serra. A fim de verificar a origem e a incidência do material aderido, foi realizada uma avaliação metalográfica através de um microscópio eletrônico de varredura Philips XL-20 de ambos os lados de uma serra de HSS já utilizada no processo.

No lado A da lâmina, Figura 1.3a, conforme indicado na Tabela 1.1, 68% da composição da área selecionada para verificação é ferro (Fe), 12% são compostos por cromo (Cr), vanádio (V) e tungstênio (W). Os quatro primeiros materiais encontrados (80% da área) fazem parte da composição da serra. Também foram detectados 10% de estanho (Sn), material pertencente à camada superior de spray metálico, 10% de carbono (C) e oxigênio (O) provenientes do dielétrico e 2% de alumínio (Al) – camada metálica do filme e camada inferior do spray metálico.

No lado B da lâmina, Figura 1.3b, conforme esperado, os valores são bastante semelhantes ao lado A (Tabela 1.1) com 64% de Fe, 11% de Cr, V e W, 11% de Sn, 12% de C e O e 2% de Al. O material do filme metalizado adere-se às laterais da lâmina de serra de aço-rápido, fazendo com que o alumínio seja transportado para dentro do poliéster, prejudicando a peça. Deste modo, a escolha de um material para a lâmina de serra que minimize a adesão e/ou a escolha de parâmetros de corte adequados faz-se necessário.

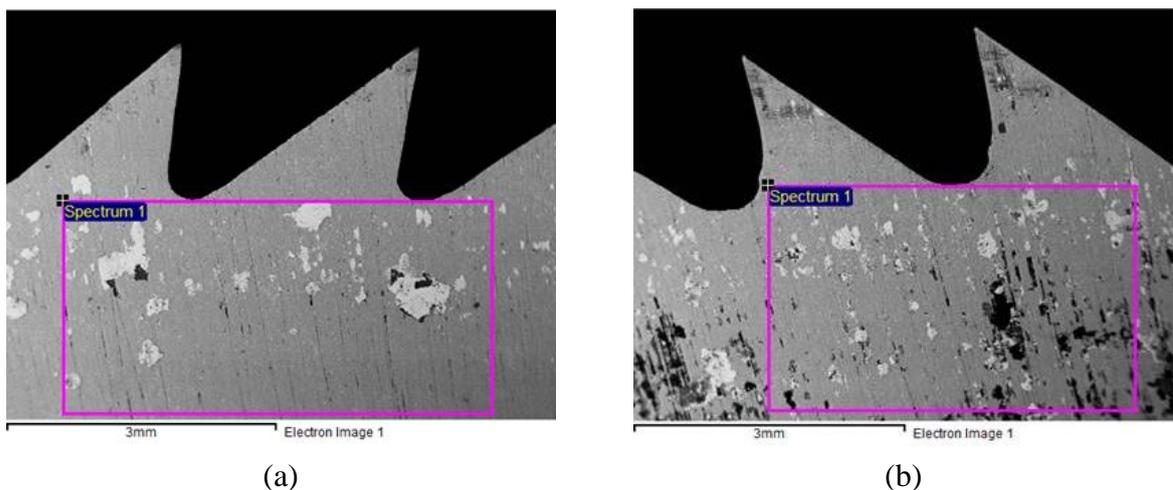


Figura 1.3 –Serra de HSS avaliada: (a) lado A; (b) lado B

Tabela 1.1 – Composição química dos lados A e B de uma lâmina de serra de HSS usada.

Material	Composição [%]		Descrição
	Lado A	Lado B	
Fe	68	64	Material base da serra
Cr / V / W	12	11	
Sn	10	11	Camada de spray metálico
C / O	10	12	Filme metalizado
Al	2	2	

1.2 Objetivos

Objetiva-se avaliar diferentes modelos de lâmina de serra circular quanto ao número de dentes, ao tipo de dente, à espessura da lâmina, ao material do disco e ao revestimento na operação de serramento de anéis bobinados. Nas operações de corte serão consideradas velocidades de rotação distintas e diferentes tempos de corte. Intenciona-se determinar a combinação ótima de parâmetros a partir das condições atuais do processo de fabricação de capacitores de filme metalizado ultrafino com dielétrico de poliéster.

2 CAPACITORES

O capacitor é um dos três elementos passivos básicos de qualquer circuito eletrônico ou elétrico. A resistência em um circuito fornece o aumento das perdas ôhmicas ou dissipação de potência (joule/s = watt) e sua corrente está em fase com a forma de onda da tensão aplicada. A indutância, ou capacitância, fornece aumento da saída de corrente e é a causa de correntes transientes em muitos circuitos. Indutância é uma atividade eletromagnética, um princípio básico por trás de todos os transformadores, motores, bombas, eletromagnetos, etc. Resiste a uma mudança em corrente e armazena energia quando portando uma corrente. Um indutor ideal é um caminho de curto circuito até uma corrente DC contínua. Em circuitos AC, sua corrente atrasa a tensão em 90° . Um capacitor, por outro lado, funciona como um campo elétrico. Suas propriedades são exatamente opostas aos de indutância, ou seja, resiste a uma mudança na tensão. Capacitores armazenam energia quando uma tensão estável é aplicada e torna-se carregado devido a uma tensão aplicada e mantém a energia assim como a tensão mesmo após remover a fonte de tensão externa. Isto torna os capacitores perigosos algumas vezes necessitando cuidados especiais ao manusear esses componentes. Um capacitor fornece um circuito aberto para fluir corrente DC em um estado estacionário. A corrente em um capacitor ideal conduz a tensão em 90° em circuitos AC [Petry, 2007; Rodrigues, 2006].

Um capacitor é definido como dois condutores (ou conjuntos de condutores interconectados) separados por um dielétrico, como mostra a Figura 2.1.

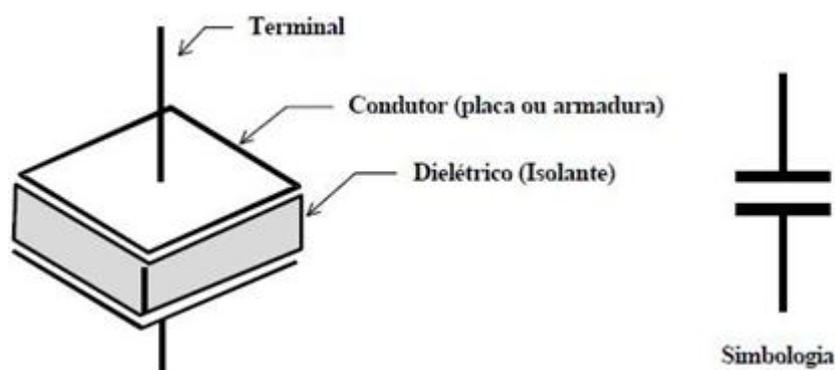


Figura 2.1 – Esquema representativo de um capacitor de placas paralelas e sua simbologia [Mussoi e Villaça, 2000].

Os condutores podem ser placas, folhas, formatos sólidos ou até mesmo fios. O separador pode ser ar, vácuo, sólidos, uma camada de óxido em um metal (como em

capacitores eletrolíticos), papéis finos achatados ou filmes colocados ou bobinados nos condutores. Um par de cabos próximos um do outro também terá alguma capacitância, mesmo que pequena. Um capacitor também pode ser formado nos dois lados de uma placa de circuito impresso (PCI) através do revestimento metálico nos lados opostos de uma dada área [Deshpande, 2012; Mussoi e Villaça, 2000].

Quando existe uma diferença de potencial (tensão) entre os condutores, um campo elétrico está presente no dielétrico. Este campo armazena energia e produz uma força mecânica entre os condutores. O efeito é maior quando há uma separação estreita entre as grandes áreas de condutores, condensador, portanto, os condutores muitas vezes são chamados placas [Schulz, 2010].

2.1 História

Associa-se a primeira descoberta científica para a história do capacitor ao médico e físico William Gilbert feita em 1600 através do seu trabalho *De Magnete, Magneticisque et de Magno Magnete Tellure* (Sobre os Imãs, os Corpos Magnéticos e o Grande Imã Terrestre). Gilbert introduziu os termos “eletricidade”, “força elétrica” e “atração elétrica” sendo considerado o fundador da ciência elétrica. Além disso, forneceu a teoria desenvolvida totalmente com todos os cinco movimentos magnéticos até então conhecidos, assim como a primeira discussão abrangente do magnetismo desde a Carta do Século XIII sobre o ímã de Peter Peregrinus. Em seus experimentos, ele pôde concluir que um material entre dois outros materiais magnéticos afeta pouco o efeito do magnetismo. Por outro lado, se esse material estiver sob o efeito de eletricidade estática, o fenômeno é afetado consideravelmente. Esta conclusão pode ser considerada como o primeiro estudo sobre dielétricos [Deshpande, 2012].

No Século XVIII, o físico inglês Stephen Gray descobriu a eletrização por indução em corpos metálicos, onde explicou as propriedades dos corpos isolantes e condutores. Seus estudos foram observados pelo físico francês Charles Du Fay que, a partir deles, desenvolveu o conceito de eletricidade vítrea (carga positiva) e resinosa (carga negativa). O cientista americano Benjamin Franklin também fez pesquisas na área e foi responsável pela atribuição do sinal “+” para cargas positivas e do sinal “-” para cargas negativas [Williams, 1999].

Apesar disso, a invenção do capacitor propriamente dito é atribuída ao alemão Ewald Georg von Kleist que, em outubro de 1745, notou que era possível armazenar uma carga elétrica conectando uma jarra de vidro preenchida de água a um gerador eletrostático através

de um fio metálico. Em 1746, através de um estudo independente, o físico Pieter van Musschenbroek, da Universidade de Leyden, construiu a jarra de Leyden, um capacitor muito similar ao de Kleist. A jarra de Leyden (Figura 2.2) consistia basicamente de uma jarra, com gargalo estreito, preenchida parcialmente com água e com um condutor elétrico fixado por uma rolha no gargalo da jarra. Segurando a jarra com as mãos, formava-se o condutor externo. Depois de carregar a jarra com gerador eletrostático ligado à água, foi possível gerar, em quem segura a jarra, um choque tocando o condutor interno ligado à água enquanto ainda segura o frasco. Então foi introduzido um condutor externo sobre a superfície exterior da jarra de modo a formar um verdadeiro condensador [Deshpande, 2012; Ho *et al.*, 2010].

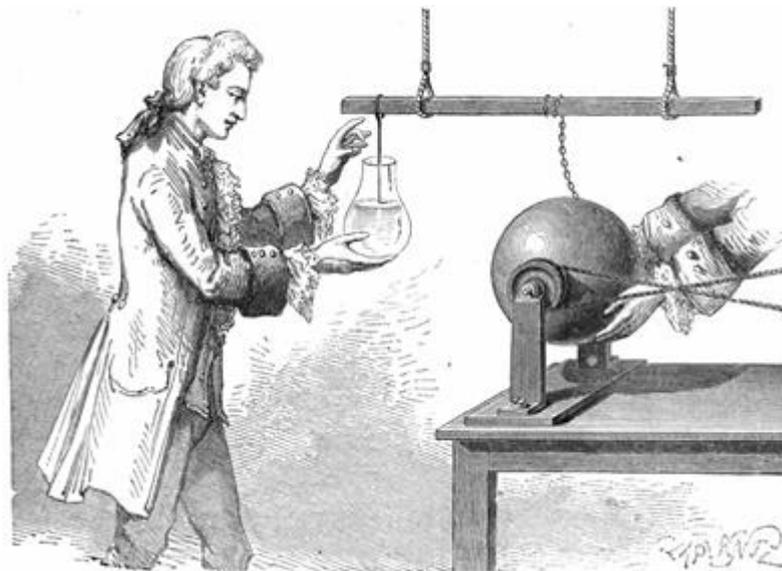


Figura 2.2 – Jarra de Leyden [Williams, 1999].

Posteriormente, o jornalista e inventor norte-americano Benjamin Franklin mostrou que a água na jarra não era um elemento essencial como se pensava pelos inventores; como resultado, ele foi capaz de fazer capacitores planos que consistem em uma folha de vidro entre os eletrodos. A partir da jarra de Leyden, foi criada a primeira unidade de medida de capacitância, a jarra, equivalente a um nanofarad (ηF). É creditada também à Franklin a invenção do capacitor plano de placas paralelas. Anos mais tarde, o cientista inglês Michael Faraday acabou criando a primeira aplicação prática para os capacitores tentando armazenar elétrons não utilizados em seus experimentos para o futuro. Faraday fez grandes contribuições para a tecnologia de capacitores, incluindo o conceito de constante dielétrica. Por sua contribuição para o campo da eletricidade, Michael Faraday foi homenageado com a unidade de capacitância do Sistema Internacional, o farad (F) [Deshpande, 2012; Ho *et al.*, 2010].

Até o final do Século XIX e início do Século XX, pouca evolução ocorreu com os capacitores. Foi somente a partir do surgimento do rádio e do uso de capacitores em frequências cada vez mais altas que a tecnologia voltou a avançar.

2.2 Tipos de Capacitores

Os capacitores podem ser classificados conforme suas características construtivas, na qual define sua aplicação final. Na Figura 2.3 podem ser observados os principais tipos de capacitores disponíveis classificados conforme o material utilizado no processo construtivo.

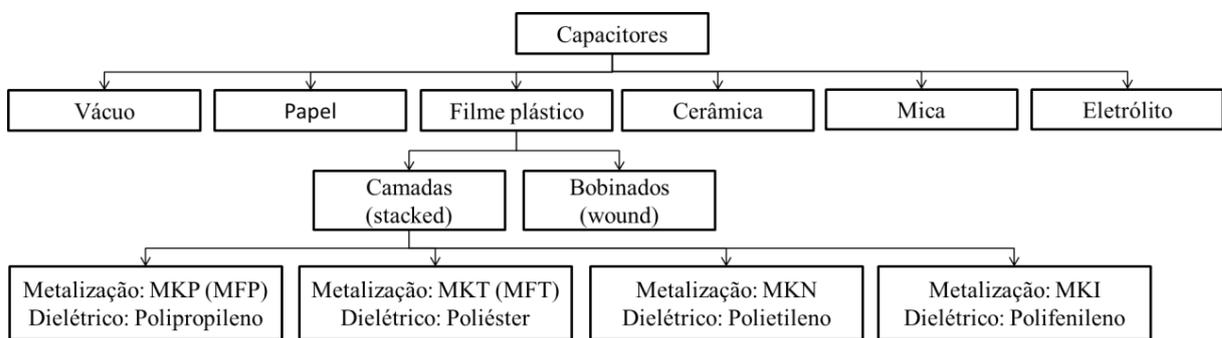


Figura 2.3 – Classificação dos capacitores conforme material utilizado
[Mussoi e Villaça, 2000; Boylestad e Nashelsky, 2004]

Capacitores de vácuo, ou seja, onde o vácuo exerce a função de isolante entre as camadas metálicas, são utilizados em circuitos de rádio frequência (RF) com alta potência visto que o isolante praticamente não apresenta perdas e possui característica de regeneração. Capacitores de eletrolíticos de alumínio possuem óxido de alumínio como dielétrico e são utilizados quando a aplicação exige alta capacitância com dimensões limitadas e baixo custo apesar das perdas do material [Eletrônica, 2014; Ho *et al.*, 2010].

Capacitores com dielétrico de papel impregnado de cera e eletrodos de folha foram inventados por Fitzgerald em 1876. Os primeiros destes capacitores foram utilizados em receptores de rádio (Figura 2.4) para a filtragem da fonte de alimentação e capacitores com dielétrico de mica para circuitos de RF. Por serem bastante volumosos, eram empregados nas fontes de alimentação de rádios, ou seja, indutores, que, em combinação com o retificador, reduziam o ruído proveniente da alimentação [Ho *et al.*, 2010; Tsukao *et al.*, 2003].

A mica é um grupo de minerais naturais utilizado em capacitores como dielétrico. Existem dois tipos de capacitores de mica: mica pinçada e mica prata. Capacitores de mica pinçada estão obsoletos devido às suas características inferiores.



Figura 2.4 – Capacitor de impregnado com cera [Jupiter, 2014].

Capacitores de mica prata são ainda utilizados, pois apresentam boas propriedades em alta frequência devido à sua baixa resistência e às baixas perdas indutivas, além de serem muito estáveis ao longo do tempo. Estes são feitos por camadas de folhas de mica revestidas com metal em ambos os lados. Esta montagem é então envolta em resina epóxi a fim de protegê-la contra a ação do ambiente. Devido a essas características, os capacitores de mica prata podem ser empregados em filtros e osciladores; porém, estão sendo substituídos por outros tipos de capacitores devido ao alto custo associado [Dearborn, 2014; Capacitor Guide, 2014]. Os capacitores fabricados com dielétrico de mica (Figura 2.5) foram inventados em 1909 por William Dubilier, com principal aplicação na área de transmissão de rádio. Em 1915, fundou a *Dubilier Condensador Company* em Nova York, e em 1933, a empresa se fundiu com a *Cornell Radio* para formar *Cornell-Dubilier Electric* [Dubilier, 2010].



Figura 2.5 – Capacitor de mica [The Online Tutorials, 2014].

Cerâmica tem sido utilizada como isolamento elétrico desde os primeiros estudos de eletricidade. A própria jarra de Leyden, o primeiro capacitor, é um capacitor de cerâmica. Capacitores com dielétricos de cerâmica (Figura 2.6) apresentam alta constante dielétrica, porém apresentam baixa tensão de ruptura [Dearborn, 2014; Capacitor Guide, 2014].



Figura 2.6 – Capacitor cerâmico [Murata, 2014].

Assim, capacitores cerâmicos proporcionam capacitância elevada, mas tipicamente apresentam um campo de ruptura baixo devido a porosidade da estrutura cerâmica, a qual surge a partir da consolidação incompleta das partículas de cerâmica durante o processo de fabricação. Capacitores de cerâmica são geralmente aplicados na aeronáutica, no espaço, militares, fonte de alimentação, multiplicadores de tensão e radares. Esse tipo de capacitor apresenta bom desempenho em altas temperaturas (até 220 μ F) que, por exemplo, permite bom desempenho na exploração de petróleo no fundo do poço. Para altas tensões (até 37000 VDC) proporciona desempenho superior em multiplicadores de tensão para dispositivos médicos. Ou seja, é aplicável em qualquer função que necessite de baixas perdas, precisão, estabilidade ou baixa indutância [Dearborn, 2014; Capacitor Guide, 2014].

Capacitores de filmes poliméricos (Figura 2.7) podem apresentar campos de ruptura maiores que 700 V/ μ m. No entanto, apresentam constantes dielétricas (ϵ_0) baixas em torno de 2,2 tais como o polipropileno (MKP) e poliestireno (MKS) ou superior a 12, para os polímeros ferroelétricos, tais como o fluoreto de polivinilideno (PVDF). Assim, a ênfase desta tecnologia é a maior constante dielétrica e, se possível, uma maior resistência dielétrica [TDK, 2012; Dearborn, 2014].

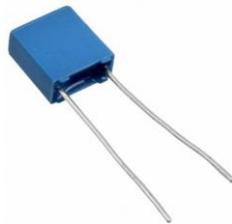


Figura 2.7 – Capacitor de filme polimérico [Mult Comercial, 2015].

A outra grande vantagem de capacitores de filme de polímero metalizado é o processo de autoregeneração. Os capacitores com dielétrico de filme plástico são utilizados em aplicações de precisão, estabilidade e confiabilidade, pois possuem baixa variação térmica e baixa absorção de umidade, o que garante a precisão das propriedades elétricas especificadas. Esse tipo de capacitor pode ser construído basicamente de duas formas: bobinados (*wound*) e de camadas (*stacked*). Dentre os de camadas, existem dois tipos de dielétricos que são os mais utilizados: o MKP (polipropileno) e o MKT (poliéster) [TDK, 2012; Dearborn, 2014].

3 CAPACITORES DE FILME POR CAMADAS

3.1 Processo de Fabricação

A fabricação de capacitores de filmes plásticos metalizados inicia-se através do processo de bobinagem do filme metalizado. Nesse processo, dois filmes são enrolados em um determinado número de voltas em torno de uma roda de diâmetro específico. O número de voltas determina a quantidade de camadas de placas metálicas no qual o capacitor será composto. Então a roda bobinada é submetida ao processo de aplicação da camada de *spray* metálico nas superfícies laterais do filme bobinado. Esse processo garante o contato elétrico das camadas pares em um dos lados do filme bobinado e das camadas ímpares do outro. Desta forma, tem-se a formação de vários capacitores em paralelo. Depois de aplicada a camada de *spray* metálico, a roda é submetida ao processo de têmpera, onde permanece por tempo e em temperatura especificados visando cristalizar o dielétrico, garantindo a compactação das camadas de filme e a estabilidade elétrica e mecânica da peça após os processos posteriores. A Figura 3.1 mostra a estrutura do polímero antes e depois da têmpera.

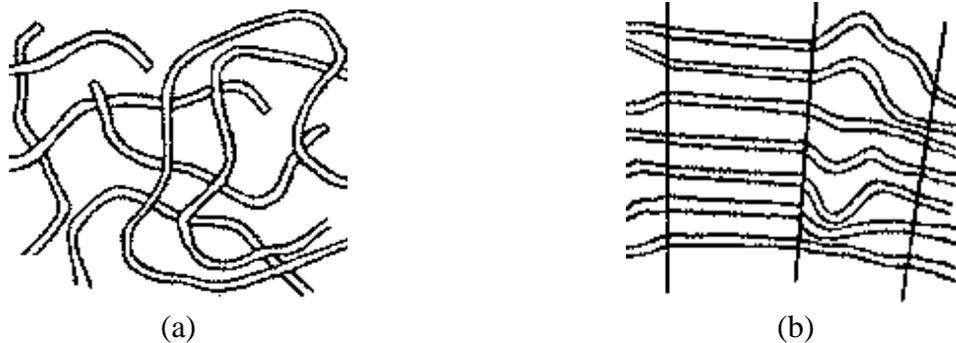


Figura 3.1 – Esquema da estrutura do polímero: (a) antes da têmpera (emaranhado); (b) após a têmpera (cristalizado, reticulado) [WIMA, 2014].

Após período de resfriamento, cada anel é cortado através de um disco de serra em partes de comprimento determinado a fim de obter a capacitância especificada (Figura 3.2). No próximo processo, os terminais são soldados nas camadas de *spray* metálico e então a peça soldada é inserida na caneca plástica com resina a fim de proteger o elemento bobinado da umidade do ambiente ao qual a peça será submetida na aplicação final. Após a cura da resina em estufa, as peças são submetidas a teste elétrico e embalagem.

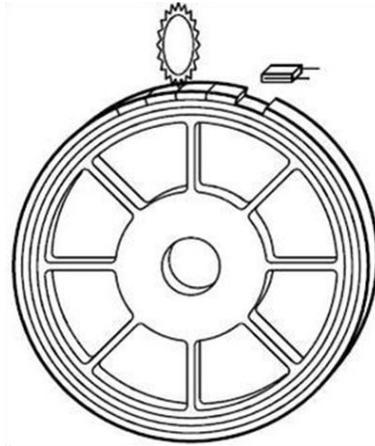


Figura 3.2 – Esquema de obtenção das peças serradas [TDK, 2012].

3.2 Filmes Poliméricos

O filme de polipropileno (PP) é o mais leve de todos os filmes de plástico. É uma película transparente, de alta resistência, com excelentes propriedades elétricas e mecânicas, além de elevada resistência química e à prova de umidade. [Toray, 2014]. Como filme metalizado, esse filme possui excelentes características elétricas, pois apresenta baixas perdas dielétricas, alta resistência de isolamento, baixa absorção dielétrica e rigidez dielétrica muito alta. O filme oferece, além disso, uma excelente resistência à umidade e estabilidade a longo prazo muito boa. O coeficiente de temperatura do material é negativo. Capacitores de polipropileno são normalmente utilizados em correntes alternadas (AC) e aplicações de pulso em altas frequências. São ainda utilizados em fontes de energia em modo comutado, reatores eletrônicos e aplicações de amortecimento, na discriminação de frequências e circuitos de filtro, na armazenagem de energia e nas aplicações de amostragem e retenção [Vishay, 2014].

O filme de poliéster (PET) oferece alta constante dielétrica e alta rigidez dielétrica. Tem ainda excelentes propriedades de autoregeneração e boa estabilidade à temperatura (o coeficiente de temperatura do material é positivo). São preferencialmente utilizados para aplicações em correntes contínuas (DC) como desacoplamento, bloqueadores, *bypass* e supressões de ruído. A principal vantagem dos capacitores com filme de poliéster é o melhor benefício quanto ao volume do componente em relação à capacitância de todos os capacitores de filme e isso a um custo moderado [Vishay, 2014].

A molécula básica do poliéster está indicada conforme Figura 3.3.

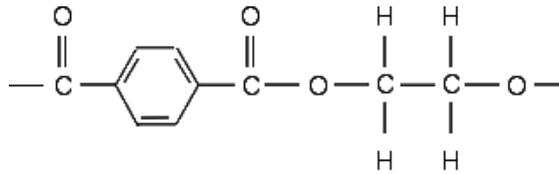


Figura 3.3 – Molécula do poliéster (PET)

Devido à boa densidade de capacitância atingida, é possível a construção de peças menores com a mesma capacitância quando comparado com filmes de polipropileno, por exemplo, visto que sua espessura d pode ser de até $0,7 \mu\text{m}$.

Na Tabela 3.1 pode ser visto as características dos principais dielétricos [Wima, 2014].

Tabela 3.1 – Propriedades dos principais dielétricos [Wima, 2014].

Propriedades	Polipropileno (MKP)	Poliéster (MKT)
Constante dielétrica 1 kHz / 23°C	2.2 (negativo conforme o aumento da temperatura)	3.3 (positivo conforme o aumento da temperatura)
Temperatura de operação	-55°C ... +100°C	-55°C ... +105°C
Fator de perdas [%] 1 / 10 / 100 kHz	0,05 / 0,08 / 0,25	0,8 / 1,5 / 3,0
Resistência série equivalente (ESR)	muito baixa	baixa
Resistência de isolamento [MΩ x μF] 25°C / 85°C	100000 / 10000	10000 / 1000
Amplitude de capacitância	27 pF ... 100 μF	1000 pF ... 220 μF
Tolerância de capacitância [+/- %]	1 / 2,5 / 5 / 10	5 / 10 / 20
Autoregeneração	Sim	Sim
Típico modo de falha no fim de vida	Aberto	Aberto
Confiabilidade	Alto	Alto
Efeito piezelétrico	Não	Não
Resistência ao choque térmico e mecânico	Alto	Alto
Polaridade	Não	Não

4 PROPRIEDADES ELÉTRICAS

4.1 Capacitância

Quando um capacitor está carregado, as placas contêm cargas de mesmo valor absoluto e sinais opostos, $+q$ e $-q$. Entretanto, quando se refere à carga de um capacitor, está se referindo a q como o valor absoluto de cargas de uma das placas. Como as placas são feitas de material condutor, são superfícies equipotenciais: todos os pontos da placa têm o mesmo potencial elétrico. Além disso, existe uma diferença de potencial entre as placas. A carga q e a diferença de potencial V de um capacitor são proporcionais e podem ser relacionadas conforme a Equação (4.1).

$$q = C \cdot V \quad (4.1)$$

onde C é a capacitância do capacitor, em F.

No caso de um capacitor de placas paralelas, a diferença de potencial V entre as placas relaciona-se com o campo elétrico E entre as placas metálicas posicionadas a uma distância d entre elas conforme definido pela Equação (4.2) [Mundim, 1998].

$$V = E \cdot d \quad (4.2)$$

Utilizando a Lei de Gauss, para um par de placas infinitas com cargas iguais e sinais contrários, o campo elétrico E entre as placas é definido conforme indicado na Equação (4.3) [Mundim, 1998].

$$E = \frac{q}{A \cdot \epsilon_0} \quad (4.3)$$

onde A é a área da placa, em m^2 , e ϵ_0 é a constante dielétrica, adimensional.

Substituindo as Equações (4.2) e (4.3) na Eq. (4.1) obtém-se que a capacitância de um capacitor de placas paralelas pode ser definida conforme a Equação (4.4) [Mundim, 1998].

$$C = \frac{A \cdot \epsilon_0}{d} \quad (4.4)$$

Portanto, o valor da capacitância depende basicamente da geometria das placas e do material utilizado como dielétrico, mas não é dependente da carga ou da diferença de potencial. A capacitância é uma medida da quantidade de carga que precisa ser acumulada nas placas para produzir certa diferença de potencial entre elas. Quanto maior a capacitância maior a carga necessária [Halliday, 2009].

Em capacitores de camadas (*stacked*) o filme é bobinado um determinado número de vezes a fim de empilhar várias camadas. Essas camadas são interconectadas intercaladamente, ou seja, de um lado as camadas ímpares e de outro as pares, representadas em VERMELHO e AZUL na Figura 4.1, respectivamente. Desta forma, cada camada metálica (placa) produz com a placa adjacente um pequeno capacitor. Através da ligação entre as placas, é formada a associação desses pequenos capacitores em série a fim de somar a capacitância até atingir o valor de projeto da peça final [Halliday, 2009].

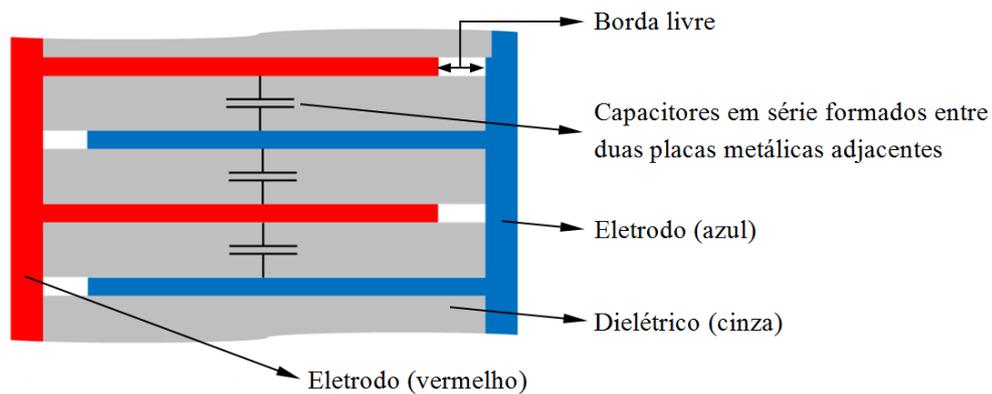


Figura 4.1 – Representação esquemática da seção de um capacitor de placas paralelas.

Assim, em um capacitor de placas paralelas, existem quatro maneiras de atingir uma maior capacitância C : 1) aumentar a constante dielétrica ϵ_0 ; 2) aumentar a área A da placa; 3) diminuir a distância d entre as placas; ou 4) aumentar o número de placas associadas em série. Devido às dimensões físicas do componente final, associado à necessidade de altas capacitâncias, conforme citado na **Seção 3.2** (Filmes Poliméricos), são utilizados filmes de poliéster (MKT) como dielétrico, pois são conhecidos por apresentarem alta constante dielétrica e possibilitarem a fabricação de filmes com espessura de até $0,7 \mu\text{m}$ (conhecidos como filmes ultrafinos) a fim de reduzir a distância d entre as placas. Conforme também explicitado na **Seção 3.2**, filmes de MKT apresentam baixa resistência de isolamento fazendo com que esses fatores tornem o processo de fabricação desse tipo de componente mais sensível, principalmente na etapa de corte. Isto se dá, pois qualquer impureza no dielétrico,

como um material metálico inserido no interior do dielétrico pela serra circular, por exemplo, pode causar uma falha no componente devido à baixa resistência de isolamento gerada.

4.2 Resistência de Isolamento

A resistência de isolamento (R_{iso}) é dada em ohm (Ω). Capacitores de dielétrico de papel e filme plástico geralmente apresentam valores variando entre 1 e 100 G Ω . Isto não é completamente explícito, porque a resistência de isolamento muda por um tempo após a aplicação de uma tensão. A resistência de isolamento de um capacitor é a relação entre a tensão contínua aplicada e a corrente de fuga resultante (que flui através do dielétrico e sobre a sua superfície do corpo) após ter cessado a corrente da carga inicial. Geralmente, a resistência de isolamento é medida após 60 segundos (tolerância de ± 5 s à temperatura ambiente de 20°C e umidade relativa de $50 \pm 2\%$). O valor de R_{iso} depende diretamente da propriedade e qualidade do material dielétrico, e da construção do capacitor. Seu valor diminui com o aumento da temperatura e com o aumento da umidade relativa (um invólucro de espessura adequada deve ser fornecido de acordo com a quantidade de umidade a que o capacitor será submetido). Apesar disso, alterações na resistência de isolamento são reversíveis [Wima, 2014].

A qualidade da isolamento pode ser mensurada através da constante de tempo τ e da capacitância C conforme determinado pela Equação (4.5).

$$\tau = R_{iso} \cdot C \quad (4.5)$$

A constante de tempo τ fornece o tempo em segundos durante o qual a tensão entre os terminais de um capacitor carregado diminui para 37% devido à autodescarga. Para capacitores de filme de baixa tensão (menores que 100 V) com capacitância $C > 0,33 \mu\text{F}$ adota-se, por exemplo, $\tau = 1250$ s [TDK, 2012]. Boa resistência de isolamento é necessária para capacitores que são utilizados para bloquear corrente contínua (DC) e de condensadores de armazenamento, em que uma taxa de tensão específica tem de permanecer inalterado durante um longo período de tempo [Wima, 2014; Vishay, 2014].

Usando os valores de capacitância ($C = 3,3 \mu\text{F}$) e da constante de tempo ($\tau = 1250$ s) na Eq. (4.5), obtém-se a resistência de isolamento $R_{iso} \geq 0,378$ G Ω . Este valor será respeitado como sendo o mínimo aceitável para boas condições de operação do capacitor e, portanto, será fixado como o valor limite de classificação das peças consideradas boas e ruins.

4.2.1 Fatores que afetam a resistência de isolamento

A resistência de isolamento de capacitores pode variar conforme as condições do ambiente. O fator de maior influência é a temperatura. Os valores típicos para a constante de tempo τ (fator diretamente proporcional à resistência de isolamento, Eq. (4.5)) conforme o tipo de dielétrico utilizado na fabricação do componente (dielétrico de poliéster MKT para o caso em estudo) está representado na Figura 4.2 [TDK, 2012]. A variação da resistência de isolamento com a temperatura é conforme indicado na Figura 4.3 [Vishay, 2014].

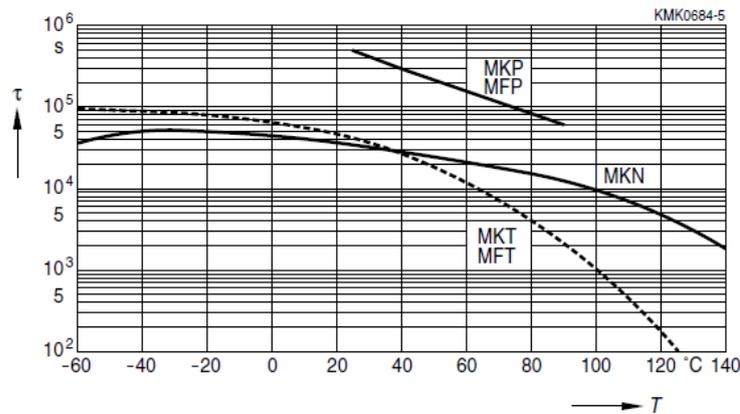


Figura 4.2 – Variação da constante de tempo τ com a temperatura para capacitores de camadas (tipo *stacked*) [TDK, 2012]

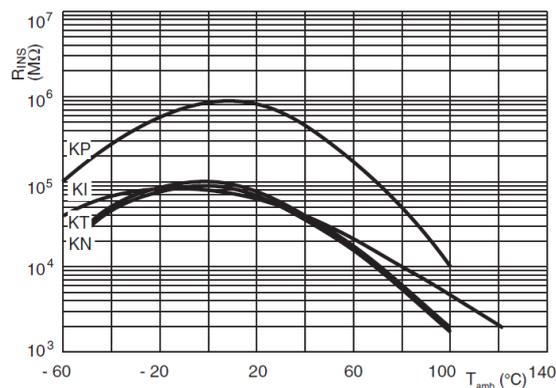


Figura 4.3 Variação da resistência de isolamento R_{iso} com a temperatura para capacitores de camadas (tipo *stacked*) [Vishay, 2014]

4.3 Processo de Autorregeneração

A condutividade elétrica de corrente contínua (DC) em filme metalizado polimérico pode ser usada para explicar o mecanismo e as características da resistência de isolamento. Um grande número de materiais isolantes é conhecido por exibir uma corrente constante que aumenta exponencialmente com a tensão aplicada para campos elétricos elevados. Sob um campo elétrico baixo, a resistência de isolamento é quase uma constante; porém, conforme aumenta a tensão elétrica, a corrente de fuga também aumenta; assim, a resistência de isolamento torna-se menor. À medida que a tensão continua a aumentar, o campo elétrico pode dirigir-se ao campo de ruptura crítica [Li *et al.*, 2013]. Esse fato se dá, pois mesmo os melhores filmes plásticos não estão livres de pequenos defeitos. No entanto, no caso de condensadores de filme metalizado, é possível eliminar estes defeitos através de uma aplicação de uma tensão mais elevada do que a tensão nominal. Para o filme, a corrente de fuga iria aumentar rapidamente e tenderia ao infinito uma vez que a ruptura ocorre onde a resistência de isolamento se aproximaria de zero. Este processo é conhecido como autorregeneração que é iniciado por um colapso elétrico [Chen *et al.*, 2012; Wima, 2014].

A regeneração, característica de confiabilidade mais importante dos capacitores de filme plástico, é a capacidade de eliminar áreas de baixa resistência quando submetidos a uma tensão. Conforme o item produzido, a regeneração ocorre quando a intensidade do campo de ruptura do dielétrico é excedida localmente nos pontos fracos, nos poros ou em impurezas no dielétrico (Figura 4.4a), ou seja, devido a uma imperfeição, o dielétrico é rompido e ocorre um arco entre as placas (Figura 4.4b), gerando uma corrente instantânea muito alta [TDK, 2013]. A energia liberada pelo arco descarrega no canal de ruptura e é suficiente para evaporar totalmente a fina camada metálica na vizinhança do canal (Figura 4.4c) [Wima, 2014].

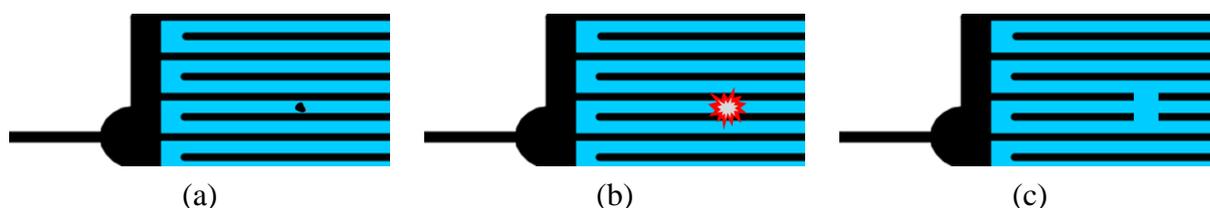


Figura 4.4 – Processo de autoregeneração: (a) partícula metálica no dielétrico; (b) tensão aplicada e abertura do arco; (c) região isolada após o processo.

Desta forma, o dielétrico é transformado em um plasma altamente comprimido que é empurrado para fora da zona defeituosa e pressiona as camadas dielétricas adjacentes. Durante a propagação do plasma, a descarga continua ao longo dos elétrodos metálicos. Nesse processo, atingem-se temperaturas de aproximadamente 6000 K. O filme metalizado evapora ao entrar em contato com o plasma e a rápida expansão dessa massa causa um resfriamento rápido extinguindo a descarga (após alguns microssegundos) deixando apenas uma área totalmente limpa de metalização em torno da falha no dielétrico. Esta rápida extinção do plasma é necessária para evitar uma maior deterioração da camada dielétrica próxima ao ponto da falha [TDK, 2013; ERA, 2014].

A pressão entre as camadas não deve ser muito grande de modo a permitir que o plasma se espalhe rapidamente da zona de ruptura [Wima, 2014]. Assim, após o término do processo, o dielétrico recupera seu desempenho de isolamento. A região isolada resulta então em uma área não mais defeituosa, cedendo ao capacitor a sua capacidade de operação. Com a ausência de qualquer forma de pressão nas camadas do dielétrico e com boa homogeneidade, melhoram-se as propriedades de autorregeneração [Dummer, 1997; ERA, 2014].

Apesar de ser considerada uma característica desejável e uma vantagem para muitas aplicações, existem dois problemas associados ao processo de autorregeneração: 1) deixa resíduos de carbono livre, que pode criar uma zona de fuga excessiva; 2) devido à perda de material, tanto do dielétrico quanto das placas metálicas adjacentes à área afetada, existe uma perda significativa de capacitância na peça final. Devido ao segundo fato, a peça pode sair da tolerância especificada, inutilizando-a para determinadas aplicações.

O gráfico representado na Figura 4.5 mostra a perda de capacitância conforme o número de regenerações sofridas por uma peça [Dicken, 2010].

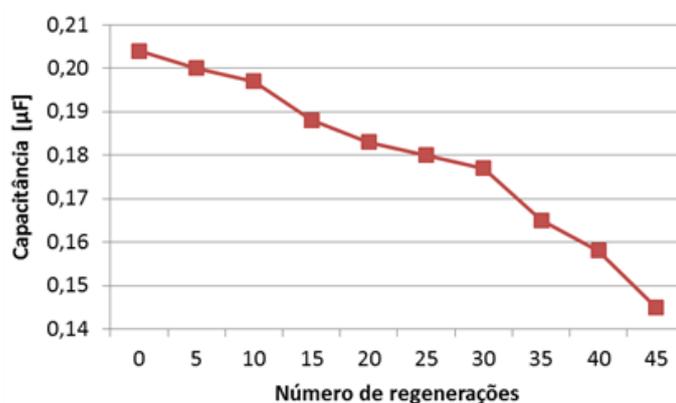


Figura 4.5 – Variação da capacitância com o número de regenerações sofridas [Dicken, 2010].

5 PROCESSO DE CORTE COM SERRA

Serramento é o processo de usinagem onde uma determinada peça é cortada em um tamanho requerido em que é possível utilizar ferramentas tipo serra de fita, serra de arco ou serra circular. No processo, cavacos são gerados devido à ação dos sucessivos dentes da serra que, por sua vez, são arranjados em linha em uma lâmina de serra. As forças atuando na ferramenta e no material podem ser complexas e não tão bem estudadas e documentadas como, por exemplo, no processo de torneamento. Devido à qualidade das lâminas de serra modernas, elas são capazes de realizar um trabalho rápido, com tolerâncias apertadas, ter boa repetitividade, além de o processo de corte em si ser confiável e previsível [Boljanovic, 2010].

A Tabela 5.1 compara as características gerais da serra de fita, de arco e circular.

Tabela 5.1 – Comparativo entre os tipos de serra [Bralla, 1997]

Característica	Tipo de Máquina		
	Baixo	Médio	Alto
Custo de máquina	Arco	Fita	Circular
Potência requerida	Fita	Arco	Circular
Produtividade	Arco	Circular	Fita
Versatilidade	Arco	Circular	Fita
Custo de ferramenta	Circular	Arco	Fita
Vida da ferramenta	Arco	Fita	Circular
Precisão final	Arco	Fita	Circular

Em geral, as serras de arco e de fita envolvem máquinas de menor custo e de maior versatilidade, assim como uma gama de corte maior. A serra circular produz acabamentos mais suaves, cumprem tolerâncias dimensionais mais rígidas e apresentam baixo custo quanto à ferramenta, especialmente em materiais não ferrosos [Bralla, 1997]. Por esse motivo, apesar do alto custo da máquina e da alta potência necessária, a serra circular torna-se a ideal para o corte de filmes bobinados.

5.1 Arco de Serra

A ferramenta de arco de serra realiza movimentos de avanço e retrocesso. Enquanto realiza esta operação, a ferramenta está em contato com a peça somente durante o movimento

em um dos sentidos (direção de tração da serra). No movimento de retorno, a lâmina de serra é elevada, longe da peça de trabalho, a fim de evitar danos à aresta de corte. Durante o retorno, a serra não remove material, o que resulta em um movimento em vazio causando perda de tempo. Como resultado do movimento de um comprimento restrito da serra, somente alguns dentes estão em contato. Por isso, a vida destas ferramentas é limitada [Bralla, 1997]. Para ilustrar a ferramenta, a Figura 5.1 mostra um exemplo de arco de serra.



Figura 5.1 – Arco de Serra Starrett modelo Heavy-Duty 145 [Starrett, 2015]

5.2 Serra de fita

A serra de fita consiste de uma serra de fita longa, sem fim, realizando o movimento sempre na mesma direção ao longo de duas ou mais polias. Uma polia, ligada a um motor, promove o movimento (motriz) enquanto as outras são inativas. A serra de fita deve ser fina o suficiente para dobrar-se sobre polias motrizes e inativas e, ainda, deve ter resistência e espessura suficiente a fim de suportar as pressões exercidas durante o corte. Em todos os tipos de fita de corte, a potência da máquina limita a taxa de corte, a espessura e a dureza do material a ser cortado. Ao contrário de um arco de serra, este método não envolve perdas de movimento. Além disso, muitos dentes estão em contato devido ao comprimento da cinta. Outra vantagem da serra de fitas é o seu movimento contínuo, o que produz um desgaste uniforme por todo o comprimento da lâmina. As lâminas de serras de fita também são alteradas com menos frequência porque são mais longas se comparado a outros tipos de serras [Bralla, 1997]. Como resultado, serras de fita têm vida útil mais longa que o arco de serra.

Basicamente existem dois tipos de serras de fita, a horizontal (Figura 5.2a) e a vertical (Figura 5.2b). A serra de fita horizontal é usada em operações de corte da seção transversal, ao passo que a serra de fita vertical geralmente é utilizada para corte de contornos. Este método difere dos outros, pois sua lâmina e sua ação de corte permite a aresta de corte seguir um caminho de contorno durante o corte.



Figura 5.2 – Exemplos de máquinas de serra de fita: (a) vertical [Laguna Tools, 2014];
(b) horizontal [Klaeger, 2014].

Quando comparado com outros métodos de usinagem (fresamento, por exemplo), o corte de contorno com uma serra de fita apresenta algumas vantagens: o material indesejado é removido em seções em vez de cavacos; como a ação de corte é para baixo (apenas para serras verticais), a peça é forçada contra a mesa, simplificando a fixação; como produz um corte estreito, minimiza os requisitos de energia para o corte e a quantidade de material retirado. A máquina de serra de fita é composta por uma estrutura aberta em forma de C. Devido ao quadro aberto, o espaço entre o quadro e a posição da lâmina impõe uma limitação de tamanho do contorno de corte. As tolerâncias dimensionais que podem ser mantidas em cortes com serras de fita dependem muito da habilidade do operador, da adequação das condições de instalação e ferramentas e da disponibilidade de acessórios [Bralla, 1997].

5.3 Serra Circular

A serra circular é uma ferramenta de corte que executa movimento de corte contínuo através de uma lâmina de serra circular giratória. Este processo de alto desempenho é utilizado em cortes lineares de materiais de baixo custo. A operação de corte com a lâmina de serra circular é caracterizada por ser um processo contínuo, rápido e que fornece uma superfície de corte com pouca rebarba. Com isto, é utilizada em operações de separação de peças e semiacabamento [Koether e Rau, 2008]. A máquina de serra circular pode ser manual, de bancada e de trilho, como ilustra a Figura 5.3.

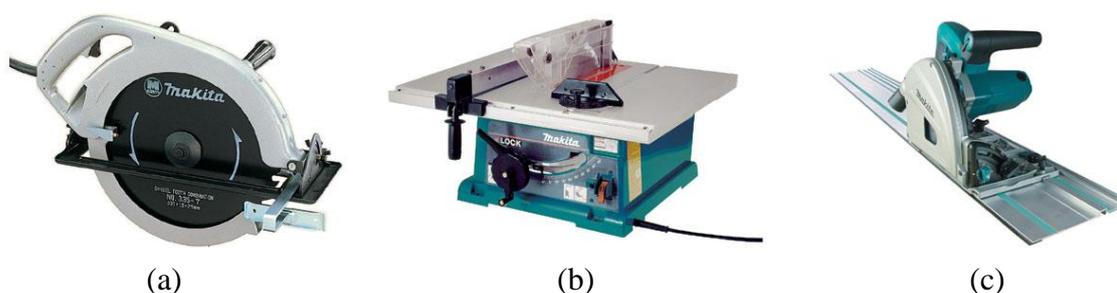


Figura 5.3 – Exemplos de máquinas de serra circular: (a) manual; (b) de bancada; (c) de trilho [Makita, 2015]

Aço ferramenta, aço-rápido (HSS) e metal-duro são utilizados como materiais de ferramentas de corte. Ao mesmo tempo, existem diferenças fundamentais entre os tipos de construção das lâminas de serra. Lâminas feitas de apenas um material geralmente são construídas de aço ferramenta ou HSS. No caso de lâminas de serra de grandes dimensões, por questões de custo, o corpo da lâmina é feito de aço de construção e, para os dentes da lâmina, são utilizados segmentos individuais de HSS, ou segmentos com insertos de aço duro, rebitados no corpo da lâmina [Cohen, 1972]. Serras circulares têm, em comparação com as serras de fita, alta estabilidade e rigidez. Serras com diâmetro menor que 300 mm, que são também utilizadas em fresadoras, são chamadas de serras circulares metálicas. Elas estão padronizadas conforme as normas DIN 1837 e DIN 1838 [Tschätsch, 2009].

No corte com serras distinguem-se dois tipos de precisão: 1) precisão longitudinal, que indica a precisão na qual o comprimento de uma peça pode ser cortada; e 2) precisão angular, que indica a precisão quanto ao ângulo em que a peça é cortada. A precisão que as típicas serras alcançam está descrita na Tabela 5.2 [Tschätsch e Dietrich, 2008].

Tabela 5.2 – Precisão das serras circulares [Tschätsch e Dietrich, 2008].

Característica avaliada	Arco de Serra	Serra de Fita	Serra Circular
Precisão longitudinal [mm]	± 0,20 a 0,25	± 0,20 a 0,30	± 0,15 a 0,20
Precisão angular [mm]	± 0,20 a 0,30	± 0,15	± 0,15 a 0,30

6 PARÂMETROS DE CORTE COM SERRAS CIRCULARES

A velocidade de corte (v_c), o avanço por dente (f_z) e a espessura da peça trabalhada (B) são as principais variáveis nas operações de corte com serras circulares. A composição do material, a dureza, a homogeneidade estrutural e o potencial de endurecimento também são variáveis importantes [Bralla, 1997].

6.1 Geometria do Disco de Serra

6.1.1 Diâmetro da lâmina

O diâmetro D , medido em mm, de uma lâmina de serra circular refere-se ao comprimento da linha entre as pontas de dois dentes opostos da lâmina, que passa pelo centro da lâmina de serra (Figura 6.1). Este é considerado o tamanho global da lâmina e todas as serras e lâminas de serra são classificadas de acordo com o seu diâmetro.

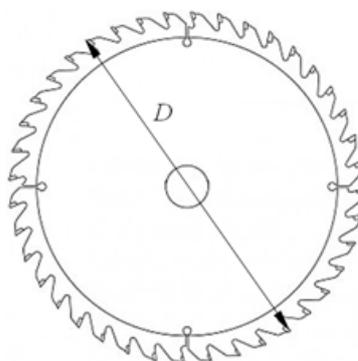


Figura 6.1 – Diâmetro de uma lâmina de serra circular [adaptado de Tramontina, 2014].

O diâmetro do disco é um fator importante para descobrir a capacidade da serra. Tipicamente, a profundidade de corte máxima que pode fazer uma serra é de cerca de 30% do seu diâmetro embora seja possível utilizar até 40% do diâmetro da lâmina. Lâminas especiais são fabricadas para uma variedade de materiais, desde alumínio até telha cerâmica. Os polímeros (plásticos) são outros materiais bastante comuns de serem cortados em serras circulares. É importante notar que, para o corte de plástico, a espessura máxima do material deve respeitar o máximo de 15% do diâmetro da lâmina. Peças grossas de plástico são normalmente cortadas com serras de fita, porque a quantidade de atrito gerado por uma serra circular pode derreter a aresta de corte do plástico cortado [Circular Saw Blades, 2014].

6.1.2 Número de dentes

Desconsiderando as lâminas abrasivas, como as utilizadas para cortar metais não ferrosos, vidro e cerâmica, todas as lâminas de serra têm um determinado número de dentes em torno da sua circunferência. O número de dentes da serra é uma das características mais importantes considerando a finalidade pretendida e é um requisito fundamental na sua escolha. Geralmente, é o primeiro parâmetro que se deve considerar ao selecionar uma lâmina de serra para uma determinada aplicação. A quantidade irá descrever se a serra é projetada para madeira ou alvenaria, para materiais grossos ou finos. Existem dois extremos: a lâmina com poucos e grandes dentes (Figura 6.2a) bem espaçados; e a lâmina com numerosos e pequenos dentes (Figura 6.2b) com pouco espaço entre eles [Circular Saw Blades, 2014].



Figura 6.2 – Exemplos de lâminas de serra circular de acordo com o número de dentes:
(a) 28 dentes; (b) 60 dentes [Skil Tools, 2014].

Por exemplo, no caso de corte de madeira, serras circulares que projetadas para corte longitudinal – ao longo do feixe (Figura 6.3a) geralmente têm um menor número de dentes, ou seja, são projetadas para formar um cavaco maior realizando o processo de corte mais rapidamente. Se o corte é realizado transversalmente ao feixe (Figura 6.3b), são utilizadas lâminas de serra com maior número de dentes para formação de um cavaco menor e um melhor acabamento. Como o corte longitudinal é mais fácil que o transversal, pode-se utilizar uma serra com menos dentes, aumentando a eficiência sem sacrificar a qualidade do corte. Em comparação, uma serra utilizada em corte longitudinal pode ter quatro vezes menos dentes que uma lâmina para corte transversal. Quanto mais dentes tiver a lâmina, mais suave será o corte [Tolpin, 2003].

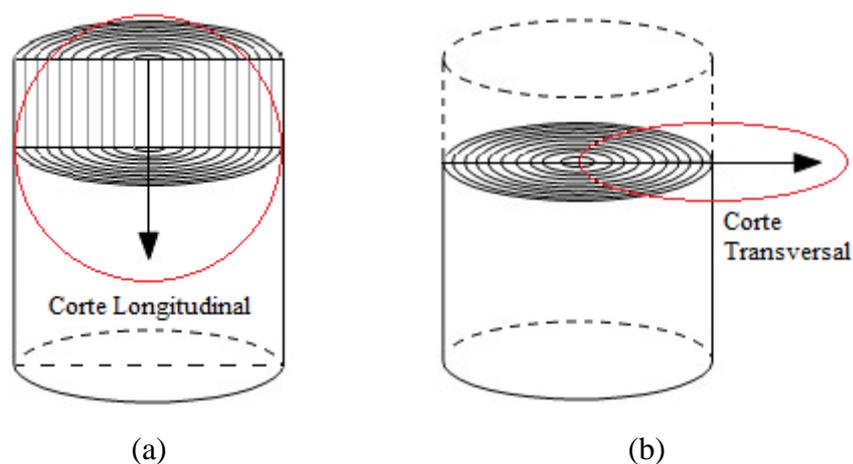


Figura 6.3 – Direções de corte em madeira: (a) longitudinal; (b) transversal.

6.1.3 Número de dentes por centímetro

O processo de corte de materiais com maior dureza e/ou com grande espessura pode exigir grandes diâmetros, trazendo o fato de o número total de dentes deve ser comparado com o diâmetro D da serra circular. Além do número total de dentes, outra medida utilizada é o número de dentes por centímetro de comprimento da circunferência, ou seja, do perímetro da lâmina (ou até simplesmente em relação ao diâmetro). Embora geralmente não seja especificado na embalagem da serra, é um fator importante para a seleção da mesma. Uma serra com mais dentes por centímetro da circunferência da lâmina é recomendada para materiais mais duros e/ou espessos, enquanto o que tem menor número de dentes é recomendado para materiais menos duros e/ou espessos [Tolpin, 2003].

Em materiais com maior dureza, recomenda-se utilizar um número maior de dentes devido ao desgaste gerado na lâmina durante o corte, especialmente se a qualidade do acabamento superficial for requerida. Para um bom acabamento, como supracitado, um mínimo de três dentes deve estar atuando simultaneamente no corte do material em qualquer momento. No entanto, nem todos os dentes que se encontram dentro da espessura do material estão de fato contribuindo para o corte.

Uma maneira de descobrir qual lâmina de serra utilizar quanto ao número de dentes é cortar o material e colocar os dentes em frente à seção transversal da peça cortada (a superfície usinada). Nesta posição, verifica-se a quantidade de dentes dentro da superfície de corte. A quantidade considerada como ideal é três, ou seja, três dentes atuando ao mesmo tempo durante o corte. Pode ser considerado serra com dois ou quatro dentes atuantes; porém, provavelmente não irão realizar um bom corte. No caso de dois ou menos dentes, o

acabamento não será suave como o esperado; por outro lado, a escolha de quatro ou mais pode causar o risco de superaquecimento e retardar o processo de corte. O número de dentes Z_w de uma serra circular pode ser obtido através da Equação (6.1) [Tschätsch, 2009].

$$Z_w = \frac{\pi \cdot D}{p} \quad (6.1)$$

onde p é o passo da serra circular, em milímetros.

Para os mesmos tipos de corte, o número de dentes é proporcional ao diâmetro, e para manter essa relação, um maior diâmetro D significa um maior número de dentes Z_w . Por exemplo, uma lâmina circular com $D = 200$ mm e $Z_w = 40$ dentes e outra com $D = 300$ mm e $Z_w = 60$ dentes terão o mesmo número de dentes por centímetro. Para um menor número de dentes, o corte fica menos suave quando em relação a uma lâmina com um maior número de dentes, porém há o ganho de maior taxa de remoção de material. [Circular Saw Blades, 2014].

O número de dentes em contato Z_e pode ser obtido pela Eq. (6.2) [Tschätsch, 2009].

$$Z_e = Z_w \cdot \frac{\varphi_s}{360^\circ} \quad (6.2)$$

onde φ_s é o ângulo de pressão, em graus.

6.1.4 Geometria dos dentes

A geometria do dente da serra circular determina como ele atua no corte do material quando cruza através dele. De forma ideal, apenas a ponta do dente entra em contato com a peça a ser cortada. Demais pontos de contato são apenas geradores de atrito, aumentando o consumo de energia e reduzindo a eficiência. Para ajudar a garantir que apenas a parte de corte do dente está em contato com o material cortado e que a lâmina rapidamente descarta o cavaco gerado, geometrias de dentes devem ser cuidadosamente projetadas. Essencialmente, existem vários ângulos em uma lâmina de serra sendo que os principais são os ângulos de saída γ e de folga α . O ângulo de saída γ , também referido como o ângulo de ataque (w_1) é o termo utilizado para descrever o sentido dos dentes da lâmina, em relação à rotação e um eixo central da lâmina da serra. Se imaginar uma linha que vai do centro da lâmina até a

extremidade frontal do dente, essa linha marcaria o zero grau. O ângulo de saída da lâmina é descrito em relação a essa linha imaginária [Tolphin, 2003].

Um ângulo de saída positivo ($+\gamma$) significa que os dentes são mais inclinados para o ângulo de rotação, enquanto que um ângulo de saída negativo ($-\gamma$) constitui que eles são em ângulo para trás, afastando-se da direção de rotação. Quanto maior for o ângulo γ , o mais agressivamente a lâmina da serra irá cortar o material e isso é ótimo para passar por uma grande quantidade de material rapidamente. Porém, maior velocidade de rotação causa menor suavidade. Ângulos γ excessivos podem quebrar o material que se está cortando. O avanço f também será elevado, ou seja, a serra circular mais provável vai puxar o material na direção de corte. O ângulo γ oferece uma oportunidade de controlar melhor o trabalho, pois é muito menos provável que o dente da serra “puxe” o material. Ângulo $-\gamma$ é recomendado para fazer cortes de esquadria em molduras arquitetônicas, painéis de madeira compensada, ou corte de materiais não madeireiros como plásticos e metal. Dentes com ângulo $-\gamma$ não cortam tão bem quanto dentes com um ângulo $+\gamma$. O avanço é muito baixo e isso aumenta a chance de acúmulo de calor, especialmente quando cortar materiais espessos ou densos [Rao, 2009].

Uma vez que a ponta do dente fez o seu trabalho, o restante do dente deve se afastar do material a fim de evitar atrito desnecessário. A parte superior do dente é fabricada com objetivo de criar uma folga. Ao traçar um círculo em volta da lâmina em que as arestas de corte dos dentes toquem o círculo (ou seja, um círculo com o diâmetro da lâmina), deverá haver um espaço entre a parte superior do dente e o círculo gerado pelo ângulo de folga α , (Figura 6.4). Grandes ângulos α são desejados para uma boa remoção do cavaco gerado no corte, diminuindo a incidência de material aderido à lâmina. Porém, ângulos α muito grandes podem diminuir a rigidez do dente reduzindo a vida útil da lâmina [Aurich e Dornfeld, 2009].

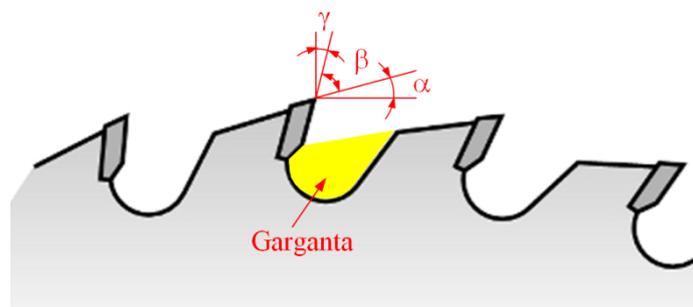


Figura 6.4 – Ângulos de folga (α), de cunha (β) e de saída (γ) de uma lâmina de serra.

A garganta (Figura 6.4) é o espaço entre a parte traseira de um dente e a parte frontal do próximo dente. Em outras palavras, é o vão entre os dentes da serra. Este espaço é concebido para levar o cavaco gerado a fim de impedir o entupimento da lâmina [Mann, 2011].

A influência do tamanho da garganta sobre a serra está intimamente relacionada com a largura de corte. Segundo Klocke, 2011, para garantir o efeito de corte da serra, é necessário que os cavacos gerados sejam mais espessos do que a largura do corte b para que não se acumulem na garganta e, para tal, é necessária a quebra dos cavacos.

A garganta é necessária para ajudar a evitar o superaquecimento da lâmina de serra e a queima do material cortado. Sem uma garganta grande o suficiente, o cavaco fica preso, aderindo à lâmina e aumentando o atrito, produzindo, assim, o excesso de calor. Isso é crítico para materiais dúcteis, que tendem a criar cavacos maiores que os materiais frágeis. Com o superaquecimento, o disco de serra pode se deformar, aumentar a espessura da serra e, em último caso, inutilizar a lâmina. Serras com um maior número de dentes z_w (ou seja, serras com dentes menores) apresentam gargantas menores, que não têm capacidade suficiente para escoar uma maior quantidade de cavaco. Desta forma, é recomendável a diminuição do avanço por dente f_z a fim de manter a velocidade de avanço v_f e, conseqüentemente, o tempo de corte t_c inalterados, diminuindo-se a necessidade de gargantas com maior profundidade para escoar o cavaco [Circular Saw Blades, 2014].

Em serras multiuso, onde em certas aplicações pode-se ter superaquecimento devido ao acúmulo de material entre os dentes, é comum a utilização de gargantas maiores a cada cinco dentes ou mais. Uma maior garganta entre os grupos de perfis de dente de serra permite um local para o escoamento do excesso de cavaco eliminando assim o problema do superaquecimento por atrito. Materiais não ferrosos como o alumínio (utilizado na metalização dos filmes de poliéster) e o latão podem ser cortados com uma lâmina de serra circular com a ponta dos dentes em metal-duro; porém, estes materiais têm uma tendência a aderir à lâmina, principalmente nas laterais dos dentes. Neste processo, estes materiais podem facilmente entupir a garganta, impedindo a lâmina de cortar [Circular Saw Blades, 2014].

6.1.5 Slots de expansão

O processo de corte, mesmo em circunstâncias ideais, envolve uma série de atritos. Enquanto os dentes da lâmina de serra (principalmente a ponta) são utilizados para a remoção

de material, as laterais dos dentes entram em atrito com o material no percurso do corte gerando uma grande quantidade de calor. Como a temperatura do metal da lâmina aumenta, ela tende a expandir-se. No entanto, a temperatura da lâmina não será constante em toda a área da placa, obrigando-o a expandir de forma desigual.

De um modo geral, a placa fica mais quente que os dentes, pois embora os dentes experimentem a maior parte do atrito, são eles também os mais refrigerados pelo movimento do ar. Assim, a placa se expande, deformando a lâmina axialmente e inutilizando-a. Por isso, é necessário impedir a expansão de forma desigual a fim de evitar o risco de empenamento. Existem duas formas de evitar o fenômeno:

- 1) Utilizar ligas mais densas na parte central da placa (região central da lâmina).
- 2) Fazer ranhuras na placa de lâmina, geralmente cortadas a laser, os chamados *slots* de expansão, Figura 6.5a.

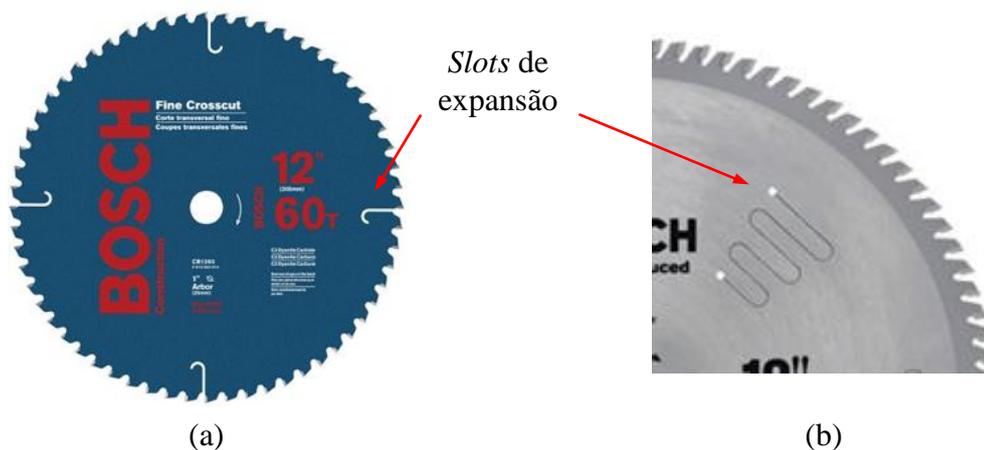


Figura 6.5 – (a) *Slots* de expansão em serra circular; (b) Ranhuras antivibração [Bosch, 2014].

Os *slots* de expansão existem para que possam absorver a expansão do metal, evitando a deformação da lâmina, e evitar o superaquecimento da lâmina, pois com o movimento da lâmina, o ar se move através dos *slots* atuando como um sistema de refrigeração. Em alguns casos, estas ranhuras e orifícios são preenchidos com metal mais dúctil, como cobre ou latão, para ajudar a atuar como um absorvedor de vibração [Circular Saw Blades, 2014].

Qualquer desequilíbrio em uma lâmina de serra circular causará vibração. Este desequilíbrio pode vir de três lugares: falta de concentricidade, brasagem desigual dos dentes, ou deslocamento irregular dos dentes. Cada um provoca um tipo diferente de vibração, o que

aumenta a fadiga do operador e aumenta a gravidade das marcas de ferramentas no material cortado [Truini, 1988].

6.2 Materiais do Disco de Serra

As melhores lâminas são cortadas a laser com tolerâncias restritas. Lâminas mais baratas são estampadas, com níveis de tolerância mais abertos. A elevada precisão de corte a laser ajuda a assegurar concentricidade do orifício central de fixação em relação à posição de cada dente garantindo que todos os dentes se encontrem no local de trabalho de forma igual. Os maiores fatores adversos são o calor, a força centrípeta e as inclusões. Estes fatores causam deformação da placa, resultando em corte desalinhado, em vibrações e ruído. Lâminas de serra circular normalmente operam em rotações próximas a 5000 rpm. Em altas temperaturas, isto é o suficiente para empenar, mesmo uma placa de lâmina sólida. Adicionalmente, se os dentes encontram qualquer obstáculo em seu caminho, a lâmina de serra pode ser danificada. Quebrando um único dente, a lâmina de serra passa a operar de forma desequilibrada [Circular Saw Blades, 2014].

Um fator importante na fabricação de placas de lâmina é o planicidade do aço utilizado em sua fabricação. Nas siderúrgicas, a chapa de aço utilizada é obtida a partir de enormes rolos, pesando muitas toneladas. Este é então levado para distribuidores de aço e fabricantes de chapas metálicas, que então o achatam e o cortam em folhas. Mesmo achatado, existe uma ligeira tendência de ondulação nas folhas. Lâminas de alta qualidade são feitas de aço que nunca foi enrolado e sim cortado em folhas ou as placas são verificadas individualmente e achatadas antes e após a têmpera. Qualquer processo é caro, mas é essencial para criar uma lâmina sem oscilação [Tolpin, 2003].

As lâminas de serra normalmente são fabricadas em aço-rápido (HSS), uma liga de aço com pequenas percentagens de carbono, tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio e outros adicionados a ele. O objetivo desses metais adicionais é endurecer o aço, tornando-o menos propenso à flexão e deformação. Para lâminas circulares de HSS, a placa da lâmina e os dentes são uma única peça. No entanto, a grande maioria das serras circulares têm dentes de metal-duro revestido. Nessas lâminas, a placa é sempre mais fina do que os dentes, ajudando a reduzir a aderência de material [Circular Saw Blades, 2014].

Em relação às lâminas de material mais dúctil (como as de HSS), as lâminas de metal-duro geram uma menor rugosidade na superfície lateral possibilitando atingir tolerâncias mais

apertadas e aumentar a vida útil da serra circular. Em contrapartida, o metal-duro é de difícil retrabalho devido a sua dureza. Além disso, as lâminas de metal-duro têm custo, em média, duas vezes maior se comparado com as lâminas de HSS. Na Tabela 6.1 estão indicadas as velocidades de corte (v_c) e de rotação (n) recomendadas para lâminas de HSS e metal-duro conforme o material usinado – no caso, alumínio e plástico (poliéster) dispostos em camadas para formar o capacitor [Caleyron, 2014].

Tabela 6.1 – Parâmetros de corte para lâminas de HSS e metal-duro (MD) [Caleyron, 2014].

Material	Parâmetros	Alumínio	Plástico
HSS	v_c [m/min]	400 – 800	600 – 1000
	n [rpm]	800	1900
MD	v_c [m/min]	400 – 800	600 – 1000
	n [rpm]	1910	2550

6.2.1 Lâminas de aço-rápido

O carbono (C) é o principal elemento constituinte de qualquer aço e responsável pela capacidade de temperabilidade. De acordo com a norma AISI (*American Iron and Steel Institute*), os aços rápidos podem ser classificados em duas categorias: aços rápidos ao tungstênio (W) (Grupo T) e aços rápidos ao molibdênio (Mo) (Grupo M) [Venson, 2014].

O teor de carbono nos aços rápidos varia aproximadamente de 0,7% a 1,6%. Os teores mais baixos de carbono podem causar uma menor dureza no estado temperado, resultando consequentemente em uma menor dureza no estado revenido. Se aumentar a quantidade de carbono, também aumentará a formação de carbonetos complexos, os quais resultam na obtenção de maior dureza e maior resistência ao desgaste. Porém, quanto mais elevado for o teor de carbono, maior será a quantidade de austenita retida no estado temperado. Isto exigirá temperaturas de revenimento muito elevadas e tempos mais longos. A alta presença de carbono favorece a tendência à descarbonetação se não tomadas as precauções necessárias. Dependendo da porcentagem de carbono e da atmosfera utilizada no tratamento térmico, uma pequena descarbonetação superficial pode ocorrer, a qual às vezes é gerada propositalmente entre 980 e 1095°C para melhorar a dureza superficial [Chiaverini, 1979; Henriquez, 1982].

O teor de cromo (Cr) no HSS é de aproximadamente de 4%. O seu papel é aumentar a temperabilidade nos aços rápidos, tornando possível o seu endurecimento completo mesmo ao

ar e com secções relativamente grandes. Este elemento também melhora o endurecimento secundário devido à precipitação de carbonetos do tipo $M_{23}C_6$ durante o revenido, reduz as variações dimensionais durante os tratamentos térmicos e retarda o amolecimento na faixa de revenimento entre 530 e 600°C. Historicamente, o cromo foi adicionado para melhorar a tenacidade, prevenir a oxidação durante a austenização em alta temperatura e promover um endurecimento secundário [Chiaverini, 1979; Ferraresi, 1982].

O vanádio (V) é um elemento sempre presente no HSS. O seu principal efeito é produzir carbonetos de vanádio muito duros, normalmente do tipo MC, embora sua real composição esteja perto de V_4C_3 . Estes carbonetos são importantes, pois promovem a resistência à abrasão. O vanádio reforça a dureza secundária e ajuda no controle do crescimento de grão. Para evitar a depreciação de carbono na matriz, é importante avaliar se existe quantidade suficiente de carbono para que satisfaça o vanádio, além do exigido para o endurecimento (ou estado temperado). A cada 1% de vanádio adicional, é necessário um adicional de 0,25% de carbono. O carbono e o vanádio são dois elementos cruciais que determinam as propriedades e a vida útil dos aços rápidos [Wei *et al.*, 2006].

No caso das lâminas de HSS onde o dente faz parte da lâmina, pode-se soldar sobre cada dente um inserto de um material mais duro ou podem ser galvanizadas com um material mais duro para aumentar a vida da lâmina. Enquanto essas são as lâminas mais baratas disponíveis, eles também têm a vida útil mais curta.

É bastante comum encontrar serras revestidas com outros metais ou Teflon[®], um dos métodos mais eficazes para combater as deformidades de placa. Isto é feito para ajudar a eliminar a possibilidade de o material serrado aderir à lâmina, manter a sua dureza e prevenir o aquecimento. Lâminas de serra revestidas melhoram o desempenho no corte de materiais compostos, por exemplo, com adesivos como cola, e melhora do atrito e resistência à corrosão. Um ponto importante é que revestimentos como metal-duro, titânio ou Teflon[®] têm pouco impacto sobre a espessura do corte. Os slots de expansão, ranhuras antivibração e revestimentos trabalham juntos para ajudar a eliminar a possibilidade de deformação da placa. Um revestimento de qualidade permite que a serra permaneça com boa qualidade de afiação por muito mais tempo e consumir menos energia. Existem duas categorias diferentes de revestimentos que podem ser usados em serras circulares: uma para o corpo da lâmina e outra para os dentes. Desta forma, ambos têm finalidades diferentes [Circular Saw Blades, 2014].

O corpo da serra pode ser revestido como uma proteção contra a ferrugem e/ou o atrito. A metalurgia moderna desenvolveu diversos métodos de fabricação e utiliza diferentes ligas no processo de fundição a fim de melhorar a durabilidade. O tipo de revestimento depende da dureza do metal em que é feita a lâmina. Alguns fabricantes pintam o corpo a fim de identificar a marca e ainda fornecer proteção contra a ferrugem [Nowak, 1991].

Existem algumas lâminas de alto custo, que são revestidas com Teflon[®] (PTFE) a fim de reduzir o atrito. Este tipo de revestimento pode ser muito útil, pois a maior parte do atrito gerado tem origem nos cavacos que passam entre a lateral da lâmina e o material cortado. Ao revestir a lâmina, os cavacos não vão aderir à lâmina fazendo com que seja mais facilmente removido. Além disso, pode haver ocasiões em que o material pressiona a lâmina, problema especialmente gerado em serras circulares manuais e serras de esquadria. O revestimento dos dentes é um fator importante a fim de prolongar a vida de uma serra. Ao cortar materiais duros, a temperatura se aproxima do ponto de fusão trazendo a necessidade de proteção contra superaquecimento. Quanto mais duro o material usado nos dentes, mais tempo a lâmina irá durar sem necessidade de reafiação e, por essa razão, existem no mercado vários materiais que são utilizados para revestir os dentes. Por um lado, as lâminas de HSS são facilmente reafiadas; por outro lado, no caso de lâminas revestidas, o processo de reafiação remove o revestimento [Circular Saw Blades, 2014].

6.2.2 *Lâminas de metal-duro*

A serra de metal-duro é geralmente constituída de uma liga de duas ou mais fases fabricada a partir do processo de metalurgia do pó com um aglutinante metálico. Os materiais utilizados são o carboneto de tungstênio (WC), o carboneto de titânio (TiC) e o carboneto de tântalo (TaC). O aglutinante utilizado é o cobalto (Co) em quantidade entre 5 e 15%. Também podem ser utilizados níquel (Ni) e molibdênio (Mo) como aglutinante. Aumentando a quantidade de Co à liga há acréscimo na tenacidade, enquanto que um aumento de TiC há um crescimento na resistência ao desgaste, e um aumento de TaC adiciona resistência ao desgaste em altas temperaturas. Carbonetos promovem alta resistência às arestas de corte e, portanto, alta durabilidade; por isso são recomendados para aplicações de acabamento quanto em condições estáveis de corte. O processo de fabricação do metal-duro por metalurgia do pó permite total liberdade na escolha dos constituintes [Grote e Antonsson, 2009].

O metal-duro mantém suas propriedades até 1000 °C. Pode, portanto, ser utilizado em velocidades de até três vezes maiores se comparado com as lâminas de HSS. De acordo com a norma (DIN 4990/ISO 513), o metal-duro para a aplicação em corte é classificado em grupos acordo com a tenacidade e resistência ao desgaste do material: ISO P (aços em geral); ISO M (aços inoxidáveis); ISO K (ferros fundidos); ISO N (materiais não ferrosos); ISO S (superligas e titânio); ISO H (materiais endurecidos) [Grote e Antonsson, 2009].

A maioria das ferramentas de corte de metal-duro são revestidas com nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN), óxido de alumínio (Al₂O₃) ou combinações químicas e físicas dessas substâncias. Os revestimentos são aplicados através das técnicas de CVD (deposição química de vapor) ou PVD (deposição física de vapor). São utilizadas para atingir longa vida da ferramenta a altas velocidades de corte. O metal-duro não é recomendado para materiais não ferrosos ou para materiais ferrosos com alto teor de níquel por causa do arredondamento da aresta de corte causado pela camada de revestimento. Cortes intermitentes requerem revestimentos de alta aderência, visto ao esforço no qual é submetido com as entradas e saídas da lâmina no material, que podem ser influenciados pelo controle do processo durante o revestimento [Grote e Antonsson, 2009].

Para este tipo de lâmina, utiliza-se revestimento de carbono tipo diamante DLC (*Diamond-Like Carbon*), que é comumente conhecido pelo seu baixo coeficiente de atrito e taxa de desgaste e, por mais, tem despertado interesse devido à diversidade de características quanto a sua dopagem. Quando se emprega um revestimento DLC num componente, este forma uma camada de transferência, melhorando o contato entre as superfícies, e desta forma aumenta o tempo de vida útil do equipamento através da diminuição do coeficiente de atrito entre as partes que interagem entre si [Ribeiro, 2012].

6.3 Parâmetros de Corte

6.3.1 Velocidade de rotação e velocidade de corte

A velocidade de rotação de uma serra circular deve seguir as recomendações do fabricante para a lâmina de serra específica. Todas as serras são projetadas para uso seguro em um número máximo de revoluções por unidade de tempo n que representa o número de voltas em um minuto.

Motores elétricos normalmente operam a 1725 ou 3450 rpm. Muitas máquinas operatrizes em serramento são de acionamento direto, ou seja, as lâminas de serra são acopladas diretamente ao eixo do motor (como é o caso das serras circulares manuais, serras de mesa e serras de braço radial), e esta será a velocidade de rotação que a lâmina irá operar. No entanto, existem algumas serras circulares que não são de acionamento direto e operam em velocidades diferentes. Algumas máquinas operatrizes, inclusive portáteis, podem chegar a 3000 e 6000 rpm [Hocheng, 2011].

Apesar de as serras serem classificadas pela sua velocidade de rotação, o corte do material não é, pois o número de voltas por minuto de uma serra não é um bom indicador da sua velocidade de corte, ou seja, da velocidade tangencial da lâmina.

A velocidade de corte v_c , em m/min, pode ser obtida de acordo com a Equação (6.3) [Kowaluk, 2012]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (6.3)$$

Ao imaginar a serra como uma roda, uma roda maior cobriria uma maior distância por revolução que uma roda menor. Então, por exemplo, um dente da serra circular 1 com diâmetro $D_1 = 100$ mm irá percorrer 314 mm em cada volta, enquanto que um dente da serra circular 2 com $D_2 = 120$ mm percorrerá 377 mm em cada volta. Considerando ambas as serras girando a uma mesma velocidade de rotação $n = 1725$ rpm, obtém-se que o dente de D_1 percorre cerca de 542 m em um minuto, enquanto o dente de D_2 percorre no mesmo tempo aproximadamente 650 m, ou seja, 20% a mais – justamente a diferença de tamanho diametral.

As lâminas de serra circular têm limitações quando à velocidade de rotação n e esse limite está intimamente ligado ao seu diâmetro D . Esse fator, ou seja, a quantidade de dentes que passa através do material em um determinado tempo é, na verdade, a variável importante para determinar se uma lâmina é apropriada para um determinado tipo de material, ou não. A distância que a lâmina gira em um minuto é chamada de “metros de superfície por minuto” (MSPM). Assim, pode-se quantificar a variável MSPM pela Equação (6.3). Se duas lâminas de serra têm igual MSPM pode-se esperar resultados semelhantes. Mesmo que o dente da lâmina de serra se desloque à velocidade v_c conforme Equação (6.3), o material não pode se mover a essa velocidade. Durante a maior parte do seu movimento, os dentes da serra não cortam o material, pois a cada passagem, a lâmina remove uma determinada quantidade de material enquanto corta [Circular Saw Blades, 2014].

6.3.2 Avanço e velocidade de avanço

A medida de quão rápido uma lâmina de serra circular atravessa o material é chamada de velocidade de avanço v_f , em mm/min (Eq. ((6.4)). A velocidade de avanço (v_f) depende de uma série de fatores. Alguns dos fatores, que não têm ligação com o projeto da serra em si, são a velocidade de rotação n do motor, a pressão aplicada para mover a serra através do material e a densidade do material cortado. Outros fatores estão ligados ao projeto da lâmina como o número de dentes e os ângulos de folga e saída dos dentes são os principais fatores que contribuem. Além disso, a profundidade de garganta e a espessura de corte também afetam v_f [Tschätsch, 2009].

$$v_f = f_z \cdot z_w \cdot n \quad (6.4)$$

onde f_z é o avanço por dente da serra, em mm/volta; z_w é o número de dentes da serra; e n é a velocidade de rotação da serra circular, em rpm.

De um modo geral, quanto maior o avanço por dente (f_z), menor o tempo de corte (t_c) e maior a produtividade, porém ao custo de um acabamento mais pobre, pois são geradas marcas mais pronunciadas da ferramenta no material. Com baixo avanço f_z , especialmente com uma lâmina de serra com grande número de dentes (mantendo-se v_f e n), tem-se um acabamento melhor com menos marcas dos dentes. No entanto, quanto menor for o avanço f_z , maior o tempo t_c , havendo a tendência de a lâmina aquecer [Circular Saw Blades, 2014].

6.3.3 Espessura e largura de corte

Normalmente, durante um processo de corte, o ângulo de posição (χ_r) entre a serra e o material cortado é de 90° . Dessa forma, para um material com espessura B , a profundidade de corte h [mm], equivale ao avanço por dente f_z , [mm/dente], e a largura do corte a_p [mm], corresponde a largura da serra b [mm], conforme Figura 6.6 [Tolpin, 2003].

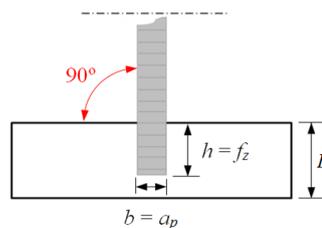


Figura 6.6 – Esquema representativo do ângulo entre a serra e o material, da profundidade de corte (h) e da largura de corte (b).

6.3.4 Tempo de corte

O tempo de corte t_c [min] é basicamente o tempo que a serra leva para percorrer uma determinada distância L_S [m] durante o processo de serramento da peça. Naturalmente, essa variável irá depender basicamente de L_S e da velocidade de avanço da lâmina v_f [mm/min].

O tempo de corte pode ser obtido conforme a Equação (6.5) [Tschätsch, 2009].

$$t_c = \frac{L_S}{v_f} = \frac{L_S}{f \cdot n} = \frac{L_S}{f_z \cdot Z_w \cdot n} \quad (6.5)$$

O comprimento total percorrido L_S pela serra durante o processo de corte pode ser obtido a partir da Equação (6.6) [Tschätsch, 2009].

$$L_S = l_w + \frac{D - \sqrt{D^2 - B^2}}{2} \quad (6.6)$$

onde l_w é a largura do material serrado no sentido do corte, em mm, e B é a espessura do material, em mm.

Os parâmetros largura do material serrado l_w , diâmetro da serra D , caminho total percorrido L_S e espessura do material B , necessários para a obtenção do tempo de corte t_c , estão representados na Figura 6.7 [Tschätsch, 2009].

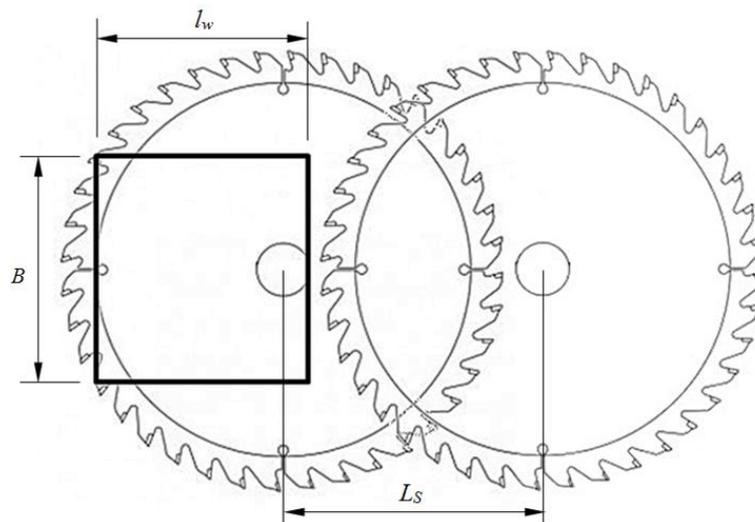


Figura 6.7 – Parâmetros para obtenção do tempo de corte [Adaptado de Tramontina, 2014].

Quanto maior a dureza do material trabalhado, maior deve ser tempo de corte. Há sempre a opção de escolher entre o tempo necessário para fazer o serramento e um corte limpo. Visto que alguns tipos de serra não têm controle de velocidade, um modo de reduzir v_c a fim de evitar superaquecimento, por exemplo, é a utilização de uma lâmina com menos dentes, caso os requisitos de acabamento não serem importantes [Circular Saw Blades, 2014].

6.3.5 Ângulo de pressão

O ângulo de pressão φ_s é formado pela serra quando está usinando o material em sua maior dimensão (Figura 6.8). Esse pode ser obtido através da Equação (6.7) [Tschätsch, 2009].

$$\text{sen}\left(\frac{\varphi_s}{2}\right) = \frac{B}{D} \quad (6.7)$$

onde B é a espessura do material cortado, em mm.

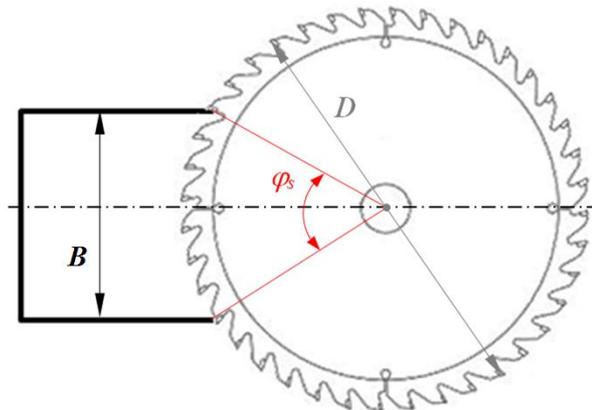


Figura 6.8 – Esquema representativo do ângulo de pressão, da espessura do material e do diâmetro da serra [Adaptado de Tramontina, 2014].

6.4 Corte de Polímeros

Para o corte de polímeros, o formato de dente é um fator importante. A lâmina de serra deve ter uma garganta profunda e arredondada. O ângulo de saída γ deve ser próximo de zero (ou ligeiramente negativo) e o ângulo de folga α próximo de 30° . Já o número de dentes por centímetro varia conforme o material serrado. Para o corte de materiais finos, uma quantidade inferior a 4 dentes/cm é necessária para materiais plásticos com espessura $B > 25$ mm. Para

essa espessura também é recomendado o uso de dentes distanciados (chamados de *skip-tooth*) que basicamente trata-se de deixar um espaço maior entre os dentes. Essa característica fornece maior espaço para o cavaco sair da zona de corte sem gerar problemas para o corte em si ou para a lâmina. Para espessuras menores, é necessário o uso de lâminas com dentes de precisão. A Tabela 6.1 fornece o número de dentes por centímetro e a velocidade de corte para vários materiais plásticos quanto serrados com serras circulares [Lokesnsgard, 2010].

Tabela 6.1 – Número de dentes por centímetro e velocidade de corte para vários polímeros [Lokesnsgard, 2010]

Material	Nº dentes/cm		v_c [m/min]
	$B < 6$ mm	$B > 6$ mm	
Acetato	4	3	2400
Acrílico	3	2	900
ABS	4	3	1200
Acetato de Celulose	4	3	900
Epoxi	6	4	900
Poliéster	6	4	1500
Poliétileno	6	4	2700
Polipropileno	6	4	2700
Poliestireno	4	3	600

Outra opção para o corte de plásticos é o uso de serras de fita. Apesar de as serras circulares apresentarem melhor acabamento e serem recomendadas para materiais de espessura $B < 19$ mm, para espessuras maiores pode haver problemas de superaquecimento. Portanto, para esses casos, as serras de fita passam a ser recomendadas devido ao comprimento da fita, ou seja, menor tempo de contato dos dentes da lâmina com o material fazendo com que não aqueça tanto se comparado com as circulares [Harper e Petrie, 2003].

7 METODOLOGIA

7.1 Corte de Anéis Bobinados

Para o corte dos anéis bobinados são utilizadas comumente serras circulares de aço-rápido (HSS) padrão DIN 1837 conforme ilustrado na Figura 7.1 em máquina automática que permite o ajuste dos principais parâmetros de corte como o avanço por dente (f_z) e a velocidade de rotação (n) da lâmina.



Figura 7.1 – Serra de HSS utilizado em corte de anéis bobinados.

O processo consiste basicamente da alimentação de material para o corte, ou seja, o posicionamento do anel bobinado para corte de um segmento cujo comprimento está ligado à capacitância desejada. Após posicionar o anel e garantir a fixação dele na posição de corte, a lâmina de serra atua com velocidade de rotação n e avanço f_z conforme programado. Para o item específico do estudo, o tempo de corte ajustado no processo é $t_c = 1,0$ s e a velocidade de rotação da serra é ajustada para $n = 2400$ rpm. Após, o segmento serrado tem sua capacitância verificada e é aplicada a tensão de autorregeneração a fim de isolar as zonas de baixa resistência de isolamento geradas na superfície de corte pelo processo de corte. O processo então se repete até o corte de todos os anéis bobinados do lote em questão.

7.2 O Produto Testado

Para o experimento, foi escolhido o capacitor com $3,3 \mu\text{F} / 63 \text{ V}$ devido à sua construção física, Figura 7.2. O item utiliza filme ultrafino de poliéster que, conforme

apresentado na **Seção 3.2**, oferece a aptidão de atingir alta capacitância em um volume bastante limitado. Por outro lado, esse tipo de filme apresenta resistência de isolamento típica de até dez vezes abaixo dos filmes de polipropileno (vide Tabela 3.1), por exemplo. Portanto, como se trata de um produto em que suas características dimensionais não podem ser alteradas, torna-se um item crítico no processo de corte dos anéis bobinados.



Figura 7.2 – Capacitor de filme B32529C0335K289 [Digi-key, 2014]

A qualidade do corte é determinada pela resistência de isolamento obtida após o processo de corte. Utilizando a capacitância nominal do produto ($3,3 \mu\text{F}$) e a constante de tempo de 1250 s, conforme definido na **Seção 4.2**, e substituindo os valores na Equação (4.5) obtém-se que o valor mínimo da resistência de isolamento que a peça deve ter é $0,378 \text{ G}\Omega$. Portanto, peças abaixo desse valor não podem ter sua resistência de isolamento aumentada pelo processo de autorregeneração. Essas peças ainda podem ser recuperadas nos processos posteriores, porém, neste trabalho, se está interessado na qualidade do processo de corte em si e é considerado, portanto, somente parâmetros mensurados no processo.

7.3 Metodologia do Experimento

O estudo tem o objetivo de realizar a otimização do processo (caso 4) ao buscar os parâmetros “ideais” do processo (velocidade de rotação da lâmina de serra e tempo de corte) assim como a identificação do tipo de dente de serra mais adequado para o corte de filme metalizado bobinado. Portanto, para o estudo, será desenvolvido o plano de experimentos para otimização dos parâmetros de maior influência ao processo de corte.

7.3.1 Fatores controláveis e não controláveis

Para o experimento, são conhecidos cinco fatores que não podem ser controlados e que causam ruído nos resultados obtidos para a resistência de isolamento do capacitor de filme.

1. *Condição ambiental.* A resistência de isolamento do capacitor aumenta com a temperatura e diminui à medida que aumenta a umidade relativa do ar.
2. *Tempo.* Quando o capacitor é submetido ao processo de corte, a resistência de isolamento diminui e volta a aumentar com o tempo.
3. *Diferença entre os anéis bobinados.* Como no processo de bobinagem uma determinada quantidade de anéis é empilhada, os internos são mais compactados que os externos, isto é, os anéis internos apresentam valores menores para a resistência de isolamento.
4. *Matéria prima.* Filmes metalizados de lotes diferentes podem apresentar diferentes comportamentos para a resistência de isolamento.
5. *Processo.* Diferentes máquinas e/ou operadores podem gerar resultados diferentes quanto à resistência de isolamento.

De modo a diminuir as influências causadas pela variação desses fatores, algumas precauções foram tomadas ao realizar os testes.

Foi bobinado um filme metalizado do mesmo lote. Todos os anéis bobinados tiveram o *spray* metálico aplicado na mesma máquina, assim como os demais processos até a etapa de serra. Também foram utilizados os mesmos operadores em cada etapa do processo para processar todo o lote. Como o lote foi fabricado em um mesmo dia, as condições ambientais podem ser consideradas as mesmas (fator determinante nos processos de bobinagem e corte). Desta forma diminui-se a influência no resultado por esses fatores, mas não os elimina. Para atenuar a diferença de pressão entre os anéis bobinados, são utilizados no experimento somente os mesmos anéis de cada roda, ou seja, os três anéis externos.

7.3.2 Plano de experimentos

Com o intuito de verificar o efeito nas propriedades elétricas do capacitor, foi desenvolvido um plano de experimentos considerando os três principais fatores envolvidos na etapa de corte dos elementos bobinados:

1. Tipo de serra: número de dentes (z_w), geometria dos dentes (curvo ou reto); espessura (b) e material da lâmina (HSS ou metal-duro – com ou sem cobertura de DLC);
2. Velocidade de rotação (n);
3. Tempo de corte (t_c).

O Fator 1 (tipo de serra) foi considerado, pois o desenvolvimento do trabalho é realizado baseado nas lâminas de HSS disponíveis na linha de produção da empresa Epcos do Brasil Ltda. As serras de metal-duro consistem em uma nova proposta a fim de melhorar as condições de corte. Todas as serras analisadas possuem o mesmo diâmetro $D = 100$ mm. Desta forma, os resultados obtidos por serras semelhantes que diferem em apenas uma característica (número de dentes, geometria dos dentes, espessura dos dentes ou material da lâmina) serão comparados quanto à resistência de isolamento (R_{iso}) das amostras serradas nas mesmas condições (tempo de corte e velocidade de rotação) assim como o aspecto visual da superfície usinada. As serras utilizadas no experimento estão descritas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Serras utilizadas no experimento.

Número da Serra	Número de dentes (z_w)	Geometria dos dentes	Espessura (b) [mm]	Material da lâmina	Revestimento
1	80	Reta	0,5	HSS	Não
2	80	Curva	1,0	HSS	Não
3	80	Curva	0,5	HSS	Não
4	160	Curva	0,5	HSS	Não
5	160	Reta	0,5	HSS	Não
6	160	Reta	0,5	Metal-duro	Não
7	160	Reta	0,5	Metal-duro	Filme DLC
8	180	Reta	0,5	Metal-duro	Não

Para a característica número de dentes (z_w), serão comparadas as Serras 3 e 4 (80 e 160 dentes respectivamente) Observação: apesar de as Serras 1 e 5 diferirem apenas quanto ao número de dentes (80 e 160 dentes respectivamente), os parâmetros de corte utilizados nos experimentos com essas lâminas não são os mesmos, invalidando a comparação.

Quanto à geometria dos dentes, serão comparados os desempenhos das Serras 1 e 3 (dentes retos e curvos, respectivamente) e das Serras 4 e 5 (dentes curvos e retos, respectivamente). As Serras 4 e 5 diferem das Serras 1 e 3 apenas no número de dentes (160 e 80 dentes, respectivamente).

A influência da espessura será comparada pela avaliação comparativa entre as Serras 2 e 3 ($b = 1,0$ mm e $0,5$ mm, respectivamente).

O material da lâmina será avaliado comparando os resultados das Serras 5 e 6 (HSS e metal-duro, respectivamente). Já o revestimento pode ser comparado através do desempenho das Serras 6 (sem revestimento) e 7 (com revestimento).

As serras utilizadas nos experimentos estão apresentadas na Figura 7.3.

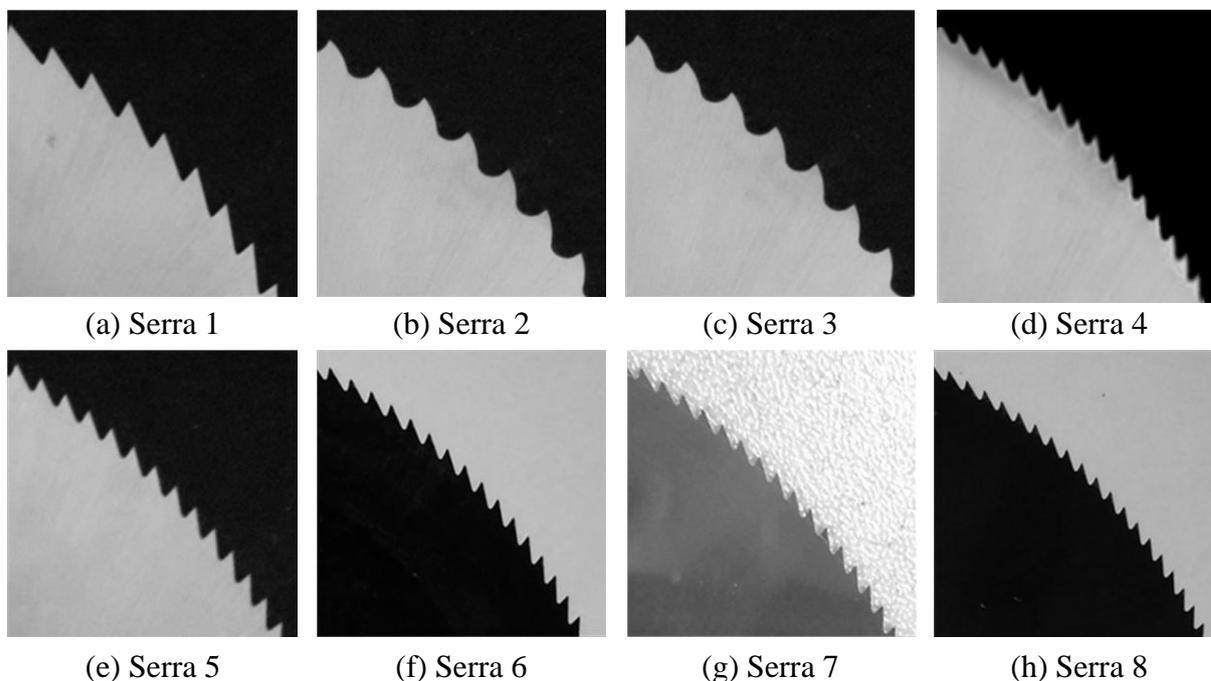


Figura 7.3 – Lâminas de serra circular utilizadas nos experimentos.

O Fator 1 (tipo de serra) foi definido em oito níveis, ou seja, oito modelos de serra. Todos os modelos das lâminas de corte têm o mesmo diâmetro (100 mm) devido às limitações físicas de montagem da serra circular na máquina de corte. Todas as serras tomadas estão padronizadas conforme a norma DIN 1837.

Para o Fator 2 (velocidade de rotação n), consideram-se dois níveis. O parâmetro intermediário é conforme o utilizado no processo produtivo; o valor inferior é o mínimo permitido para programação do inversor de frequência da máquina de corte e, desta forma, simetricamente a este valor, é determinado o valor superior. Os valores inferior e superior são definidos conforme indicado na Tabela 7.2.

O Fator 3 (tempo de corte t_c), assim como o fator velocidade de rotação, também é considerado em dois níveis. Os níveis superior e inferior são determinados de forma simétrica ao parâmetro utilizado na linha de produção. Portanto, os valores inferior e superior são definidos conforme indicado na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Rotações e tempos de corte e avaliados.

Fatores	Inferior	Superior
Velocidade de rotação (n) [rpm]	1200 rpm	3600 rpm
Tempo de corte (t_c) [s]	1,0 s	2,0 s

Está indicado na Tabela 7.3 o plano de experimentos realizado a fim de determinar a influência dos três fatores considerados.

Tabela 7.3 – Plano de experimentos.

Experimento	Tipo de Serra	Vel. rotação [rpm]	Tempo de corte [s]
1	1	1200	1
2	1	3600	2
3	2	1200	1
4	2	3600	2
5	3	1200	1
6	3	3600	2
7	4	1200	1
8	4	3600	2
9	5	3600	1
10	5	1200	2
11	6	3600	1
12	6	1200	2
13	7	3600	1
14	7	1200	2
15	8	3600	1
16	8	1200	2

Para cada experimento foram coletadas 100 amostras (total de 1600 peças para os 16 experimentos) que são submetidas ao teste de resistência de isolamento (R_{iso}) utilizando um megaohmímetro Hioki DSM-8104 (Figura 7.4). O instrumento possibilita uma faixa de medição de 1×10^{-2} a 3×10^7 G Ω , e possui capacidade de isolamento com alta velocidade e alta precisão. Para os experimentos, o DSM-8104 foi configurado para um tempo de medição de 20 s aplicando 50 V à peça. Os valores obtidos foram registrados e aqueles abaixo de 0,378 G Ω foram contabilizados, pois se considera que a peça não é mais capaz de autorregenerar devido aos danos severos causados.



Figura 7.4 – Megaohmímetro Hioki DSM-8104

Para cada experimento, todas as amostras aprovadas e reprovadas no teste de resistência de isolamento foram analisadas em microscópio quanto às marcas geradas pelo corte a fim de poder identificar certas características visuais de um corte considerado bom e de um corte considerado ruim. De forma complementar, as lâminas de serra foram avaliadas visualmente após a obtenção das amostras a fim de identificar falhas de adesão de material à superfície da serra ou quanto à adesão de material nos dentes da lâmina.

8 RESULTADOS

Os ensaios foram realizados na linha de produção da empresa Epcos do Brasil Ltda. Os 16 experimentos realizados geraram os resultados indicados na Tabela 8.1, em que a média (\bar{R}_{iso}), o desvio-padrão (s) das 100 amostras obtidas e o número de peças abaixo de 0,378 G Ω (NP) são mostrados.

Tabela 8.1 – Resultado do experimento.

Exp.	Serra	Fator 1				Fator 2	Fator 3	R_{iso}		< 0,378 G Ω
		z_w	Dente	h [mm]	Material	n [rpm]	t_c [s]	\bar{R}_{iso} [G Ω]	s [G Ω]	NP
1	1	80	Reto	0,5	HSS	1200	1	1,76	1,42	16
2	1	80	Reto	0,5	HSS	3600	2	2,13	0,64	5
3	2	80	Curvo	1,0	HSS	1200	1	2,38	1,25	8
4	2	80	Curvo	1,0	HSS	3600	2	1,75	0,89	13
5	3	80	Curvo	0,5	HSS	1200	1	1,85	1,34	16
6	3	80	Curvo	0,5	HSS	3600	2	2,00	0,51	4
7	4	160	Curvo	0,5	HSS	1200	1	2,05	0,87	9
8	4	160	Curvo	0,5	HSS	3600	2	1,81	0,66	4
9	5	160	Reto	0,5	HSS	3600	1	1,86	0,75	10
10	5	160	Reto	0,5	HSS	1200	2	1,56	0,88	10
11	6	160	Reto	0,5	MD	3600	1	2,01	0,80	7
12	6	160	Reto	0,5	MD	1200	2	0,94	1,22	43
13	7	160	Reto	0,5	MD/DLC	3600	1	2,74	1,40	6
14	7	160	Reto	0,5	MD/DLC	1200	2	2,11	0,45	3
15	8	180	Reto	0,5	MD	3600	1	1,41	0,78	14
16	8	180	Reto	0,5	MD	1200	2	1,93	0,58	6

Os resultados obtidos e indicados na Tabela 8.1 podem ser vistos em forma de gráfico conforme Figura 8.1. De acordo com os resultados obtidos, a lâmina de melhor desempenho, ou seja, a que influencia de forma a manter a resistência de isolamento do filme metalizado em um nível mais alto é a Serra 7 (160 dentes retos de metal-duro com revestimento). Com desempenho um pouco inferior, seguem as Serras 1, 2 e 3 (80 dentes curvos de aço-rápido) e, com o pior resultado, a Serra 6 (160 dentes retos de metal-duro sem revestimento).

De acordo com a Figura 8.2, o resultado é semelhante, considerando o número de peças geradas abaixo de 0,378 G Ω . A Serra 6 (160 dentes de metal-duro sem revestimento) apresentou o pior resultado dentre as lâminas testadas (25 peças em média).

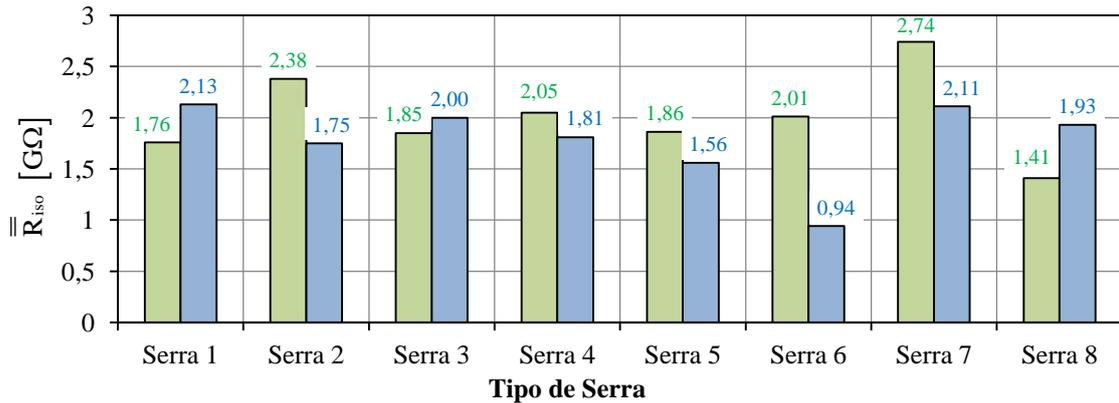


Figura 8.1 – Resultado quanto à resistência de isolamento para o fator tipo de serra.

Ainda conforme a Figura 8.2, a Serra 7 apresentou o melhor resultado médio ($\overline{NP} = 4,5$ peças), seguido pela Serra 4 ($\overline{NP} = 6,5$ peças). As demais lâminas de serra mantiveram aproximadamente a mesma quantidade de peças com baixa resistência de isolamento (cerca de 10 peças em média).

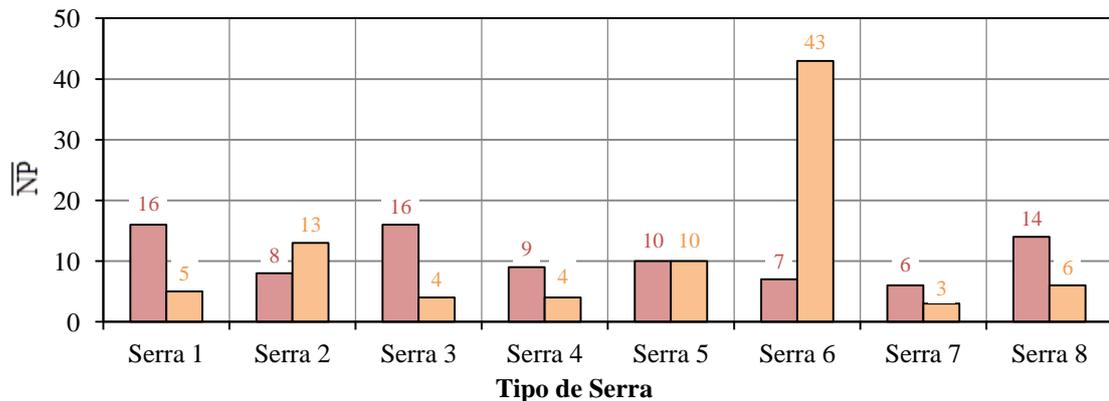


Figura 8.2 – Resultado quanto a NP com 0,378 GΩ para o fator tipo de serra.

Utilizando $n_2 = 3600$ rpm obteve-se um resultado ligeiramente melhor em relação à $n_1 = 1200$ rpm. Para n_1 obteve-se a média das médias da resistência $\overline{\overline{R}}_{iso} = 1,82$ GΩ e, para n_2 , $\overline{\overline{R}}_{iso} = 1,96$ GΩ (Figura 8.3a).

Entretanto, o resultado é bastante significativo ao analisar a influência da velocidade de rotação da lâmina de serra em relação à quantidade de peças com resistência de isolamento $R_{iso} < 0,378$ GΩ (Figura 8.3b). Para $n_1 = 1200$ rpm, obteve-se em média $\overline{NP} = 13,87$ peças com R_{iso} insuficiente e para $n_2 = 3600$ rpm a média cai para $\overline{NP} = 7,87$ peças. Portanto, rotações mais altas tendem a aumentar a média das peças aceitáveis quanto à R_{iso} .

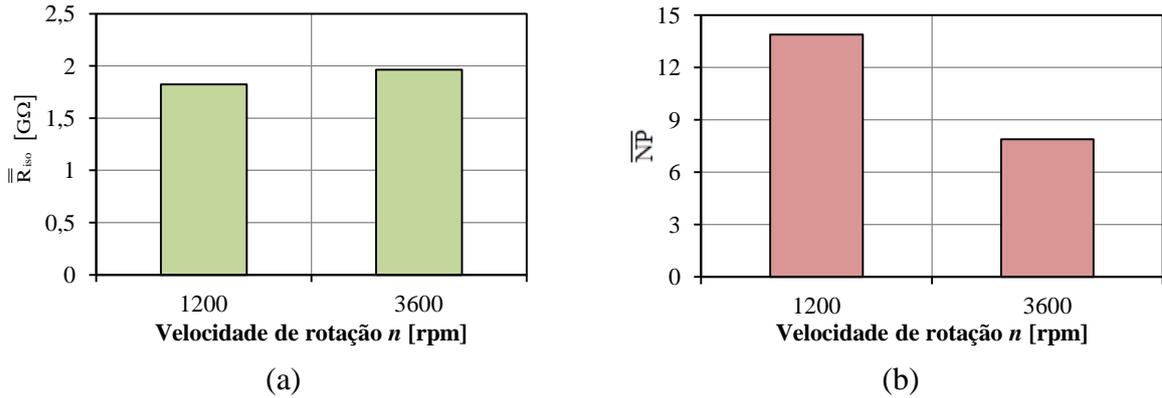


Figura 8.3 – Influência do fator velocidade de rotação: (a) quanto à média da R_{iso} ; (b) quanto à NP com $R_{iso} < 0,378 G\Omega$

Já para o tempo de corte t_c , conforme indicado na Figura 8.4a, obteve-se um resultado ligeiramente melhor para um menor tempo de corte, ou seja, para uma maior velocidade de avanço v_f (Eq. (6.5)). Isto resultou em uma média das médias da resistência de isolamento $\overline{R}_{iso} = 2,01 G\Omega$ para $t_{c1} = 1$ s e $\overline{R}_{iso} = 1,78 G\Omega$ para $t_{c2} = 2$ s.

Analisando t_c , porém em relação ao número de peças geradas abaixo de $0,378 G\Omega$, o resultado indica pouquíssima influência do parâmetro (Figura 8.4b). Para o tempo $t_{c1} = 1$ s, $\overline{NP} = 10,8$ peças em média apresentam baixa resistência de isolamento enquanto que, para tempos de máquina de 2 s, a média sobe para $\overline{NP} = 11$ peças.

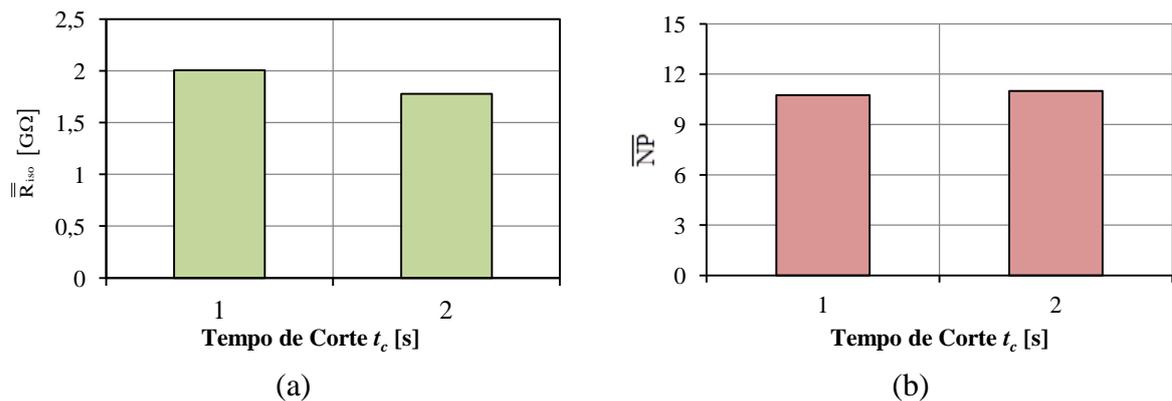


Figura 8.4 – Influência do fator tempo de corte: (a) quanto à média da R_{iso} ; (b) quanto à NP com $R_{iso} < 0,378 G\Omega$.

Considerando o efeito do tempo de corte sobre o processo, constata-se que uma velocidade de avanço maior (gera um tempo de corte menor) pode ser utilizada para uma maior produtividade sem afetar significativamente a qualidade do corte gerado.

8.1 Influência das Características das Serras nos Experimentos

Foram analisadas as influências das oito serras no corte do filme metalizado ultrafino através dos 16 experimentos realizados de acordo com os dados da Tabela 8.1.

8.1.1 Serra 1 – Experimentos 1 e 2

Histograma da resistência de isolamento

Serrando 100 amostras com a Serra 1 ($z_w = 80$ dentes retos de HSS e $h = 0,5$ mm) com velocidade de rotação $n_1 = 1200$ rpm e tempo de corte $t_{c1} = 1,0$ s obteve-se para a resistência de isolamento (R_{iso}) uma média amostral $\bar{R}_{iso} = 1,76$ G Ω com desvio-padrão $s = 1,42$ G Ω para o experimento 1. Um número $NP = 16$ peças das 100 amostras produzidas apresentaram resistência de isolamento abaixo de $0,378$ G Ω indicando um desempenho incapaz do processo de corte nessas condições. O histograma da distribuição da R_{iso} (Figura 8.5a) indica que, apesar de algumas peças atingirem valores próximos a $5,0$ G Ω , a maior parte das amostras apresentou valor abaixo de $1,0$ G Ω .

Porém, ao se utilizar a Serra 1 no experimento 2 com uma maior velocidade de rotação ($n_2 = 3600$ rpm) e menor velocidade de avanço (tempo de corte $t_{c2} = 2,0$ s), o resultado foi melhor. Nessa condição, a média amostral de R_{iso} aumentou para $\bar{R}_{iso} = 2,13$ G Ω com desvio-padrão $s = 0,64$ G Ω . Isso fez com que apenas $NP = 5$ peças apresentassem resistência de isolamento abaixo de $0,378$ G Ω . Assim, o histograma da distribuição da resistência de isolamento da Figura 8.5b. mostra a distribuição da maior parte das amostras próxima de $2,4$ G Ω , o que definiu o baixo desvio-padrão encontrado, assim como o NP pequeno.

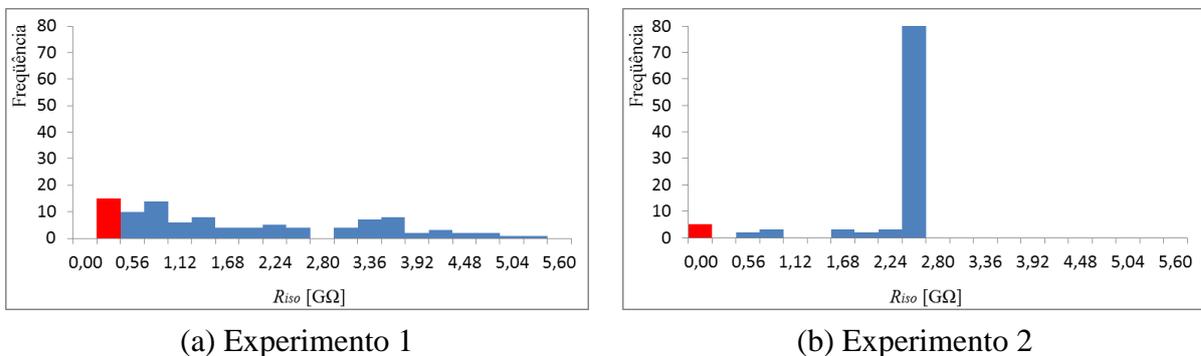


Figura 8.5 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 1 e 2.

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378 \text{ G}\Omega$

No caso do experimento 1, a aparência da superfície da peça cortada resultando alta resistência de isolamento apresentou áreas escuras (detalhe na Figura 8.6a), indicando danos no filme metalizado. Já a aparência da superfície da peça cortada no experimento 2 tornou-se mais clara, apesar de ainda apresentar pequenas áreas escuras (Figura 8.6b). O corte com menor velocidade de rotação e maior tempo de corte (experimento 1) gerou estrias mais espaçadas se comparado com o corte obtido no experimento 2, indicando maior volume de material removido por dente da lâmina de serra.

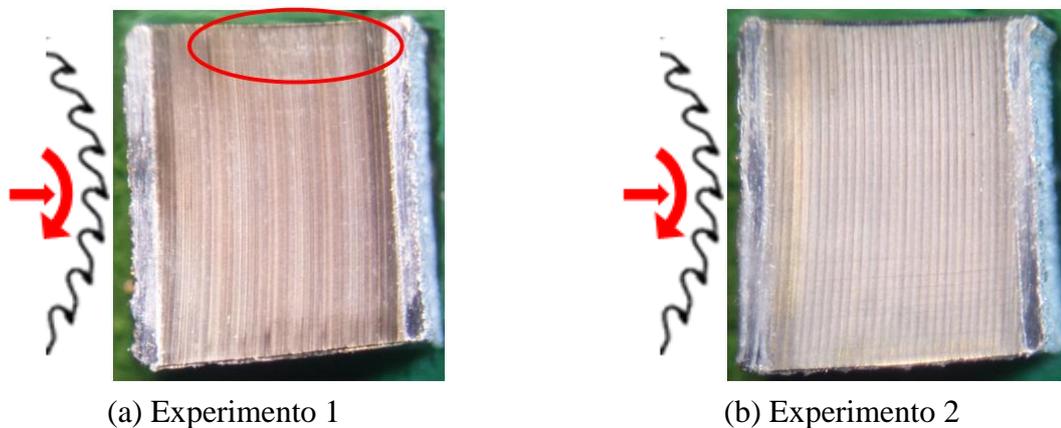


Figura 8.6 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 1 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$

Conforme apresentado na **Subseção 6.3.2** (avanço e velocidade de avanço), há relação entre o aumento da velocidade de avanço por dente f_z (menor tempo de corte) com a qualidade mais grosseira do acabamento superficial gerado devido às marcas deixadas pela ferramenta.

Adicionalmente, com menor velocidade de rotação e maior velocidade de avanço (menor tempo de corte), um maior volume de material é removido por dente fazendo com que esse material acumulado entre em atrito com a superfície de corte ao deixar a garganta do dente pela sua lateral causando danos. Devido à variação intrínseca ao processo (modo de fixação da peça durante o corte, vibração da lâmina, volume de material entre os dentes da serra, dentre outros), quando a peça sofre um dano em maior nível, conforme exemplo da Figura 8.7a, a resistência de isolamento atinge nível abaixo do estipulado como valor mínimo admissível ($0,378 \text{ G}\Omega$).

Conforme pode ser visto na Figura 8.7b, o modo de falha das peças do experimento 2 é semelhante ao do experimento 1 quanto aos danos gerados no corte, no entanto, em menor escala, fazendo com que uma menor quantidade de peças tenha a resistência de isolamento afetada. Por outro lado, as condições de corte não geram zonas escuras na superfície de corte, ou seja, apesar do aumento da velocidade de avanço, o aumento da velocidade de rotação da lâmina teve maior influência.

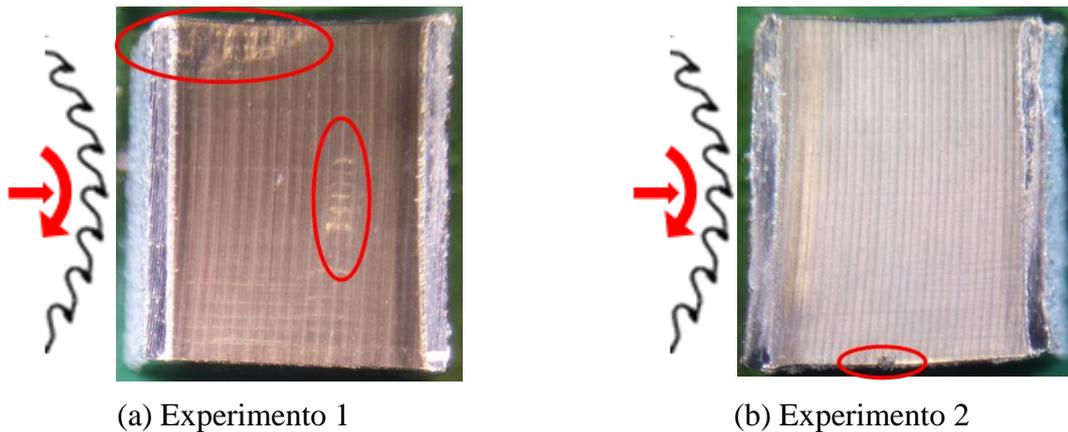


Figura 8.7 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 1 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

Aspecto da superfície lateral da serra

A região mais escura da lâmina refere-se ao filme metalizado aderido à lateral da serra (abaixo da região dos dentes) para o experimento 1, conforme mostra na Figura 8.8a. Já os pontos claros indicados pela seta estão associados ao atrito entre o alumínio da camada de *spray* metálico aderido na lateral do dente da lâmina. Esse material acumulado na lâmina de serra (filme metalizado e partículas de alumínio) geram danos à peça ao atritar com a superfície de corte durante o processo de serramento, o que afeta a R_{iso} da peça.

Com a diminuição do volume de material removido por dente (aumento da velocidade de rotação e do tempo de corte), o material não é conduzido em grande quantidade pela lateral do dente da serra no experimento 2, fato que auxilia a não aderência do filme metalizado na lateral do corpo da serra (Figura 8.8b) como ocorreu no experimento 1.

Esse resultado confirma o encontrado no histograma das peças geradas no experimento 2 (Figura 8.5b), onde as boas estão bastante concentradas em um valor específico (2,4 G Ω) e aquelas com um dano ligeiramente maior apresentam valores próximos de 0,8 G Ω ou até mesmo em curto circuito (considerado 0 G Ω).

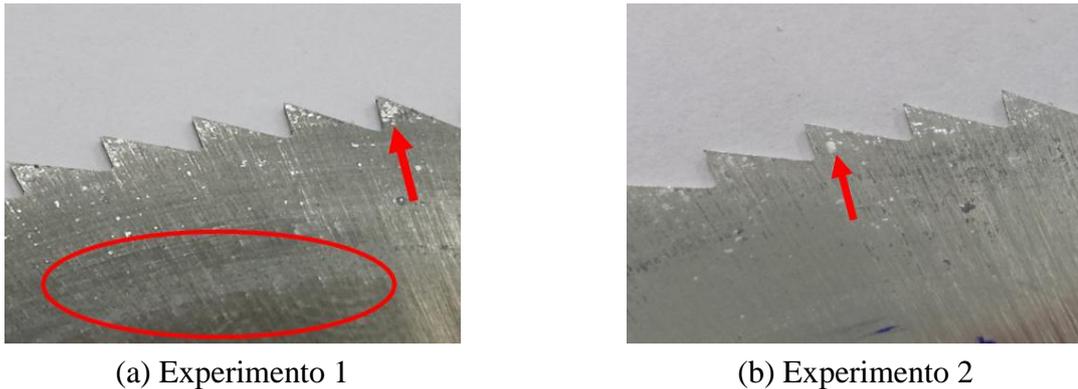


Figura 8.8 – Serra 1 após os experimentos 1 e 2 (imagens ampliadas 3x).

8.1.2 Serra 2 – Experimentos 3 e 4

Histograma da resistência de isolamento

Cortando-se 100 amostras com a Serra 2 para o tempo de corte $t_{c1} = 1,0$ s e velocidade de rotação $n_1 = 1200$ rpm obteve-se para o experimento 3 uma média amostral $\bar{R}_{iso} = 2,38$ G Ω com desvio-padrão $s = 1,25$ G Ω para a resistência de isolamento (R_{iso}). Assim como no experimento 1, não houve concentração de amostras quanto à R_{iso} em um valor específico, caracterizando-se o alto desvio-padrão obtido (Figura 8.9a).

Um total de $NP = 8$ peças das 100 amostras produzidas apresentam $R_{iso} < 0,378$ G Ω . Com o aumento do tempo de corte para $t_{c2} = 2,0$ s e da velocidade de rotação da lâmina para $n_2 = 3600$ rpm, o resultado para o experimento 4 foi pouco influenciado, apresentando uma baixa na média amostral para $\bar{R}_{iso} = 1,75$ G Ω com desvio-padrão de $s = 0,89$ G Ω . Apesar de uma maior concentração de valores próximos de 2,4 G Ω , muitas peças foram geradas em curto circuito conforme mostra a Figura 8.9b. O número de peças abaixo de 0,378 G Ω assim aumentou para $NP = 13$ peças conforme esperado devido à redução na média amostral.

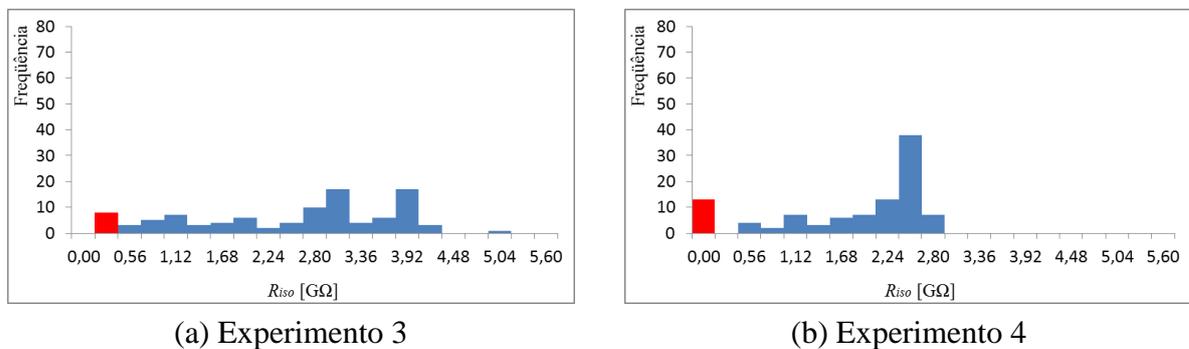


Figura 8.9 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 3 e 4.

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378 \text{ G}\Omega$

Conforme indicado na Figura 8.10a, o resultado para o experimento 3 é semelhante ao obtido no experimento 1, onde a aparência da superfície de corte apresenta áreas escuras indicando danos no filme metalizado. Por outro lado, a distribuição das marcas na superfície usinada se dá como riscos escuros ao longo do sentido de corte da ferramenta.

Para as peças com elevado nível de resistência de isolamento, a aparência do corte resultante do experimento 4 (Figura 8.10b) é semelhante ao do experimento 2, onde as diferenças entre as Serras 1 e 2 estão apenas no formato de dente e na espessura da lâmina.

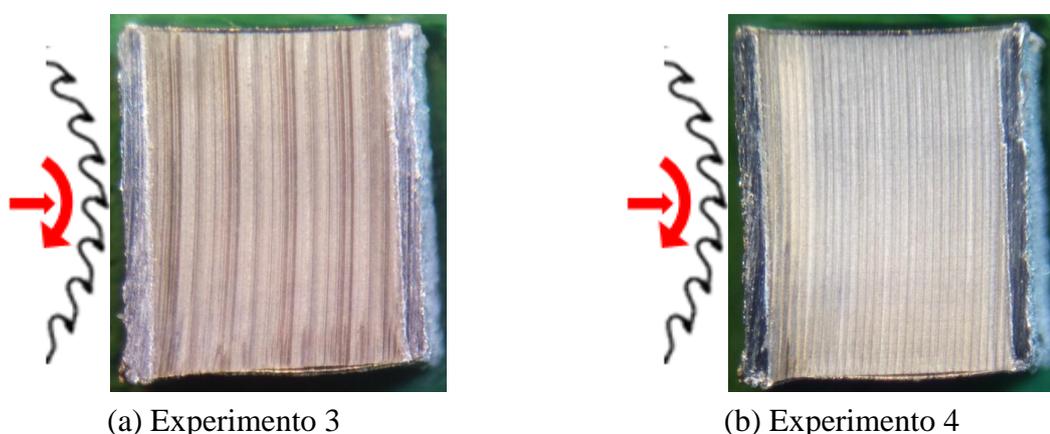


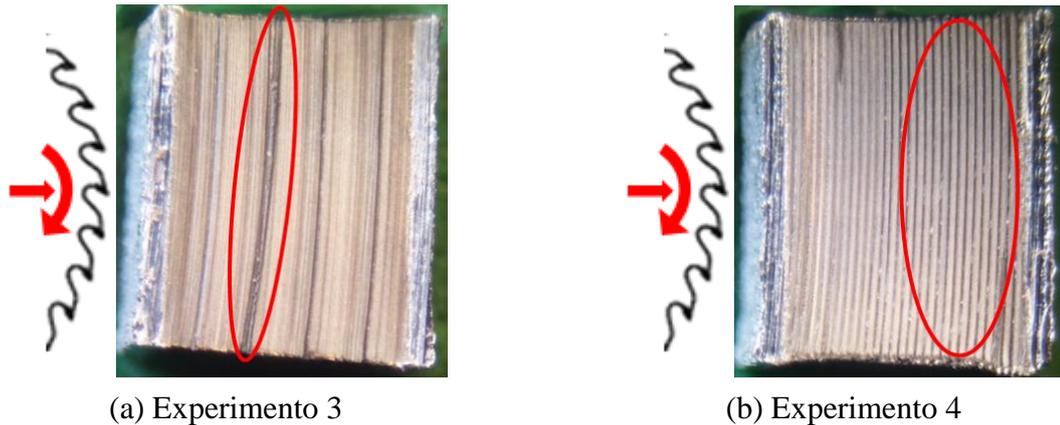
Figura 8.10 – Exemplo de amostras geradas pela Serra 2 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$

O dano na superfície usinada, representado pelo surgimento de riscos escuros (Figura 8.11), indica o baixo nível da resistência de isolamento e, portanto, conforme observado nos experimentos anteriores com este modo de falha, explica a dispersão indicada nos histogramas da Figura 8.9, em maior nível para o experimento 13 devido à profundidade dos riscos.

Aspecto da superfície lateral da serra

Da mesma forma que no experimento 1, há material acumulado na superfície lateral do dente da serra para o experimento 3 (Figura 8.12a), não em pequenos pontos, mas por toda a superfície. Por causa disso, conforme o nível de intensificação dos danos gerados, fissuras surgem ao longo da aresta de corte, dificultando o serramento e afetando a resistência de isolamento, o que explica a dispersão dos dados apresentados no histograma da Figura 8.9a.



(a) Experimento 3

(b) Experimento 4

Figura 8.11 – Exemplo de amostras geradas pela Serra 2 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

Para a lâmina nas condições do experimento 4, o dano na peça se dá devido às fissuras na aresta de corte (assim como obtido no experimento 3). Além disso, devido ao padrão de falha apresentado, o nível dos riscos está associado ao acúmulo de material na aresta de corte da ferramenta (Figura 8.12b) e o arraste desse material na superfície lateral da serra comprometendo a qualidade do corte.



(a) Experimento 3

(b) Experimento 4

Figura 8.12 – Serra 2 após os experimentos 3 e 4 (imagens ampliadas 3x).

8.1.3 Serra 3 – Experimentos 5 e 6

Histograma da resistência de isolamento

Com tempo de corte de $t_{cl} = 1,0$ s e velocidade de rotação de $n_l = 1200$ rpm obteve-se para o experimento 5 média amostral de $\bar{R}_{iso} = 1,85$ G Ω com desvio-padrão de $s = 1,34$ G Ω para a resistência de isolamento (histograma na Figura 8.13a). Apesar do alto valor médio quanto à resistência de isolamento, houve um total de $NP = 16$ peças abaixo de 0,378 G Ω .

Aumentando o tempo de corte para $t_{c2} = 2,0$ s e da velocidade de rotação da lâmina para $n_2 = 3600$ rpm o resultado do experimento 6 foi pouco influenciado quanto à média amostral, $\bar{R}_{iso} = 2,00$ G Ω , porém houve uma redução do desvio-padrão, $s = 0,51$ G Ω conforme pode ser verificado no histograma da Figura 8.13b que, diferentemente da distribuição do experimento 5, houve uma concentração maior dos valores obtidos. O número de peças abaixo de $0,378$ G Ω também apresentou uma redução considerável ($NP = 4$).

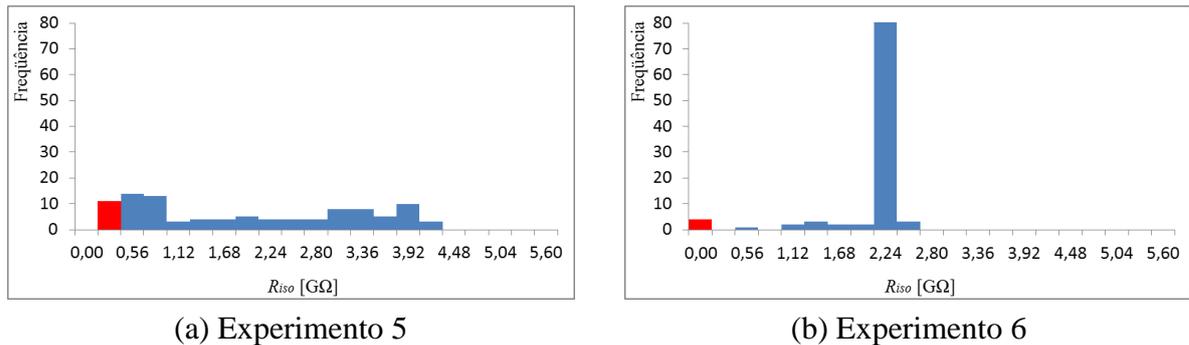


Figura 8.13 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 5 e 6.

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378$ G Ω

Semelhante aos experimentos anteriores, para $t_{c1} = 1,0$ s e $n_1 = 1200$ rpm, a aparência do corte gerado pelo experimento 5 apresentou pequenas áreas escuras devido ao aumento de temperatura no acúmulo de material na lateral do dente da serra, conforme Figura 8.14a.

De acordo com a Figura 8.14b, a aparência do corte para o experimento 6 apresenta menos áreas escuras nas peças consideradas boas em relação ao experimento 5.

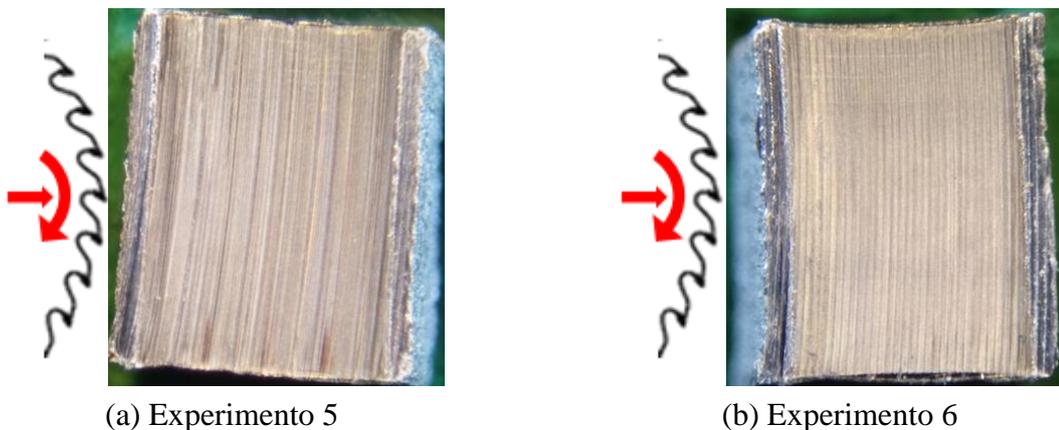


Figura 8.14 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 3 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$

Semelhante ao obtido no experimento 3 (mesma serra, porém com b maior), o resultado se repete de forma menos grosseira no experimento 5, ou seja, com riscos ao longo do corte proveniente do atrito entre partículas aderidas à lateral do dente da lâmina de serra e a superfície usinada (Figura 8.15a), o que afeta a resistência de isolamento das peças cortadas.

Já para as peças com baixa resistência de isolamento obtidas no experimento 6 (Figura 8.15b) o modo de falha é ligeiramente diferente dos experimentos anteriores (riscos escuros ao longo da trajetória da aresta de corte) na qual apresenta área escura na parte superior da peça (entrada da serra) e áreas escuras de filme metalizado depositado (pequenas áreas escuras em pontos específicos).

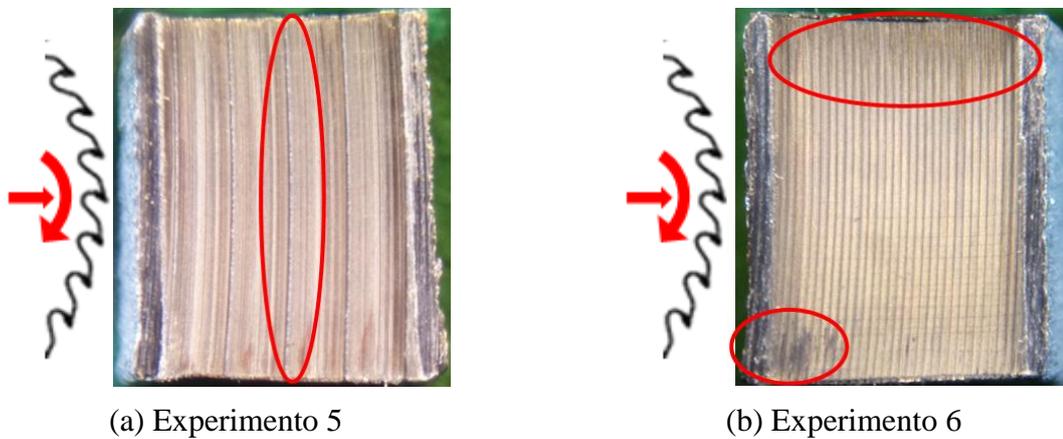
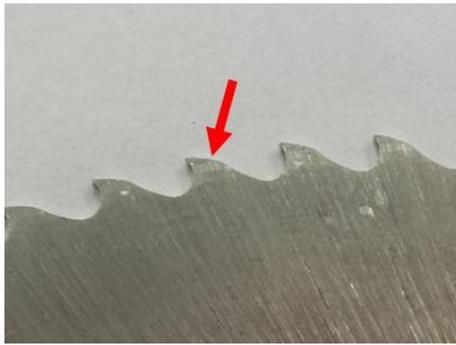


Figura 8.15 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 3 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

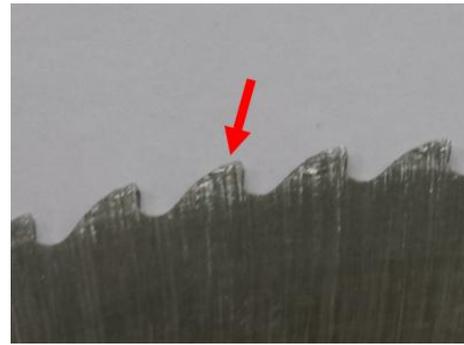
Aspecto da superfície lateral da serra

Ao final do experimento 5, a aparência da lâmina é semelhante aos experimentos anteriores, com alumínio aderido à lateral do dente conforme mostrado na Figura 8.16a.

Semelhante aos casos anteriores, a Serra 3 apresentou adesão de alumínio na lateral do dente após o experimento 6 (Figura 8.16b), o que pode ter ocasionado o aparecimento das áreas escuras na superfície de corte da amostra com baixa resistência de isolamento (Figura 8.15b).



(a) Experimento 5



(b) Experimento 6

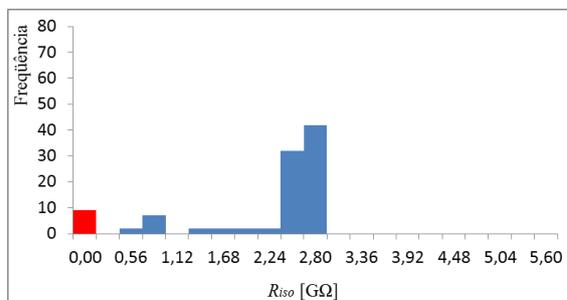
Figura 8.16 – Serra 3 após os experimentos 5 e 6 (imagens ampliadas 3x).

8.1.4 Serra 4 – Experimentos 7 e 8

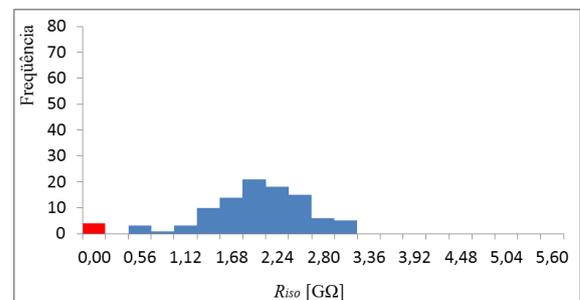
Histograma da resistência de isolamento

A Serra 4 com tempo de corte de $t_{c1} = 1,0$ s e velocidade de rotação de $n_1 = 1200$ rpm (experimento 7) gerou amostras com média de $\bar{R}_{iso} = 2,05$ G Ω e desvio-padrão de $s = 0,87$ G Ω para a resistência de isolamento (R_{iso}). Nesse caso foram geradas $NP = 9$ peças com R_{iso} abaixo de $0,378$ G Ω (histograma da distribuição na Figura 8.17a).

Com o aumento das variáveis tempo de corte e velocidade de rotação para $t_{c2} = 2,0$ s e $n_2 = 3600$ rpm, respectivamente, a média da resistência de isolamento diminuiu ligeiramente para $\bar{R}_{iso} = 1,81$ G Ω com desvio-padrão de $s = 0,66$ G Ω no experimento 8. Apesar da diminuição não ser considerável, poucas peças foram geradas com $R_{iso} < 0,378$ G Ω ($NP = 4$). Apesar de resultados semelhantes, nota-se uma distribuição mais concentrada no experimento 7 (Figura 8.17a), com apenas algumas amostras com baixa resistência de isolamento e, ao contrário desse, aumentando-se t_c e n , a distribuição torna-se menos concentrada, ou seja, o processo torna-se instável (Figura 8.17b).



(a) Experimento 7



(b) Experimento 8

Figura 8.17 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 5 e 6.

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378 \text{ G}\Omega$

A superfície usinada das peças apresentaram riscos escuros ao longo da trajetória da aresta de corte para as peças com alta resistência de isolamento; porém, não profundos como nos experimentos precedentes. Como a Serra 4 tem o dobro de dentes das lâminas utilizadas anteriormente, o menor volume de material removido por dente sugere menor quantidade de material conduzido pela lateral do dente a cada passe. Por outro lado, o dente da serra fica obstruído mais facilmente, causando acúmulo de material ao longo do processo e gerando falhas de corte conforme mostra a Figura 8.18a. Ao analisar a superfície escura gerada na usinagem com a Serra 4 para o experimento 8 (Figura 8.18b), é possível deduzir que houve um maior aquecimento na região de corte em comparação ao experimento 7.

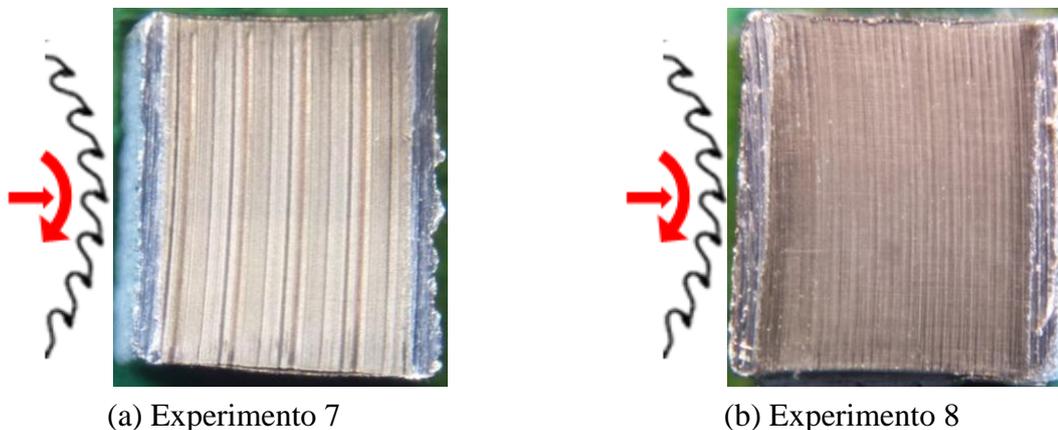


Figura 8.18 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 4 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$

Utilizando a Serra 4 (160 dentes curvos de HSS) a um tempo de corte de $t_{c1} = 1,0 \text{ s}$ e a uma velocidade de rotação de $n_1 = 1200 \text{ rpm}$ (experimento 7), a aparência do corte foi melhor (Figura 8.19a) se comparada com a peça obtida com tempo de corte $t_{c2} = 2,0 \text{ s}$ e velocidade de rotação $n_2 = 3600 \text{ rpm}$ e (experimento 8), Figura 8.19b. Assim, o resultado com a Serra 4 foi contrário ao obtido para as Serras 1, 2 e 3 ($z_{w1} = 80$ dentes).

Conforme apresenta a Figura 8.19, as peças com baixa resistência de isolamento apresentaram boas condições de corte no início do processo, ou seja, no lado esquerdo da peça; entretanto, os dentes da lâmina de serra acumularam cavaco fazendo com que o excesso de material acabasse aderindo à superfície usinada da peça.

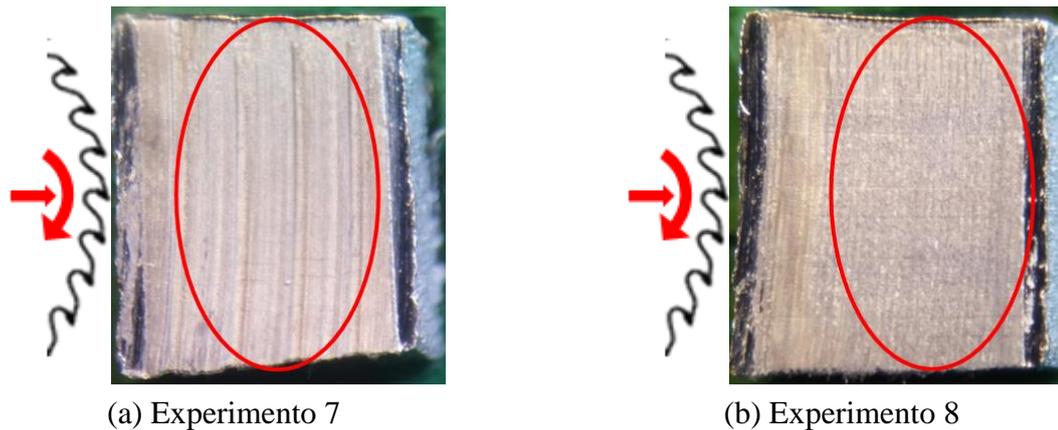


Figura 8.19 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 4 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

Aspecto da superfície lateral da serra

Diferente das lâminas com $z_{wl} = 80$ dentes, não houve adesão de alumínio na superfície lateral do dente; entretanto, houve adesão na lateral logo abaixo dos dentes devido à pequena garganta. A Serra 4 ($z_{w2} = 160$ dentes), após o experimento 7, apresentou acúmulo de material (Figura 8.20a) conforme exposto na **Seção 6.1.4** (Geometria dos Dentes), em que se relaciona um maior número de dentes com a incapacidade de expulsar o cavaco gerado, fazendo com que o material entre em atrito com a lâmina causando a adesão.

Através do aumento da velocidade de rotação e do tempo de corte para a Serra 4 (experimento 8), a quantidade de material aderido foi muito maior, Figura 8.20b. Por consequência, o filme metalizado foi arrastado ao longo da seção de corte, refletindo na aparência da peça (Figura 8.19b).

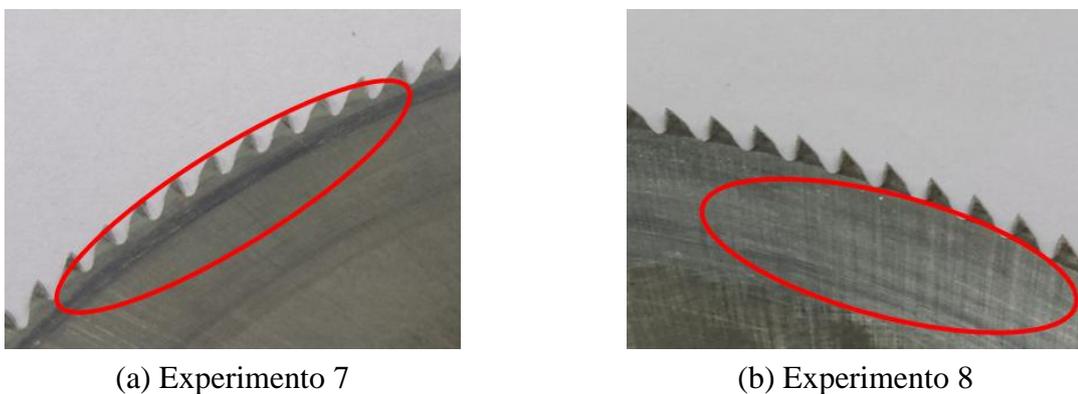


Figura 8.20 – Serra 4 após os experimentos 7 e 8 (imagens ampliadas 3x).

8.1.5 Serra 5 – Experimentos 9 e 10

Histograma da resistência de isolamento

Ao cortar 100 amostras com a Serra 5 aplicando o tempo de corte de $t_{c1} = 1,0$ s e a velocidade de rotação de $n_2 = 3600$ rpm obteve-se para o experimento 9 uma média amostral de $\bar{R}_{iso} = 1,86$ G Ω com desvio-padrão de $s = 0,75$ G Ω para a resistência de isolamento. Um total de $NP = 10$ peças das amostras produzidas apresentaram valor abaixo de $0,378$ G Ω .

Os resultados foram piores para o experimento 10 com o aumento do tempo de corte para $t_{c2} = 2,0$ s e com a redução da velocidade de rotação da lâmina para $n_1 = 1200$ rpm. Nesta condição a média amostral diminuiu para $\bar{R}_{iso} = 1,56$ G Ω com desvio-padrão de $s = 0,88$ G Ω . Neste caso, $NP = 10$ peças apresentam resistência de isolamento abaixo de $0,378$ G Ω .

No experimento 9 nota-se uma maior concentração dos resultados ao redor de $2,4$ G Ω , Figura 8.21a, com algumas amostras com baixa resistência de isolamento e, ao contrário desse, no experimento 10, observa-se uma distribuição mais espalhada, Figura 8.21b, indicando um processo menos estável.

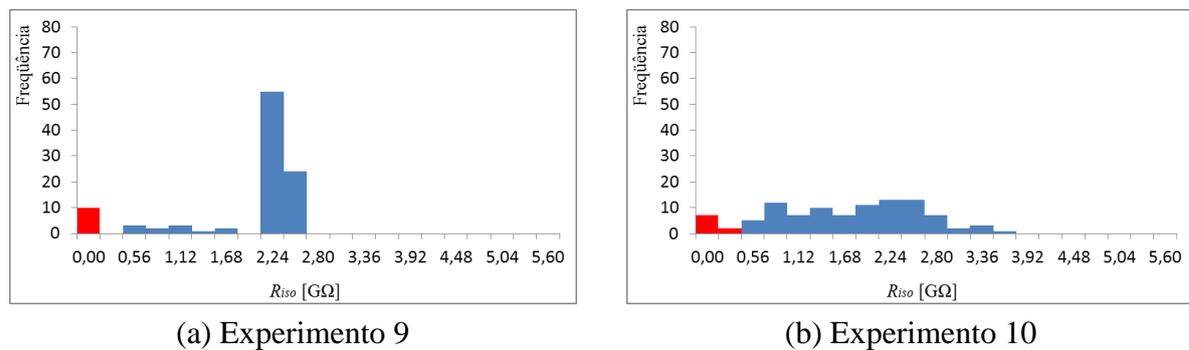


Figura 8.21 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 9 e 10.

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378$ G Ω

Os resultados obtidos com os experimentos 9 e 10 (Serra 5 – dentes retos) para peças com alta resistência de isolamento são muito semelhantes aos gerados nos experimentos 7 e 8 (Serra 4 – dentes curvos). A aparência da superfície usinada é mais clara pelos experimentos 7 e 9 se comparada com a aparência mais escura pelos experimentos 8 e 10 (Figura 8.22).

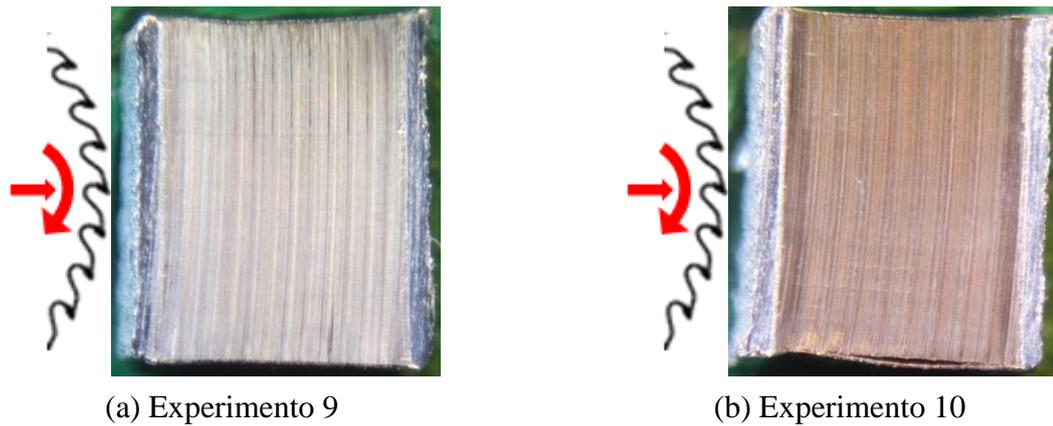


Figura 8.22 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 5 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$

Para as Serras 4 e 5, o modo de falha é o mesmo: arraste de filme metalizado, fazendo com que o material fique depositado na superfície da peça. No entanto, diferentemente da superfície gerada pela Serra 4, a adesão do material na superfície usinada pela Serra 5 está concentrada em locais mais específicos (Figura 8.23).

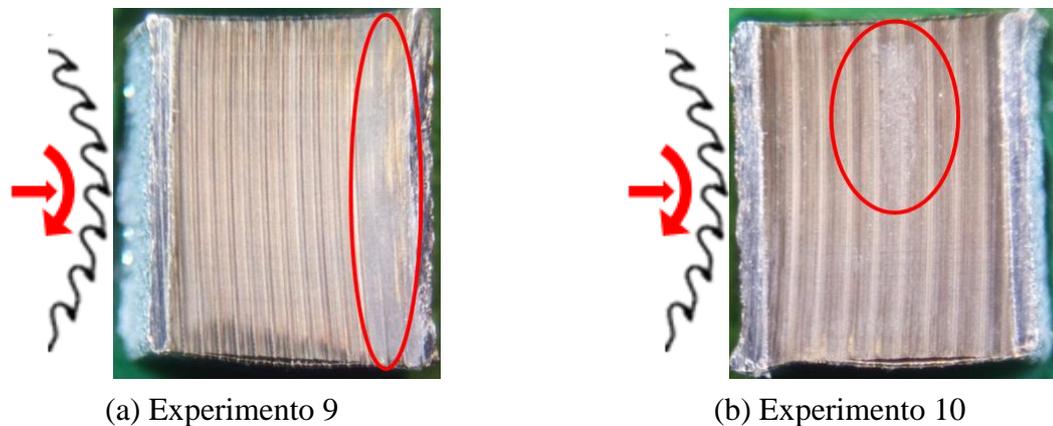
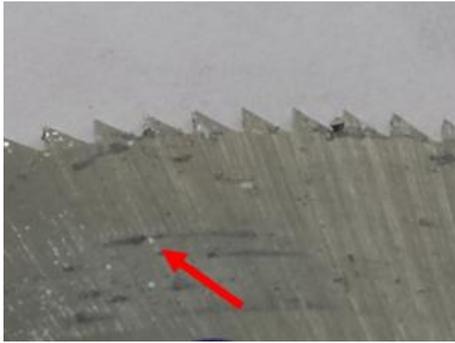


Figura 8.23 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 5 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

Aspecto da superfície lateral da serra

Entre as serras com $z_{w2} = 160$ dentes (Serras 4 e 5), as lâminas operando com tempo de corte em $t_{cl} = 1,0 \text{ s}$ conduzem de forma mais eficiente o material, fazendo com que uma menor quantidade de alumínio fique aderida à lateral da serra e entre em atrito com a superfície de corte, como mostram os experimentos 9 e 10 (Figura 8.24).



(a) Experimento 9



(b) Experimento 10

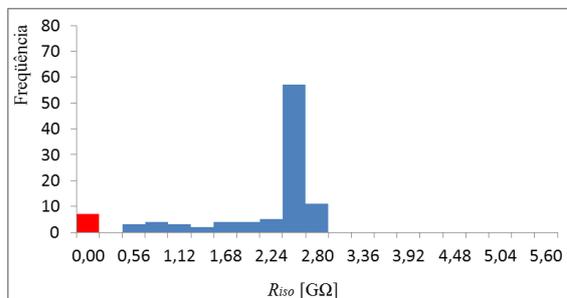
Figura 8.24 – Serra 5 após os experimentos 9 e 10 (imagens ampliadas 3x).

8.1.6 Serra 6 – Experimentos 11 e 12

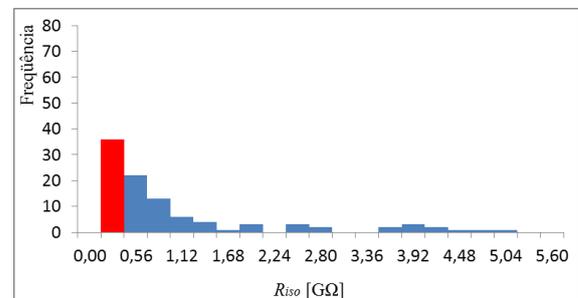
Histograma da resistência de isolamento

Com um tempo de corte de $t_{c1} = 1,0$ s e uma velocidade de rotação de $n_2 = 3600$ rpm, obteve-se para o experimento 11 uma média amostral para R_{iso} de $\bar{R}_{iso} = 2,01$ G Ω com a maior parte das peças concentrada em aproximadamente 2,4 G Ω (conforme histograma indicando na Figura 8.25a). O desvio-padrão foi de $s = 0,80$ G Ω . Um total de 7 peças das 100 amostras produzidas apresentou resistência de isolamento abaixo de 0,378 G Ω .

Aumentando-se o tempo de corte para $t_{c2} = 2,0$ s e diminuindo-se a velocidade de rotação da lâmina para $n_1 = 1200$ rpm (experimento 12) a qualidade do corte diminuiu consideravelmente, apresentando uma baixa média amostral de $\bar{R}_{iso} = 0,94$ G Ω com desvio-padrão de $s = 1,22$ G Ω . Como o valor da média amostral para a resistência de isolamento foi baixo, um elevado número de peças com $R_{iso} < 0,378$ G Ω já era esperado, $NP = 43$ peças (esse comportamento confirma-se no histograma de distribuição, Figura 8.25b).



(a) Experimento 11



(b) Experimento 12

Figura 8.25 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 11 e 12.

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378 \text{ G}\Omega$

Para a Serra 6 (160 dentes retos de metal-duro sem cobertura), o resultado foi satisfatório quanto à aparência de corte para menor tempo de corte ($t_{cl} = 1,0 \text{ s}$) e maior velocidade de rotação ($n_2 = 3600 \text{ rpm}$) da lâmina (experimento 11 – Figura 8.26a).

Contrário ao obtido nas serras de aço-rápido, a superfície usinada pelo experimento 12 torna-se ligeiramente mais escura; todavia, apresenta um modo de falha diferente: região clara na parte inferior da peça devido ao dobramento do filme metalizado nesta área reduzindo a resistência de isolamento na região. O dano ocorreu em menor proporção para as peças com relativa alta resistência de isolamento (Figura 8.26b).

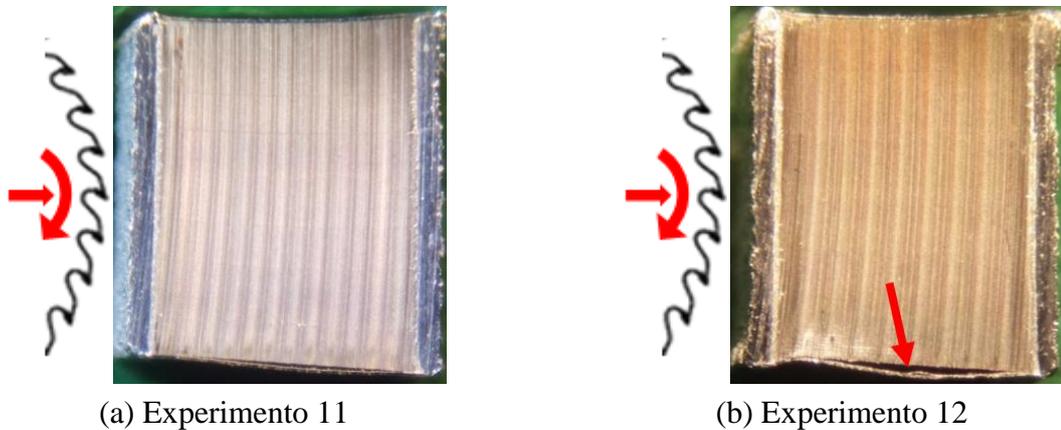


Figura 8.26 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 6 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$

A aparência da peça obtida com a Serra 6 para o experimento 11 apresenta algumas áreas escuras principalmente na metade superior da peça (entrada da lâmina), o que em níveis maiores, afetam a resistência de isolamento das peças (Figura 8.27a). Com a maior velocidade de rotação (n_2) há atrito do material serrado com a lateral da lâmina gerando área mais escura devido ao aquecimento no local.

O dano relativo ao dobramento do filme metalizado foi constatado em maior extensão para a peça com baixa resistência de isolamento. O dano se estende a toda região inferior da peça (Figura 8.27b), fato que explica a grande dispersão de valores de resistência de isolamento no histograma do experimento 12 (Figura 8.25b).

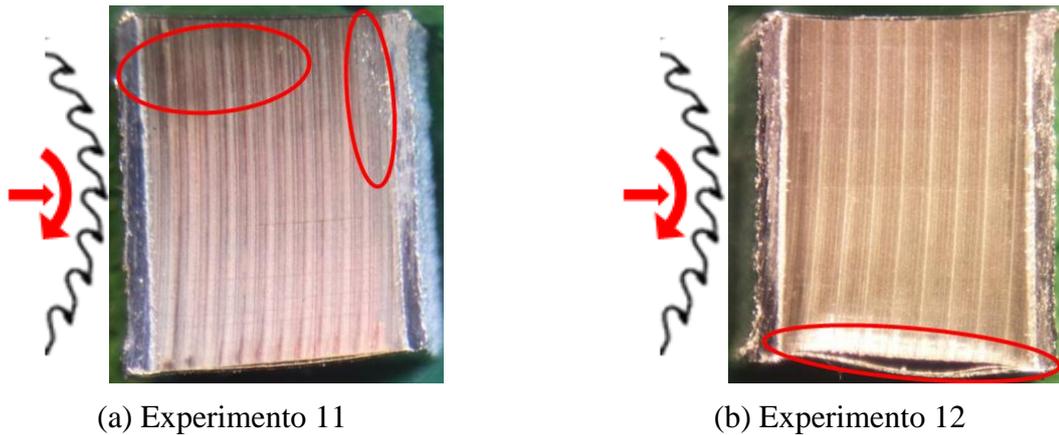


Figura 8.27 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 6 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

Com a menor velocidade de rotação (n_1) e o maior tempo de corte (t_{c2}) do experimento 12, o filme metalizado atrita contra a superfície lateral da lâmina e acaba sendo dobrado na parte inferior da peça onde há poucas camadas de sustentação. Isto pôde ser visto nas Figura 8.26b e Figura 8.27b, onde as últimas camadas se desprendem da peça.

Aspecto da superfície lateral da serra

Apesar dos diferentes resultados, observa-se na Serra 6 a mesma aparência após a realização dos experimentos 11 e 12, ou seja, nas duas situações, a lâmina exibe leve adesão de material na superfície lateral do corpo da lâmina. As aparências da lâmina após os experimentos 11 e 12 estão representadas nas Figura 8.28a e Figura 8.28b respectivamente.

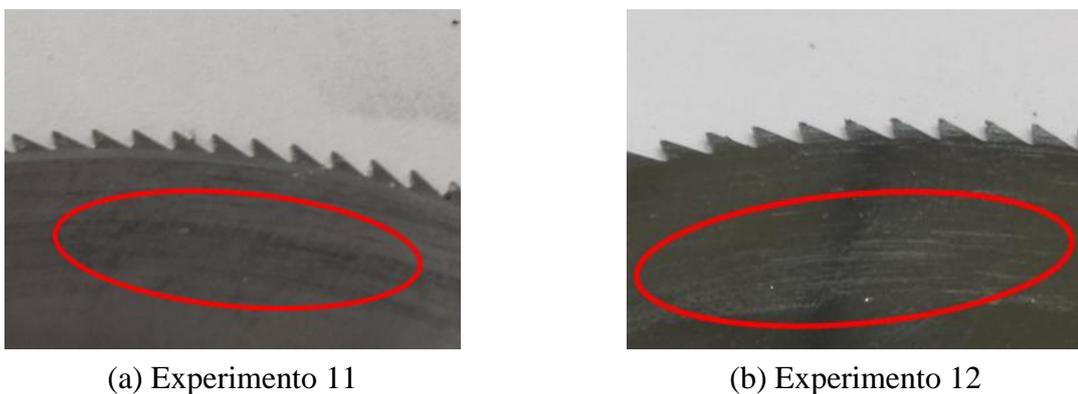


Figura 8.28 – Serra 6 após os experimentos 11 e 12 (imagens ampliadas 3x).

8.1.7 Serra 7 – Experimentos 13 e 14

Histograma da resistência de isolamento

A Serra 7 (160 dentes retos de metal-duro com revestimento de filme DLC) com tempo de corte de $t_{c1} = 1,0$ s e velocidade de rotação de $n_2 = 3600$ rpm geraram amostras de resistência de isolamento com média $\bar{R}_{iso} = 2,74$ G Ω e desvio-padrão $s = 1,40$ G Ω para o experimento 13, indicando grande espalhamento dos valores conforme indicado no histograma da Figura 8.29a. Nessa condição são geradas $NP = 6$ peças com resistência de isolamento abaixo de $0,378$ G Ω .

Com o aumento do tempo de corte para $t_{c2} = 2,0$ s e com a diminuição da velocidade de rotação para $n_1 = 1200$ rpm, a média da resistência de isolamento diminuiu para $\bar{R}_{iso} = 2,11$ G Ω com desvio-padrão de $s = 0,45$ G Ω . Apesar de haver uma ligeira diminuição do valor médio do experimento 13 para o experimento 14, o desvio-padrão diminuiu consideravelmente (conforme pode ser visto no histograma da Figura 8.29b) e, conseqüentemente, o número de peças com resistência de isolamento abaixo de $0,378$ G Ω também diminuiu ($NP = 3$ peças).

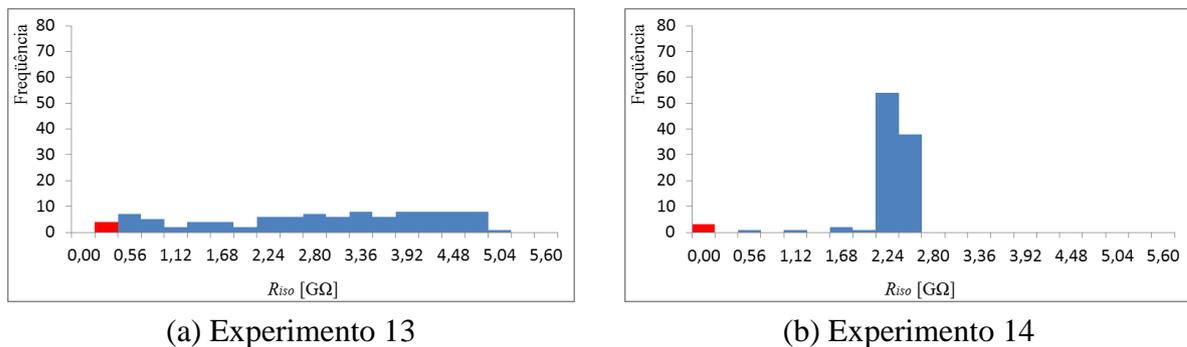


Figura 8.29 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 13 e 14.

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378$ G Ω

Em geral, as superfícies usinadas das peças geradas pelos experimentos 13 e 14 apresentaram boa aparência, como mostra a Figura 8.30a e a Figura 8.30b, respectivamente. Em ambos os casos a Serra 7 apresentou o mesmo modo de falha (acúmulo de material na superfície usinada). Porém, o revestimento de filme DLC (baixo coeficiente de atrito) possibilitou que a Serra 7 apresentasse um comportamento melhor que a Serra 6 (sem o revestimento) no quesito aquecimento da superfície de corte, visto que não gerou zonas escuras como no experimento 11 e nem dobramento do filme como no experimento 12.

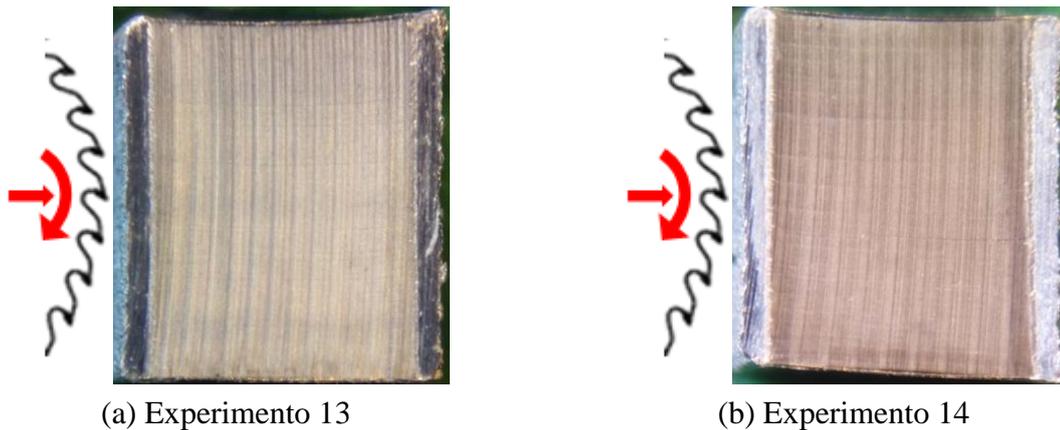


Figura 8.30 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 7 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$

Apesar de a superfície usinada da peça pelo experimento 13 apresentar boa aparência, algumas peças apresentaram material depositado na superfície de corte (conforme pode ser verificado na Figura 8.31a), o que causou a grande dispersão dos valores de resistência de isolamento das amostras produzidas (histograma da Figura 8.29a). Conforme o obtido nos demais experimentos aplicando lâminas com $z_{w2} = 160$ dentes, diminuindo a velocidade de rotação, a distribuição se torna mais concentrada; entretanto, algumas peças são geradas com defeito devido à deposição de material na superfície usinada, neste caso, principalmente na parte inferior da peça, área de saída da lâmina de serra. Como supracitado, o experimento 14 apresentou o mesmo modo de falha do experimento 13, com a diferença de que as zonas escuras reduziram sua intensidade (Figura 8.31b).

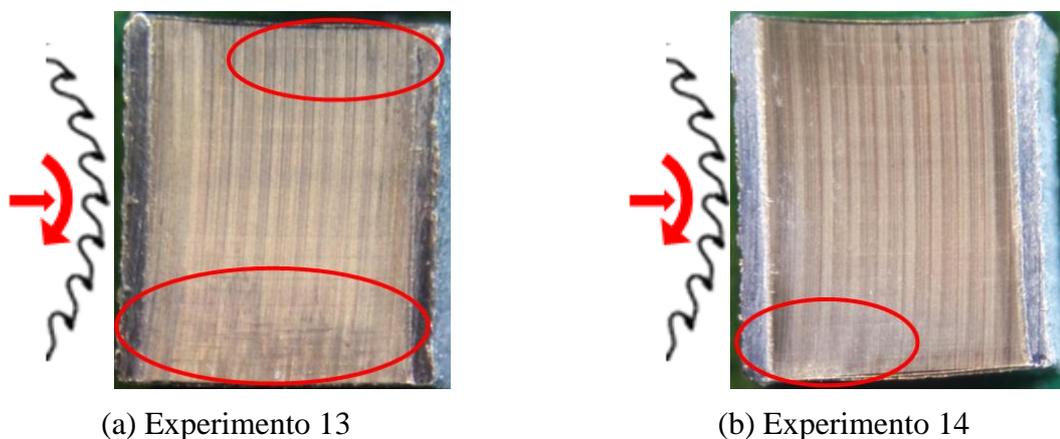
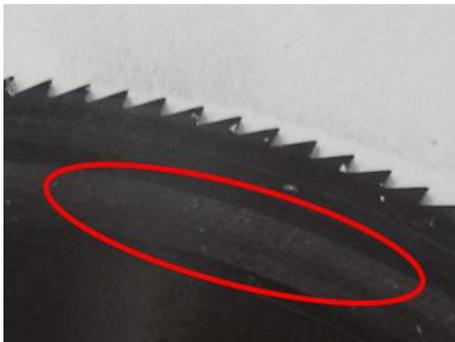


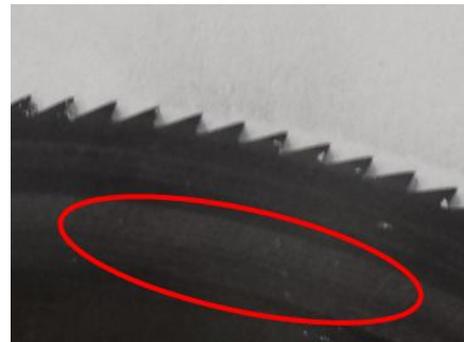
Figura 8.31 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 7 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

Aspecto da superfície lateral da serra

Semelhante ao ocorrido com a Serra 6 (experimentos 11 e 12), a Serra 7, apesar dos diferentes resultados, apresenta a mesma aparência após a realização dos experimentos, ou seja, nas duas situações a lâmina apresenta leve adesão de filme metalizado na superfície lateral do corpo da lâmina e alguns pontos de alumínio da face de ataque do dente da serra. A aparência da lâmina após os experimentos 13 e 14 estão representadas na Figura 8.32a e na Figura 8.32b, respectivamente.



(a) Experimento 13



(b) Experimento 14

Figura 8.32 – Serra 7 após os experimentos 13 e 14 (imagens ampliadas 3x).

A adesão de alumínio na parte inferior do dente ocorreu devido a uma delaminação da camada de filme DLC (Figura 8.33) durante a operação de corte favorecendo o acúmulo de material na região e, por isso, algumas peças (6 peças no experimento 13 e 3 peças no experimento 14) apresentaram acúmulo de material da superfície de corte.

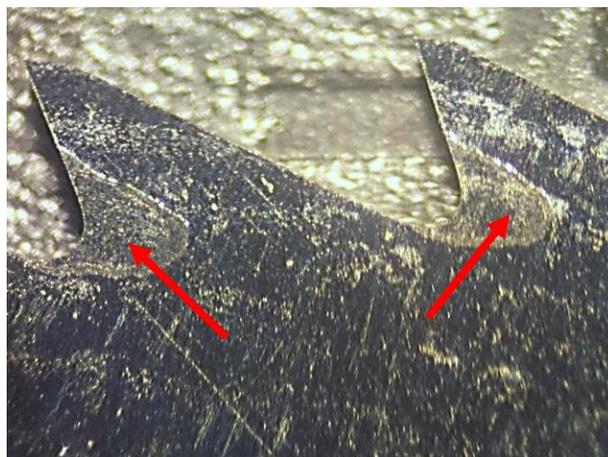


Figura 8.33 – Delaminação da camada de DLC da Serra 7 (imagem ampliada 32x).

8.1.8 Serra 8 – Experimentos 15 e 16

Histograma da resistência de isolamento

Com tempo de corte de $t_{c1} = 1,0$ s e velocidade de rotação de $n_2 = 3600$ rpm obteve-se uma média amostral de $\bar{R}_{iso} = 1,41$ G Ω e desvio-padrão de $s = 0,78$ G Ω para a resistência de isolamento das 100 amostras cortadas com a Serra 8 (experimento 15). Apesar do baixo desvio-padrão, conforme pode ser visto na Figura 8.34a, devido à baixa média amostral, a amostragem não apresentou concentração dos resultados em um valor específico. Um total de $NP = 14$ peças apresentou resistência de isolamento abaixo de $0,378$ G Ω .

O resultado com o aumento do tempo de corte para $t_{c2} = 2,0$ s e redução da velocidade de rotação da lâmina para $n_1 = 1200$ rpm fez aumentar a média da resistência de isolamento para $\bar{R}_{iso} = 1,93$ G Ω e desvio-padrão de $s = 0,58$ G Ω . Neste caso, $NP = 6$ peças apresentam valor de $R_{iso} < 0,378$ G Ω . Nas condições do experimento 16, os valores da resistência de isolamento apresentaram maior concentração dos valores entre 2,0 e 2,4 G Ω conforme pode ser visto no histograma da Figura 8.34b. Semelhante ao experimento 12, a menor velocidade de rotação e o maior tempo de corte fazem com que o atrito gerado do material com superfície lateral da serra cause dobramento do filme metalizado.

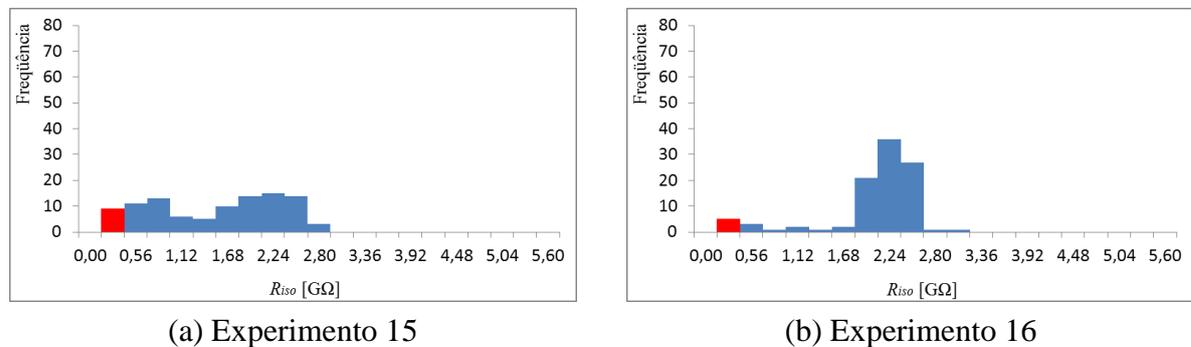


Figura 8.34 – Histograma da resistência de isolamento dos experimentos 15 e 16.

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} \geq 0,378$ G Ω

Semelhante ao ocorrido no experimento 11, a superfície usinada com a Serra 8 (180 dentes retos de metal-duro sem cobertura), apresentou resultado satisfatório quanto ao aspecto da superfície para menor tempo de corte ($t_{c1} = 1,0$ s) e maior velocidade de rotação ($n_2 = 3600$ rpm) da serra (experimento 15 – Figura 8.35a). Como no experimento 12, a superfície usinada pelo experimento 16 apresentou dobra do alumínio na parte inferior da peça (Figura 8.35b).

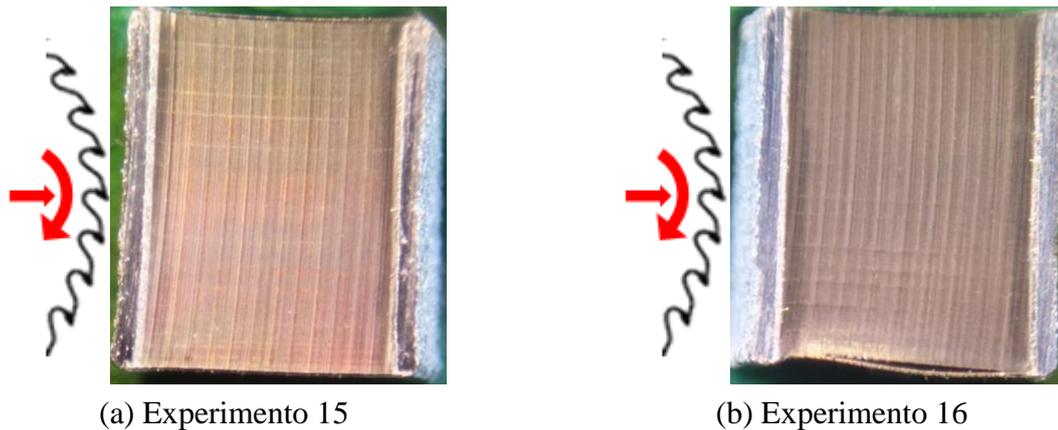


Figura 8.35 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 8 com alta resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

Aspecto da superfície da peça com $R_{iso} < 0,378 \text{ G}\Omega$

Para ambas as condições de testes (experimentos 15 e 16) o modo de falha é o mesmo: pequenos danos na superfície usinada na forma de fissuras ao longo das camadas de filme metalizado indicando a dobra do material na parte inferior da amostra (também semelhante ao ocorrido nos experimentos 11 e 12). A Figura 8.36 ilustra as amostras geradas.

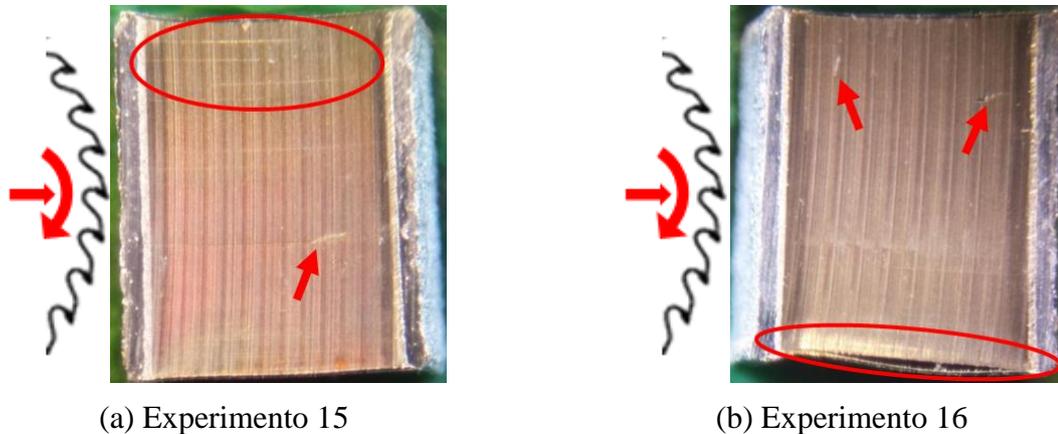


Figura 8.36 – Exemplos de amostras geradas pela Serra 8 com baixa resistência de isolamento (imagens ampliadas 10x).

Aspecto da superfície lateral da serra

A aparência da lâmina de serra após os experimentos 15 e 16 também segue o padrão dos experimentos 11 e 12 onde há filme metalizado aderido à lateral do corpo da lâmina, sendo em menor escala para o experimento 16 (Figura 8.37).

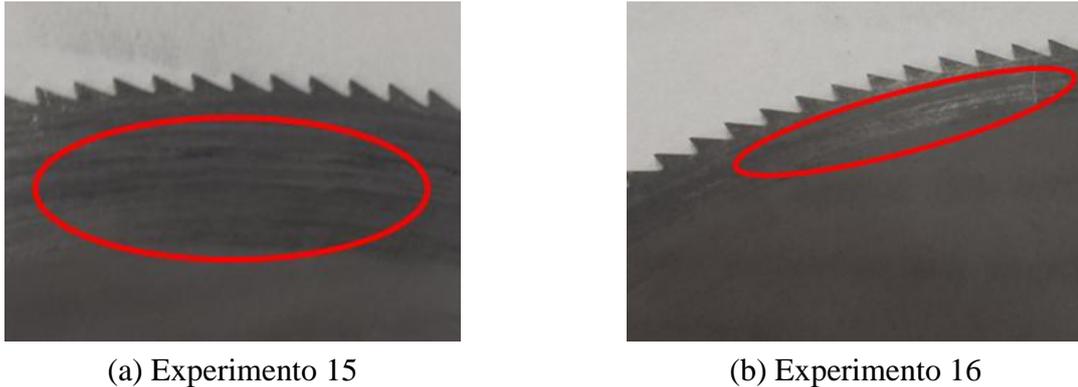


Figura 8.37 – Serra 8 após os experimentos 15 e 16 (imagens ampliadas 3x).

8.2 Análise das Características da Serra

8.2.1 Influência do Número de Dentes

A Serra 3 ($z_w = 80$ dentes) e a Serra 4 ($z_w = 160$ dentes), cujas características estão apresentadas na Tabela 7.1, podem ser comparadas avaliando-se a influência somente do número de dentes da lâmina (z_w) no processo de corte. A comparação pode ser realizada entre os experimentos 5 e 7 ($n_1 = 1200$ rpm e $t_{c1} = 1,0$ s) e entre os experimentos 6 e 8 ($n_2 = 3600$ rpm e $t_{c2} = 2,0$ s) visto que são realizados nas mesmas condições.

Conforme indica a Tabela 8.2, obtendo a média dos Experimentos 5 e 6 e comparando com a média dos experimentos 7 e 8 é possível concluir que o número de dentes z_w não influencia significativamente no processo em relação à média das médias da resistência de isolamento $\bar{\mu} = 1,925$ G Ω para a Serra 3 e $\bar{\mu} = 1,93$ G Ω para a Serra 4. Apesar disso, a variação das amostras é ligeiramente menor entre as amostras cortadas pela Serra 4 ($\bar{\sigma} = 0,76$ G Ω) se comparado com o obtido pela Serra 3 ($\bar{\sigma} = 0,92$ G Ω).

Tabela 8.2 – Resultado dos experimentos das Serras 3 e 4 (influência de z_w).

Exp.	Serra	Fator 1	Fator 2	Fator 3	R_{iso} [G Ω]				< 0,378 G Ω	
		z_w	n [rpm]	t_c [s]	R_{iso}	\bar{R}_{iso}	s	\bar{s}	NP	\overline{NP}
5	3	80	1200	1	1,85	1,92	1,34	0,92	16	10,0
6	3	80	3600	2	2,00		0,51		4	
7	4	160	1200	1	2,05	1,93	0,87	0,76	9	6,5
8	4	160	3600	2	1,81		0,66		4	

Para as Serras 3 e 4, a condição de maior velocidade de rotação e menor tempo de corte apresentou melhores resultados. Porém, ambas as lâminas apresentaram adesão de filme metalizado na superfície lateral sendo de forma mais acentuada na lâmina com maior número de dentes (Serra 4). Esse fato fez com que Serra 3 gerasse peças com riscos no sentido de corte e a Serra 4 gerasse peças com superfície escura. Entre as duas, a Serra 4 apresentou melhor corte pela maior concentração dos valores de R_{iso} em torno da média.

Esse resultado está de acordo com o determinado por Tschätsch (2009), onde o número de dentes efetivamente atuando no corte deve ser 3 sendo possível a utilização de 2 dentes para casos em que a dureza do material seja menor. Utilizando a Equação (6.7) através da espessura $B = 6,0$ mm da peça e do diâmetro da lâmina $D = 100$ mm, é possível achar o ângulo de pressão $\varphi_s = 6,9^\circ$. Utilizando o resultado e o número de dentes $z_{w1} = 80$ (Serra 3) e $z_{w2} = 160$ (Serra 4) na Equação (6.2) é possível encontrar o número de dentes em contato efetivo durante o processo de corte, ou seja, $z_{e1} = 1,53$ dentes para a Serra 3 e $z_{e2} = 3,05$ dentes para a Serra 4. Portanto, está de acordo com o resultado obtido nos experimentos visto que a serra 3 apresentou melhor resultado quanto a resistência de isolamento. O resultado obtido também coincidiu com o determinado por Lokesngard (2010) que, segundo a Tabela 6.1, define que a lâmina necessita ter entre 4 e 6 dentes/cm para o corte de poliéster. A Serra 3 apresenta 2,54 dentes/cm e a Serra 4 possui 5,09 dentes/cm, o recomendado pelo autor.

8.2.2 *Influência do Tipo de Dente*

Quanto ao tipo de dente (retos e curvos), serão comparados os desempenhos das Serras 1 e 3 ($z_w = 80$ dentes) e das Serras 4 e 5 ($z_w = 160$ dentes).

Comparando as Serras 1 e 3 (Tabela 8.3) não se notam diferenças significativas nos resultados a fim de indicar um perfil de dente mais apropriado, visto as média das médias das resistências de isolamento obtidas com a Serra 1 ($\bar{\mu} = 1,94$ G Ω) e com a Serra 3 ($\bar{\mu} = 1,92$ G Ω), assim como a média dos desvios padrões (1,03 G Ω e 0,92 G Ω , respectivamente) e a média do número de peças com $R_{iso} < 0,378$ G Ω (10,5 e 10,0 peças, respectivamente).

Pela análise da aparência das peças usinadas com as Serras 1 e 3 em maior velocidade de rotação e maior tempo de corte (melhores resultados obtidos), a Serra 3 apresentou melhor resultado quanto à aparência de corte (superfície clara e homogênea), assim como uma maior concentração de valores de R_{iso} em torno da média (menor desvio-padrão).

Tabela 8.3 – Resultado dos experimentos das Serras 1 e 3 (influência do tipo de dente)

Exp.	Serra	Fator 1	Fator 2	Fator 3	R_{iso} [GΩ]				< 0,378 GΩ	
		Dente	n [rpm]	t_c [s]	R_{iso}	\bar{R}_{iso}	s	\bar{s}	NP	\overline{NP}
1	1	Reto	1200	1	1,76	1,94	1,42	1,03	16	10,5
2	1	Reto	3600	2	2,13		0,64		5	
5	3	Curvo	1200	1	1,85	1,92	1,34	0,92	16	10,0
6	3	Curvo	3600	2	2,00		0,51		4	

Comparando as Serras 4 e 5 (Tabela 8.4) obtiveram-se resultados semelhantes aos obtidos para as Serras 1 e 3, exceto pela média do número de peças com $R_{iso} < 0,378$ GΩ que, para a Serra 4, é ligeiramente menor ($\overline{NP} = 6,5$) se comparado com a Serra 5 ($\overline{NP} = 10$).

Tabela 8.4 – Resultado dos experimentos das Serras 4 e 5 (influência do tipo de dente)

Exp.	Serra	Fator 1	Fator 2	Fator 3	R_{iso} [GΩ]				< 0,378 GΩ	
		Dente	n [rpm]	t_c [s]	R_{iso}	\bar{R}_{iso}	s	\bar{s}	NP	\overline{NP}
7	4	Curvo	1200	1	2,05	1,930	0,87	0,765	9	6,5
8	4	Curvo	3600	2	1,81		0,66		4	
9	5	Reto	3600	1	1,86	1,710	0,75	0,815	10	10,0
10	5	Reto	1200	2	1,56		0,88		10	

Pela análise da aparência das peças cortadas com as Serras 4 e 5 em maior velocidade de rotação e maior tempo de corte (melhores resultados obtidos), ambas as peças apresentaram comportamento semelhante; porém, para a Serra 5 (dentes retos), há menos material aderido à superfície de corte se comparado com a Serra 4 (dentes curvos), assim como uma distribuição mais concentrada quanto à R_{iso} (apesar de o desvio-padrão ser maior, isto se deve ao número de peças com resistência de isolamento abaixo do especificado).

Deste modo, os resultados mostram que não há influência significativa no processo de corte de anéis bobinados através da alteração do perfil do dente da lâmina, exceto para serras com $z_w = 160$ dentes onde se obteve resultado ligeiramente melhor para o perfil reto.

8.2.3 Influência da Espessura da Lâmina

A influência da espessura da lâmina b pode ser analisada através do comparativo dos resultados dos experimentos 3 e 4 (Serra 2) com os dos experimentos 5 e 6 (Serra 3). Ambas as lâminas possuem 80 dentes curvos de aço-rápido sem revestimento.

Comparando os valores obtidos para a resistência de isolamento (Tabela 8.5), não é possível identificar uma diferença significativa entre os resultados. A média das médias para a Serra 2 foi $\bar{\mu} = 2,06 \text{ G}\Omega$ e para a Serra 3 o valor diminuiu ligeiramente para $\bar{\mu} = 1,92 \text{ G}\Omega$. Os resultados das aparências do corte das peças obtidas para maior velocidade de rotação e maior tempo de corte para ambas as lâminas foram os melhores.

Tabela 8.5 – Resultado dos experimentos das Serras 2 e 3 (influência da espessura b)

Exp.	Serra	Fator 1	Fator 2	Fator 3	R_{iso} [G Ω]				< 0,378 G Ω	
		b [mm]	n [rpm]	t_c [s]	R_{iso}	\bar{R}_{iso}	s	\bar{s}	NP	\overline{NP}
3	2	1,0	1200	1	2,38	2,06	1,25	1,07	8	10,5
4	2	1,0	3600	2	1,75		0,89		13	
5	3	0,5	1200	1	1,85	1,92	1,34	0,92	16	10,0
6	3	0,5	3600	2	2,00		0,51		4	

Apesar de as peças com alta resistência de isolamento (boas) apresentar aparências de corte semelhante para as duas lâminas, a Serra 3, quando teve maior tempo de corte (menor velocidade de avanço) e maior velocidade de rotação, apresentou apenas quatro peças com resistência de isolamento abaixo da especificação, assim como uma maior concentração dos valores de resistência de isolamento (menor desvio-padrão).

8.2.4 Influência quanto ao Material/Revestimento

O fator material é avaliado comparando os resultados das Serras 5 (aço-rápido), 6 (metal-duro sem revestimento) e 7 (metal-duro revestido com DLC). Os resultados destas serras quanto à resistência de isolamento estão conforme a Tabela 8.6.

Tabela 8.6 – Resultado dos experimentos das Serras 5, 6 e 7 (influência do material/revestimento)

Exp.	Serra	Fator 1	Fator 2	Fator 3	R_{iso} [G Ω]				< 0,378 G Ω	
		Material	n [rpm]	t_c [s]	R_{iso}	\bar{R}_{iso}	s	\bar{s}	NP	\overline{NP}
9	5	HSS	3600	1	1,86	1,71	0,75	0,81	10	10,0
10	5	HSS	1200	2	1,56		0,88		10	
11	6	MD	3600	1	2,01	1,47	0,80	1,01	7	25,0
12	6	MD	1200	2	0,94		1,22		43	
13	7	MD/DLC	3600	1	2,74	2,42	1,40	0,92	6	4,5
14	7	MD/DLC	1200	2	2,11		0,45		3	

Obtendo a média das médias para os experimentos da Serra 5 tem-se $\bar{\mu} = 1,71 \text{ G}\Omega$ e desvio-padrão médio de $\bar{\sigma} = 0,45 \text{ G}\Omega$. Para ambos os experimentos foram geradas 10 peças com baixa resistência de isolamento. Melhor resultado se comparado com os experimentos 12 e 13 (Serra 6), onde se obteve $\mu = 1,47 \text{ G}\Omega$ e desvio-padrão médio de $\bar{\sigma} = 1,01 \text{ G}\Omega$, sendo que 25 peças em média foram produzidas com baixa resistência de isolamento.

Porém a serra de metal-duro obteve resultado melhor quando operando em maior velocidade de rotação e maior tempo de corte ($\bar{\mu} = 2,01 \text{ G}\Omega$, desvio-padrão médio $\sigma = 0,80 \text{ G}\Omega$ e $NP = 7$ peças). Já a serra de metal-duro revestida com DLC apresentou bons resultados quanto à R_{iso} média ($\bar{\mu} = 2,01 \text{ G}\Omega$ com desvio-padrão de $\bar{\sigma} = 0,92 \text{ G}\Omega$). Nesse caso, apenas 4,5 peças, em média, foram obtidas com resistência de isolamento abaixo do especificado.

A Serra 5 (HSS), para ambas as condições, apresentou adesão de filme metalizado na lateral do corpo da serra e, conseqüentemente, adesão de material na superfície de corte.

As lâminas de metal-duro apresentaram falhas de aquecimento da superfície de corte conforme experimento 11 (Serra 6) ou causaram estrias no filme metalizado por causa do atrito gerado entre a superfície de corte e a lateral da lâmina de serra.

Por outro lado, a Serra 7 obteve melhor resultado quanto a resistência de isolamento da peça para baixas velocidades de rotação, com baixo desvio-padrão e apenas 3 peças abaixo da resistência de isolamento especificada. Para uma maior velocidade de rotação, a lâmina apresenta o modo de falha típico das serras de 160 dentes: adesão de material na superfície de corte devido à baixa altura do dente (garganta insuficiente). Conforme exposto na **Subseção 6.2.1**, o revestimento ajuda a eliminar a possibilidade de o material serrado aderir à lâmina reduzindo o atrito, manter a sua dureza, prevenir o aquecimento e melhorar o desempenho no corte de materiais compostos.

9 CONCLUSÕES

Como resultado do experimento, as Serras 1, 2, 3 e 4 apresentaram resultados semelhantes tanto para a influência na resistência de isolamento (R_{iso}) das peças (apresentando média de aproximadamente 2,00 G Ω) quanto no número de peças geradas abaixo de 0,378 G Ω (aproximadamente 10 peças).

As Serras 5, 6 e 8 exibiram resultado inferior às demais com médias para a resistência de isolamento de aproximadamente 1,70 G Ω . Já a Serra 7 (160 dentes retos de metal-duro com revestimento DLC) mostrou o melhor resultado: média de 2,42 G Ω e apenas 5 peças com baixa resistência de isolamento.

A Serra 7 proporcionou a maior concentração dos valores para uma menor velocidade de rotação da lâmina ($n_1 = 1200$ rpm), diferentemente das demais serras onde apresentou melhoria na média dos valores de resistência de isolamento para $n_2 = 3600$ rpm e significativo progresso na geração de peças com baixa resistência de isolamento (cerca de 14 peças para n_1 e 8 peças para n_2).

O tempo de corte (t_c), parâmetro inversamente proporcional à velocidade de avanço (v_f), não influenciou significativamente na qualidade de corte quanto aos valores de R_{iso} . Notou-se pequena melhoria para um menor tempo de corte, porém não significativa, para a resistência de isolamento das amostras (2,01 G Ω para $t_{c1} = 1$ s e 1,78 G Ω para $t_{c2} = 2,0$ s). Apesar disso, o fator não influenciou na quantidade de peças geradas com baixa resistência de isolamento (aproximadamente 11 peças para ambas as situações).

A velocidade de rotação da lâmina de serra foi o parâmetro de corte mais significativo entre os avaliados, principalmente na dispersão das amostras (desvio-padrão). No caso, o resultado foi melhor para a maior velocidade de rotação (n_2) onde a média da resistência de isolamento foi de 1,82 G Ω para as peças obtidas com $n_1 = 1200$ rpm e 1,96 G Ω para $n_2 = 3600$ rpm. Apesar de os valores médios não serem muitos diferentes, conforme foram verificados nos histogramas gerados, os resultados obtidos com a maior velocidade de rotação apresentaram menor desvio-padrão amostral. Com relação direta a esse fato, n_2 gerou menor quantidade de peças com baixa resistência de isolamento (7,87 peças em média) se comparado com n_1 (13,87 peças em média).

Quanto ao número de dentes da lâmina de serra, ambos os tipos apresentaram resultados numéricos semelhantes com pequena vantagem para a serra com 160 dentes devido

à maior concentração dos valores em torno da média para a resistência de isolamento das peças obtidas e o menor número de peças com isolamento abaixo do especificado.

Na análise da qualidade do corte quanto ao tipo de dente (curvo ou reto), este fator também não afetou significativamente os resultados numéricos; porém, no comparativo entre as lâminas de 80 dentes, a lâmina de dentes curvos apresentou melhor resultado quanto à aparência de corte (superfície clara e homogênea), assim como uma maior concentração dos valores de resistência de isolamento (menor desvio-padrão). Para lâminas com 160 dentes, há uma melhora no número de peças geradas com baixa resistência de isolamento para o tipo reto. O resultado que reflete na aparência de corte onde há menos material aderido à superfície lateral da serra assim como uma distribuição mais concentrada quanto à R_{iso} .

A espessura da lâmina de corte (b) não exerceu grande influência sobre a qualidade do corte dos anéis bobinados. Ao analisar a aparência do corte das peças obtidas para uma maior velocidade de rotação e um maior tempo de corte, foi possível observar os melhores resultados para as duas espessuras. Apesar de as peças com alta R_{iso} (boas) apresentarem aparência de corte semelhante para as duas espessuras, devido ao maior volume de material removido por vez, a serra com $b_l = 0,5$ mm apresentou apenas quatro peças com material aderido a superfície de corte (resistência de isolamento abaixo da especificação) assim como uma maior concentração dos valores de resistência de isolamento (menor desvio-padrão).

O material da lâmina foi avaliado para aço-rápido (HSS), metal-duro e metal-duro com revestimento DLC (*Diamond-Like Carbon*). A serra de HSS, para ambas as condições de teste, apresentou adesão de filme metalizado na lateral do corpo da serra e, conseqüentemente, na superfície usinada. As lâminas de metal-duro apresentaram falhas de aquecimento da superfície de corte e/ou estrias no filme metalizado por causa do atrito gerado entre a superfície de corte e a lateral da lâmina de serra. Esse fator é eliminado quando a lâmina é revestida com filme DLC, apresentando melhora do resultado quanto à resistência de isolamento da peça para baixas velocidades de rotação. Apesar do revestimento, a lâmina apresentou leve adesão de filme metalizado, porém não de forma significativa. Também houve adesão de alumínio na parte inferior do dente que ocorreu devido a uma delaminação da camada de filme DLC e algumas peças (seis peças no experimento 13 e três no experimento 14) apresentaram acúmulo de material na superfície usinada. Portanto, propõe-se a utilização de uma camada mais espessa de filme DLC.

10 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

O primeiro fator a ser analisado em um trabalho futuro é a influência dos ângulos de saída (γ) e de folga (α) do dente, assim como a profundidade da garganta do dente na resistência de isolamento das peças não se limitando a perfis propostos em norma.

Conforme estudo conduzido por Klocke, 2011, a fim de garantir a capacidade de corte de lâminas de serras circulares, é absolutamente necessário quebrar o cavaco de tal maneira que sejam mais espessos que a largura do corte. Se negligenciadas tais medidas, o cavaco pode se aglomerar danificando a ferramenta. Subdividindo os dentes em elementos de pré e pós-corte, o cavaco é quebrado de forma que os dentes pré-corte sobressaiam pelo menos a espessura do cavaco e sua maior comprimento de ponta seja menor que a largura total do cavaco não deformado. Uma alternativa é quebrá-los através de ranhuras intercaladas. Desta forma, um único cavaco é produzido por dente que pode escapar através da ranhura sem acumular durante o corte. Assim, um segundo fator que pode ser analisado em futuros trabalhos é no uso de quebra cavacos como ranhuras ou dentes de pré-corte e corte a fim de verificar a influência desses na resistência de isolamento das peças obtidas e na adesão do material base na superfície lateral dos dentes ou da própria lâmina.

Também, como forma de estender as conclusões obtidas neste trabalho, poder-se-á avaliar rotações mais altas, visto que é um fator determinante do processo.

Outros fatores como lubrificação e refrigeração da lâmina de serra podem ser estudados a fim de obter melhores condições do processo. Apesar de existir soluções no mercado de fluidos lubrificadorrefrigerantes, não podem ser utilizados no processo de corte de anéis bobinados devido ao material base constituinte que é fortemente afetado pelas condições do ambiente, como, por exemplo, a umidade.

11 REFERÊNCIAS

- Aurich, J. C.; Dornfeld, D. **Burrs - Analysis, Control and Removal**. Conferência Internacional em Rebarbas. Universidade de Kaiserslautern, Alemanha, 2009.
- Boljanovic, V. **Metal Shaping Processes: Casting and Molding, Particulate Processing, Deformation Processes, and Metal Removal**. Industrial Press Inc., 428p., 2010.
- Bosch, **Catálogo Bosch Fine Crosscut**, 14p. 2014.
- Boylestad R. L.; Nashelsky, L. P. **Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos**. Prentice Hall, Ed. 8, 2004.
- Bradbury, S.; Lewis, D.; Sarwar, M. **The effect of product quality on the integrity of advanced surface engineering treatments applied to high speed steel circular saw blades**. Departamento de Mecânica e Engenharia de Processos, Inglaterra, 1995.
- Bralla, J. G. **ASM Handbook**, ASM International, 944p., 1997.
- Caleyron. **Manufacturer of TCT and cermet circular saw blades, and solid carbide saws**. Disponível em: < www.caleyron.com >. Acesso em junho/2014.
- Capacitor Guide, **Mica Capacitor**. Disponível em <www.capacitorguide.com>. Acesso em junho/2014.
- Chen, Y.; Li, Hua; et. al. **Study on Self-Healing and Lifetime Characteristics of Metallized-Film Capacitor Under High Electric Field**. IEEE Transactions on Plasma Science, volume 40, nº 8, 2012.
- Chiaverini, V. **Aços e Ferros Fundidos**. Editora ABM, 4.ed. São Paulo, 1979.
- Circular Saw Blades, **Saw Blade Parameters**. Disponível em: <www.circularsawblade.net>. Acesso em julho/2014.
- D'Errico, G.; Bugliosi, S.; Guglielmi, E. **A tribological evaluation of coated cermet systems for cutting tools**. Instituto Lavorazione, Itália, 1997.

Dearborn, **Catálogo de Capacitores de Mica**, Dearborn Electronics, 2014.

Deshpande, R. P. **Capacitors: Technology and Trends**. Tata McGraw-Hill Education, 319p., 2012.

Dicken, H. **Self Healing of Film Capacitors**. DM Data Inc. Raytheon Reliability Analysis Laboratory, EUA, 2010.

Digi-key. **Film Capacitors: B32529D335K289**. Disponível em: <www.digikey.com>. Acesso em julho de 2014.

Dubilier, C., **Catálogo de capacitores de polipropileno**, 15p., 2014.

Dubilier, W. **Electronic Design**. Disponível em <electronicdesign.com>. Acesso em julho/2010.

Dummer. G. W., **Electronic Inventions and Discoveries**, Institute of Physics Publishing, 74p., 4th ed. Bristol, UK, 1997.

Eletrônica, **Tudo Sobre Capacitores**. Editora Saber Ltda, 2014.

ERA, **Failure in Metalized Polypropylene Capacitors**, ERA Technology, 2014.

Henriquez, M. C. **Contribuição à determinação das características de usinagem em brocas helicoidais**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas; Faculdade de Engenharia Mecânica. 1982.

Ferraresi, D.. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., v.1, 1982.

Fitzgerald, D. G., **Improvements in electrical condensers or accumulators**, Patente britânica No. 3466/1876, Sept. 2, 1876

Fowler, R.; **Fundamentos de Eletricidade: Corrente Alternada e Instrumentos de Medição**. Ed. Bookman, Vol. 2, Ed. 7, 264p, 2008.

Grote, K; Antonsson, E. **Handbook of Mechanical Engineering**. Springer, Vol.10, 1572p., 2009.

- Halliday, D. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. Editora LTC, Vol.3, Ed. 8, 419p., 2009.
- Harper, C.; Petrie, E. **Plastics Materials and Processes: A Concise Encyclopedia**. Ed. John Wiley & Sons, Inc. 2003.
- Ho, J.; Jow, T. R.; Boggs, S. **Historical Introduction to Capacitor Technology**. IEEE Electrical Insulation Magazine, Universidade de Kyunghee, 2010.
- Jupiter, **Catálogo Cooper Foil Paper & Wax Capacitors**. Jupiter Condenser, 2014.
- Klaeger, H., **Bandsaw Semiautomatic Actron265G Catalog**. Hermann Klaeger Inc., 5p. 2014.
- Klocke, F. **Manufacturing Process 1 - Cutting**, Springer Heidelberg Dordrecht, London, New York, 506p., 2011.
- Koether, R.; Rau, W. **Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure**, Munique, Alemanha, 3.ed, 474 p., 2008.
- Kowaluk, G. **Machining Processes for Wood-based Composite Materials**. Woodhead Publishing Limited. Universidade de Ciências Humanas SGGW, Polônia, 2012.
- Laguna Tools. **LT16HD - LT37 Bandsaw Manual**. Laguna Tools Inc., 96p., 2014.
- Lewis, D.; Bradburry, S.; Sarwar, M. **Effect of substrate surface preparation on the performance and life of TiN-coated high speed steel circular saw blades**. Materials Research Institute, Sheffield Hallam University, England, 1995.
- Li, H.; Li, Z.; Lin, F.; Chen, Y.; Liu, D.; Wang, B.. **Insulation resistance of metallized polypropylene film capacitors under different electric fields**, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 20, No. 4, pp. 1315-1320, 2013.
- Lokesnsgard, E. **Industrial Plastics: Theory and Applications**. Ed. Delmar Cengage Learning. 5.ed., 2010.
- Makita. **Catálogo de Produtos 2014-2015: Serra Circular**, p.84-85. Disponível em: <<http://www.makita.com.br/catalogos>>. Acesso em maio/2015.

- Mann, T. **Metal Artist's Workbench: Demystifying the Jeweler's Saw**. Editora North Light Books, 144p., 2011.
- Mult Comercial. **Mult Comercial Componentes Eletrônicos**. Disponível em: <<http://loja.multcomercial.com.br>>. Acesso em jan/2015.
- Mundim, K. **Eletricidade e Magnetismo**. Biblioteca Nacional, Ministério da Cultura, 1998.
- Murata. **Catálogo de Capacitores Cerâmicos Monolíticos**, 2014.
- Mussoi, F.; Villaça, M. **Capacitores**. Ed. 3. CEFET-SC, Florianópolis, p.4-22, 2000.
- Nowak, W. **Thin Metallic Films for Corrosion Control**. Surface and Coating Technology, Elsevier Sequoia. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Northeastern. Boston, Estados Unidos, 1991.
- Petry, C. **Relação tensão e corrente nos elementos passivos: Capacitores**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Departamento de Eletrônica. Florianópolis, Brasil, 2007.
- Rao, P. N. **Manufacturing Technology** Volume 2, 2ª Edição. Editora Tata McGraw-Hill Education, 476p., 2009.
- Ribeiro, F. R. **Estudo do Comportamento Tribológico de Filmes DLC Dopados com Ag**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2012.
- Rodrigues, S. L. **Capacitores e Indutores**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Elétrica. Porto Alegre, Brasil, 2006.
- Schulz, A. L. **Capacitors: Theory, Types, and Applications**. Nova Science Publishers, Incorporated, 119p., 2010.
- Segre, E. **From Falling Bodies to Radio Waves**. WH Freeman & Co., New York, NY, pp105-112, 1984.
- Skil Tools. **Carbide Tipped Circular Saw Blades Catalog**. Disponível em: <www.skiltools.com>. Acessado em junho, 2014.

Starrett. **Arco de Serra Heavy-Duty - Extra-Tensão Nº 145 – cabo fechado**. Disponível em: <www.starrett.com.br>. Acesso em maio/2015.

TDK. **Film Capacitor Data Book**, Munique, Alemanha, 363 p., 2012.

TDK. **Film Capacitors: MKP Types With Reduced Volume**, Disponível em <www.tdk.eu>. Acesso em julho/2014.

The Online Tutorials. **Capacitors**. Disponível em <www.theonlinetutorials.com/capacitors.html>. Acesso em julho/2014.

Tolphin, J. **Jim Tolpin's Table Saw Magic**. Editora Popular Woodworking Books, 192p., 2003.

Toray. **Plastics & Chemicals**. Disponível em <www.toray.com>. Acesso em maio/2014.

Tortai, J.H.; Denat, A.; Bonifaci, N. **Self-healing of capacitors with metallized film technology: experimental observations and theoretical model**. Laboratório de Eletrostática de Materiais Elétricos, Universidade CNRS & Joseph Fourier, 2001.

Tramontina. **Catálogo Tramontina**, Garibaldi, RS, 251p., 2014.

Truini, J. **Saw Blades: A Comprehensive Guide to Today's Best Saw Blades**. Revista Popular Mechanics, Nova Iorque, Estados Unidos, 1988.

Tschätsch, H. **Applied Machining Technology**. Springer, Heidelberg, 2009.

Tschätsch, H.; Dietrich, J. **Praxis der zerpantechnik: verfahren, werzeuge, berechnung**. Wiesbaden, Alemanha. Ed. 9, 394 p., 2008.

Tsukao, S. ; Ishii, T. ; Itahashi, S. ; Kamba, M. **Properties of aged oil impregnated paper power capacitor**. Properties and Applications of Dielectric Materials. Proceedings of the 7th International. IEE Xplore, 2003.

Venson. **Venson Automotive Solutions**. Disponível em: <www.venson.com>. Acesso em julho/2014.

Vishay. **General Technical Information**. Disponível em <www.vishay.com>. Acesso em julho/2014.

Wei, Shizhong; Zhu, Jinhua; Xu, Liuji. **Effects of vanadium and carbon on microstructures and abrasive wear resistance of high speed steel**, Tribology International 39, pg. 641-648. 2006.

Williams, H. R., **A History of Science. World Wide School**, Volume 2, Seattle, Washington, USA, 1999.

Wima. **Technical Info**. Disponível em <www.wima.com>. Acesso em junho/2014.