

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**USO DE DIÓXIDO DE CARBONO EM FORMA DE NÉVOA NA
REFRIGERAÇÃO DA FERRAMENTA DE CORTE DURANTE
A USINAGEM DA MADEIRA**

MARCELO GOZELOTO

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**USO DE DIÓXIDO DE CARBONO EM FORMA DE NÉVOA NA
REFRIGERAÇÃO DA FERRAMENTA DE CORTE DURANTE
A USINAGEM DA MADEIRA**

Tese de Doutorado submetida à banca examinadora na área de concentração construções rurais e ambiência, sob orientação da Prof^a Dr^a Raquel Gonçalves.

MARCELO GOZELOTO

Orientadora: Prof^a Dr^a Raquel Gonçalves

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

G749u Gozeloto, Marcelo
 Usu de dióxido de carbono em forma de névoa na refrigeração da
 ferramenta de corte durante a usinagem da madeira / Marcelo
 Gozeloto.--Campinas, SP: [s.n.], 2008.

 Orientadores: Raquel Gonçalves.
 Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
 Faculdade de Engenharia Agrícola.

 1. Madeira. 2. Usinagem. 3. Ferramentas – Indústria. 4.
 Tecnologia de baixa temperatura. I. Gonçalves, Raquel. II.
 Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
 Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: Use of carbon dioxide fog in the cutting tool refrigeration during the
 wood machining

Palavras-chave em Inglês: Wood, machining, cutting tool, cooling

Área de concentração: Construções rurais e ambiência

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, Antonio Carlos Néri, Antônio
 Rocco Lahr, João Roberto Moro

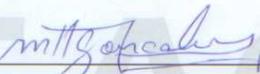
Data da defesa: 25/02/2008

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

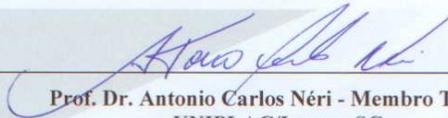
Este exemplar corresponde à redação final da **Tese Doutorado** defendida por **Marcelo Gozeloto**, aprovada pela Comissão Julgadora em 25 de fevereiro de 2008, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



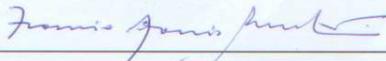
Prof.ª. Dr.ª Raquel Gonçalves - Orientadora
FEAGRI/UNICAMP



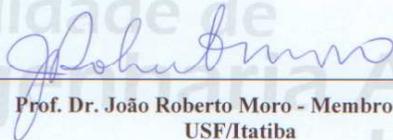
Prof. Dr Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves - Membro Titular
FEB/UNESP



Prof. Dr. Antonio Carlos Néri - Membro Titular
UNIPLAC/Lages - SC



Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr - Membro Titular
EESC/USP



Prof. Dr. João Roberto Moro - Membro Titular
USF/Itatiba

DEDICATÓRIA

Dedico essa obra especialmente para todas aquelas pessoas esquecidas, perdidas para o mundo, assim ainda que não saiba vossos nomes ainda assim lembro-me de vós;

Dedico essa obra às pessoas honestas, justas e cujo vigor reside no caráter reto e espírito imaculado. Para aqueles que preferem a vida dura em vez de uma vida fácil se essa for fruto de atos ilícitos. Eis essa dedicatória.

Dedico também esse trabalho para aqueles que acreditam que tudo é possível e que mesmo na dificuldade, acham que a vida é divertida.

Com carinho dedico esse trabalho para minha esposa Silvia e filha Júlia. Júlia, você que é minha filha, acredite, as coisas acontecem se você assim desejar.

Por fim dedico a minha mãe, Malvina e ao meu pai, Valdomiro. Lembro-me dum presente que ele me deu aos seis anos de idade. Foi um livro, desde então tudo mudou. Lembro de minha mãe, acompanhando-me ao jardim da infância, bom o tempo passou...

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais para a Professora Dr^a Raquel Gonçalves, que sempre acreditou e encorajou-me a prosseguir nessa obra;

A FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio amplo financeiro dedicado à essa pesquisa;

A FEAGRI – Faculdade de engenharia Agrícola, por ter aceitado a então proposta de projeto de pesquisa.

A UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, pela oportunidade que me ofereceu através desse trabalho;

Aos professores da Faculdade de engenharia agrícola – FEAGRI – pelos conhecimentos ministrados;

A Escola SENAI Luiz Scavone, através do seu diretor, Professor Amélio Vieira Neto, por permitir que fosse realizada a parte experimental dessa pesquisa e pelo fornecimento do material para a fabricação dos corpos de prova;

Ao aluno Raphael Garcia Vanni, que como aluno de iniciação científica mostrou-se sempre a disposição para ajudar e colaborar por a consolidação dessa pesquisa;

Aos alunos e alunas da Escola SENAI Luiz Scavone de Itatiba do curso técnico em movelaria da 2^a turma, ano de 2006, que muito colaboraram para a realização da parte experimental dessa obra;

Aos coordenadores, professores e amigos da Escola SENAI Luiz Scavone, que atuaram no sentido de colaborar para o êxito dessa obra;

Ao professor Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, pelo fornecimento de literatura relacionada a essa obra, que muito ajudou ao longo desse trabalho;

Enfim agradecimentos e muito obrigado para todos e todas que ajudaram a construir essa pesquisa, esse trabalho, que desde já considero como fruto de todos nós.

Sumário.	i
Lista de símbolos.	ix
Resumo.	xi
Abstract.	xii
1. INTRODUÇÃO.	1
1.1 Objetivo geral.	3
1.2 Objetivos específicos.	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	5
2.1. Estado da arte para o processamento da madeira.	5
2.2. Panorama moveleiro do Brasil em relação à necessidade de inovação tecnológica.	7
2.3. Propriedades da madeira.	9
2.3.1. Anisotropia.	9
2.3.2. Massa específica.	12
2.3.3. Umidade.	12
2.3.4. Temperatura.	13
2.4. Dados sobre os materiais adotados.	14
2.4.1. Eucalyptus Grandis.	14
2.4.2. Pinus Elliottii.	16
2.4.3. Painéis de MDF.	16
2.5. Principais processos de usinagem da madeira.	17
2.5.1. Processo de fresamento.	17
2.5.2. Processo de corte com uso de serras circulares.	18
2.6. Fatores relevantes para o melhoramento dos processos de usinagem da madeira.	19
2.6.1. Geometria da ferramenta.	20
2.6.2. Grandezas de usinagem.	21
2.6.2.1. Avanço.	21
2.6.2.2. Profundidade de corte.	22
2.6.3. Materiais das ferramentas de corte.	23
2.7. Planos de serramento circular da madeira.	24
2.7.1. Serramento circular 90-0.	24
2.7.2. Serramento circular 90-90.	24

2.7.3.	Serramento circular 0-90.	25
2.8.	Tipos de cavacos oriundos dos processos de usinagem da madeira.	26
2.8.1.	Cavaco tipo I.	26
2.8.2.	Cavaco tipo II.	26
2.8.3.	Cavaco tipo III.	27
2.9.	Considerações sobre processos de usinagem em geral.	28
2.9.1.	Fluido de corte.	28
2.9.2.	Calor oriundo do processo de usinagem.	29
2.9.3.	Desgastes da ferramenta de corte.	29
2.10.	Usinagem da madeira <i>Eucalyptus Grandis</i> com aplicação de dióxido de carbono como fluido de corte.	30
2.11.	Questões ambientais relacionadas com a aplicação de dióxido de carbono como fluido de corte.	34
3.	MATERIAL E MÉTODOS.	36
3.2.	Operação de serramento circular.	36
3.1.1.	Material.	36
3.1.2.	Equipamentos.	39
3.1.3.	Metodologia.	44
3.1.4.	Planejamento experimental.	46
3.1.5.	Condução da usinagem dos corpos de prova – montagem dos sistemas de aquisição de dados.	47
3.1.5.1.	Sistema para a medição de temperatura interna do corpo de prova durante os procedimentos de usinagem.	47
3.1.5.2.	Sistema para a medição da vibração do conjunto máquina-ferramenta-peça.	49
3.1.5.3.	Sistema para medição da umidade próxima a região em processo de usinagem.	51
3.1.5.4.	Sistema para medição da temperatura externa e aos arredores da região em processo de usinagem.	51
3.1.5.5.	Realização dos ensaios.	52
3.1.5.6.	Metodologia para medição da rugosidade dos corpos de prova após a usinagem.	54
3.1.5.7.	Metodologia de medição das avarias nas ferramentas de corte empregadas nas operações de usinagem.	55
3.1.6.	Avaliação estatística dos resultados.	55

3.3.	Operação de fresamento tangencial.	55
3.2.1.	Material.	56
3.2.2.	Equipamentos.	58
3.2.3.	Metodologia.	60
3.2.4.	Planejamento experimental.	60
3.2.5.	Condução da usinagem dos corpos de prova - montagem dos sistemas de aquisição de dados.	61
3.2.5.1.	Realização dos ensaios.	61
3.2.6.	Avaliação estatística dos resultados.	63
4.	RESULTADOS.	64
4.1.	Eucalyptus Grandis – Operação de serramento circular.	64
4.1.1.	Caracterização dos corpos de prova.	64
4.1.2.	Resultados pertinentes aos materiais usinados - monitoramento da temperatura.	65
4.1.2.1.	Avaliação dos fatores e níveis relacionados com a temperatura de usinagem.	68
4.1.2.2.	Curvas de aquecimento para as condições de menor aquecimento apresentado durante a realização dos ensaios.	76
4.1.2.2.1.	Condição 131.	77
4.1.2.2.2.	Condição 231.	78
4.1.2.2.3.	Condição 331.	78
4.1.2.2.4.	Condição 141.	79
4.1.2.2.5.	Condição 241.	80
4.1.2.2.6.	Condição 341.	81
4.1.2.3.	Resumo dos resultados apresentados.	82
4.1.3.	Avaliação do estado superficial dos corpos de prova usinados. Operação de serramento circular com serra circular.	83
4.1.3.1.	Avaliação do parâmetro de rugosidade Ra.	83
4.1.3.2.	Avaliação do parâmetro de rugosidade Ry.	86
4.1.3.3.	Avaliação dos defeitos macroscópicos sobre a superfície usinada.	90
4.1.3.3.1.	Corpo de prova 34, condição 141.	90
4.1.3.3.2.	Corpo de prova 45 condição 241.	90
4.1.3.3.3.	Corpo de prova 36 condição 341.	91
4.1.3.3.4.	Corpo de prova 37 condição 342.	91

4.1.4.	Avaliação da vibração no conjunto corpo de prova e máquina operatriz.	92
4.1.5.	Avaliação da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem.	93
4.1.6.	Avaliação temperatura externa próxima à região em processo de usinagem.	94
4.2.	Eucalyptus Grandis – Operação de fresamento tangencial.	95
4.2.1.	Caracterização dos corpos de prova.	95
4.2.2.	Resultados pertinentes aos materiais usinados - monitoramento da temperatura.	96
4.2.2.1.	Avaliação dos fatores e níveis relacionados com a temperatura de usinagem.	98
4.2.2.2.	Curvas de aquecimento para as condições de menor aquecimento apresentado durante a realização dos ensaios.	106
4.2.2.1.1.	Condição 131.	106
4.2.2.1.2.	Condição 231.	106
4.2.2.1.3.	Condição 331.	107
4.2.2.1.4.	Condição 141.	107
4.2.2.1.5.	Condição 241.	108
4.2.2.1.6.	Condição 341.	109
4.2.2.2.	Resumo dos resultados apresentados.	109
4.2.3.	Avaliação do estado superficial dos corpos de prova usinados.	
	Operação de fresamento tangencial com fresa perfilada.	110
4.2.3.1.	Avaliação do parâmetro de rugosidade Ra.	110
4.2.3.2.	Avaliação do parâmetro de rugosidade Ry.	114
4.2.3.3.	Avaliação dos defeitos macroscópicos sobre a superfície usinada.	117
4.2.3.3.1.	Corpo de prova 27, Condição 141.	117
4.2.3.3.2.	Corpo de prova 45, condição 241.	117
4.2.3.3.3.	Corpo de prova 07, condição 341.	118
4.2.3.3.4.	Corpo de prova 037, condição 342.	118
4.2.4.	Avaliação da vibração no conjunto corpo de prova e máquina operatriz.	119
4.2.5.	Avaliação da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem.	120
4.2.6.	Avaliação temperatura externa próxima à região em processo de usinagem.	121
4.3.	Pinus Elliottii – Operação de serramento circular.	122
4.3.1.	Caracterização dos corpos de prova.	122
4.3.2.	Resultados pertinentes aos materiais usinados - monitoramento da temperatura.	123

4.3.2.1. Avaliação dos fatores e níveis relacionados com a temperatura de usinagem.	125
4.3.2.2. Curvas de aquecimento para as condições de menor aquecimento apresentado durante a realização dos ensaios.	133
4.3.2.2.1. Condição 132.	133
4.3.2.2.2. Condição 231.	134
4.3.2.2.3. Condição 331.	134
4.3.2.2.4. Condição 141.	135
4.3.2.2.5. Condição 241.	135
4.3.2.2.6. Condição 341.	136
4.3.2.3. Resumo dos resultados apresentados.	136
4.3.3. Avaliação do estado superficial dos corpos de prova usinados. Operação de serramento circular com serra circular.	137
4.3.3.1. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ra.	137
4.3.3.2. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ry.	140
4.3.3.3. Avaliação dos defeitos macroscópicos sobre a superfície usinada.	144
4.3.3.3.1. Corpo de prova 34, condição 141.	144
4.3.3.3.2. Corpo de prova 43 condição 241.	144
4.3.3.3.3. Corpo de prova 36 condição 341.	145
4.3.4. Avaliação da vibração no conjunto corpo de prova e máquina operatriz.	145
4.3.5. Avaliação da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem.	146
4.3.6. Avaliação temperatura externa próxima à região em processo de usinagem.	148
4.4. Pinus Elliottii – Operação de fresamento tangencial.	149
4.4.1. Caracterização dos corpos de prova.	149
4.4.2. Resultados pertinentes aos materiais usinados - monitoramento da temperatura.	150
4.2.2.1. Avaliação dos fatores e níveis relacionados com a temperatura de usinagem.	152
4.4.2.2. Curvas de aquecimento para as condições de menor aquecimento apresentado durante a realização dos ensaios.	160
4.4.2.2.1. Condição 131.	160
4.4.2.2.2. Condição 231.	160
4.4.2.2.3. Condição 331.	161
4.4.2.2.4. Condição 141.	161
4.4.2.2.5. Condição 241.	162

4.4.2.2.6. Condição 341.	162
4.4.2.3. Resumo dos resultados apresentados.	163
4.4.3. Avaliação do estado superficial dos corpos de prova usinados.	
Operação de fresamento tangencial com fresa perfilada.	164
4.4.3.1. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ra.	164
4.4.3.2. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ry.	167
4.4.3.3. Avaliação dos defeitos macroscópicos sobre a superfície usinada.	169
4.4.3.3.1. Condição 141.	169
4.4.3.3.2. Condição 241.	170
4.4.3.3.3. Condição 341.	170
4.4.4. Avaliação da vibração no conjunto corpo de prova e máquina operatriz.	170
4.4.5. Avaliação da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem.	171
4.4.6. Avaliação temperatura externa próxima à região em processo de usinagem.	172
4.5. MDF – Operação de serramento circular.	173
4.5.1. Caracterização dos corpos de prova.	173
4.5.2. Resultados pertinentes aos materiais usinados - monitoramento da temperatura.	174
4.5.2.1. Avaliação dos fatores e níveis relacionados com a temperatura de usinagem.	176
4.5.2.2. Curvas de aquecimento para as condições de menor aquecimento apresentado durante a realização dos ensaios.	184
4.5.2.2.1. Condição 132.	184
4.5.2.2.2. Condição 231.	185
4.5.2.2.3. Condição 331.	185
4.5.2.2.4. Condição 142.	186
4.5.2.2.5. Condição 241.	186
4.5.2.2.6. Condição 341.	187
4.5.2.3. Resumo dos resultados apresentados.	187
4.5.3. Avaliação do estado superficial dos corpos de prova usinados.	
Operação de serramento circular com serra circular.	188
4.5.3.1. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ra.	188
4.5.3.2. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ry.	191
4.5.3.3. Avaliação dos defeitos macroscópicos sobre a superfície usinada.	194
4.5.3.3.1. Corpo de prova 13, condição 141.	194

4.5.3.3.2. Corpo de prova 15 condição 241	194
4.5.3.3.3. Corpo de prova 12 condição 341.	194
4.5.3.3.4. Corpo de prova 17 condição 342.	195
4.5.4. Avaliação da vibração no conjunto corpo de prova e máquina operatriz.	196
4.5.5. Avaliação da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem.	197
4.5.6. Avaliação temperatura externa próxima à região em processo de usinagem.	198
4.6. MDF – Operação de fresamento tangencial.	199
4.6.1. Caracterização dos corpos de prova.	199
4.6.2. Resultados pertinentes aos materiais usinados - monitoramento da temperatura.	200
4.6.2.1. Avaliação dos fatores e níveis relacionados com a temperatura de usinagem.	202
4.6.2.2. Curvas de aquecimento para as condições de menor aquecimento apresentado durante a realização dos ensaios.	210
4.6.2.2.1. Condição 131.	210
4.6.2.2.2. Condição 231.	210
4.6.2.2.3. Condição 331.	211
4.6.2.2.4. Condição 141.	211
4.6.2.2.5. Condição 241.	212
4.6.2.2.6. Condição 341.	212
4.6.2.3. Resumo dos resultados apresentados.	213
4.6.3. Avaliação do estado superficial dos corpos de prova usinados. Operação de fresamento tangencial com fresa perfilada.	214
4.6.3.1. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ra.	214
4.6.3.2. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ry.	217
4.6.3.3. Avaliação dos defeitos macroscópicos sobre a superfície usinada.	219
4.6.3.3.1. Condição 141.	219
4.6.3.3.2. Condição 241.	220
4.6.3.3.3. Condição 341.	220
4.6.4. Avaliação da vibração no conjunto corpo de prova e máquina operatriz.	220
4.6.5. Avaliação da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem.	221
4.6.6. Avaliação temperatura externa próxima à região em processo de usinagem.	222
4.7. Resultados relacionados com a ferramenta de corte – Serra circular.	223
4.7.1. Rugosidade na superfície secundária de folga ($A' \alpha$).	224

4.7.1.1.	Rugosidade Ra.	227
4.7.1.2.	Rugosidade Ry.	227
4.7.2.	Rugosidade na superfície de saída ($A\gamma$).	231
4.7.2.1.	Rugosidade Ra.	234
4.7.2.2.	Rugosidade Ry.	235
4.7.3.	Formação da película de material processado.	238
4.7.4.	Vida útil da ferramenta.	240
4.8.	Resultados relacionados com a ferramenta de corte – Fresa.	242
4.8.1.	Rugosidade na superfície secundária de folga ($A'\alpha$).	243
4.8.1.1.	Rugosidade Ra.	244
4.8.1.2.	Rugosidade Ry.	246
4.8.2.	Rugosidade na superfície de saída ($A\gamma$).	248
4.8.2.1.	Rugosidade Ra.	250
4.8.2.2.	Rugosidade Ry.	251
4.8.3.	Formação da película de material processado.	254
4.8.4.	Vida útil da ferramenta.	255
5.	CONCLUSÕES.	257
5.1.	Resultados relacionados com a temperatura.	257
5.2.	Resultados relacionados com a rugosidade.	259
5.3.	Resultados relacionados com a vibração.	260
5.4.	Resultados relacionados com a umidade relativa e temperatura medida externamente a região de usinagem.	260
5.5.	Resultados relacionados com os desgastes e avarias nas ferramentas de corte com e sem o uso do mecanismo de refrigeração.	260
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	262
7.	ANEXOS.	267

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
α	Ângulo de incidência da ferramenta	Graus
β	Ângulo de cunha da ferramenta	Graus
λ	Ângulo de inclinação do gume principal da ferramenta	Graus
γ	Ângulo de saída da ferramenta	Graus
ϕ_1	Ângulo de entrada da ferramenta	Graus
κ_r	Ângulo de direção do gume da ferramenta	Graus
ϕ_s	Ângulo de ataque	Graus
AD	Seção transversal de usinagem	mm ²
a_e	Penetração de trabalho	mm
a_p	Profundidade de corte	mm
A_z	Seção transversal do cavaco	mm ²
B	Largura de corte	mm
D	Diâmetro da ferramenta	mm
f	Avanço	mm/rot
F_a	Força ativa	N
F_c	Força de corte	N
F_{cn}	Força normal de corte	N
F_f	Força de avanço	N
F_{fn}	Força normal de avanço	N
F_N	Força normal	N
f_z	Avanço por dente (gume)	mm/rot
H	Espessura de corte	mm
h_m	Espessura média do cavaco	mm
h_{max}	Máxima espessura de corte	Mm
$K_{c1.1}$	Força específica de corte	N/mm ²
l_c	Percurso de usinagem	mm
l_{ctot}	Percurso de usinagem total	mm
l_f	Percurso de avanço	m
Me	Massa específica aparente básica da madeira	g/cm ³

N	Rotação da ferramenta	rpm
Pe	Potência específica	kW/mm ²
r _c	Raio de cunha	mm
R _{max}	Rugosidade máxima da superfície	mm
r _o	Raio do gume	mm
SV _γ	Desgaste do gume da ferramenta	-
T	Vida da ferramenta	Min.
U	Teor de umidade	%
V _B	Critério de fim de vida da ferramenta	-
v _B	Largura da marca de desgaste da ferramenta	-
vc	Velocidade de corte	m/s
Z	Número de gumes da ferramenta	-
v _f	Velocidade de avanço da peça	m/min

RESUMO

Em função de algumas propriedades da madeira e de materiais a base de madeira, tais como higroscópica e isolamento térmico, sua transformação por processos de usinagem assume características especiais, de forma que os procedimentos aplicados, por exemplo, para materiais metálicos ou cerâmicos, se tornam inadequados. Diferente de outros materiais, para a usinagem da madeira seca não é adequada a utilização dos processos usuais de refrigeração da ferramenta de corte tais como os fluidos emulsionáveis e óleos de corte, pois pode inviabilizar o uso da madeira processada, uma vez que a madeira, por ser higroscópica, pode absorver o fluido, implicando no aumento da umidade ou mesmo alterações de padrões de coloração. Mesmo a aplicação do sistema com mínima quantidade de fluido de corte, MQF, mostra-se ineficaz, uma vez que dependendo da espécie, o fluido aplicado reage quimicamente com extrativos naturais com resultados indesejados. A falta de fluido de corte para a usinagem da madeira, entretanto, também apresenta o inconveniente de permitir o desgaste prematuro da ferramenta de corte e conseqüente acabamento superficial inadequado da madeira processada. O projeto teve como objetivo avaliar a hipótese de que a adoção do dióxido de carbono super-resfriado em forma de névoa, aplicado diretamente na região de usinagem, é adequado para o resfriamento do processo de usinagem da madeira reduzindo os desgastes da ferramenta de corte com conseqüente melhoria do estado superficial do material. Essa hipótese se baseia no fato de que o dióxido de carbono, após ter entrado em contato com a ferramenta de corte, evapora-se, não provocando danos ao material processado ao mesmo tempo em que retira o calor gerado durante o processamento. A retirada de calor evita os danos decorrentes da usinagem realizada a seco, melhorando, desse modo, os processos de usinagem de madeiras, aumentando a vida útil da ferramenta de corte. Para testar a hipótese foram adotadas madeiras de espécies utilizadas no setor moveleiro e de embalagens, o *Eucalyptus Grandis* e o *Pinus Elliottiii*, e painéis de fibras de madeira de média densidade – MDF. Os resultados permitiram concluir que a aplicação do dióxido de carbono em forma de névoa permitiu a redução da temperatura de usinagem e, mesmo para as menores vazões testadas, mostrou-se adequado para reduzir os desgastes da ferramenta de corte com conseqüente melhoria do estado superficial do material.

ABSTRACT

In function of the physical and biological properties of the wood and its derivatives, it is considered as a material with special characteristics to its transformation for machining processes. So, it cannot adopt the same adopted machining procedures as applied for metallic or ceramics based materials. Unlike other materials, for wood it is not adjusted usual processes for exchanging heat from cutting tool to the local environment. The application of process for cooling on the basis of fluid makes impracticable the processed wood, because this material absorbs liquid fluids, that implies on the physical modification of the such as processed material. The application of system with minimum amount of cut fluid is inefficacious, because the applied fluid speeds up processes of chemical reaction between the wood and the fluid, with consequent degeneration of wood. The lack of cutting fluid for machining wood also presents inconveniences, such as the premature consuming of the cutting tool, inadequate superficial finishing of the processed wood and excess of re-works concerning to the machined wood. This project intends to evaluate the hypothesis that the adoption of the carbon dioxide super-cooled in fog form, applied directly in process region is adjusted to the refrigeration of the tool during the cut of the wood. This hypothesis lays on the fact of that the carbon dioxide, after to have entered in contact with the tool of cut, evaporates, that causes no damages to the processed material at the same time it removes the heat generated during the machining process, that prevents that usual damages when wood is machined in dry, improving, in this way, the wood machining, with significant increase in the quality and productivity that if they relate to the transformation of this material. To evaluate that hypothesis, wood of species used in the furniture and packing sectors will be used - *Eucalyptus Grandis*, *Pinus Elliottii* and medium density fiberboard - MDF.

1. INTRODUÇÃO

A Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI, da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, vem desenvolvendo pesquisas no sentido de aprimorar técnicas de processamento da madeira, notadamente àquelas cuja origem é a madeira de reflorestamento. Nesse sentido, em trabalhos anteriores foram avaliadas as forças de corte durante o processamento da madeira de eucalipto e de pinus, apresentando resultados que permitiram propor parâmetros de usinagem que produzem melhores condições de acabamento superficial da peça usinada, bem como menores forças de corte, implicando em maior eficiência dos equipamentos de corte.

Como continuidade desta linha, a presente pesquisa permite, de forma adicional, agregar conhecimento para que o processamento da madeira de reflorestamento seja realizado de forma mais eficiente, diminuindo assim a pressão sob as florestas nativas, o que contribui para a preservação de sítios naturais dessa importante matéria-prima.

Reunindo três vertentes, a pesquisa contempla as questões ambientais, econômicas e sociais, uma vez que a aplicabilidade do projeto ocorre em nível operacional, com possibilidade de aplicação imediata na cadeia produtiva da fabricação de móveis, embalagens agrícolas e industriais e em construções rurais. Assim, inicia-se em um contexto da indústria, onde a madeira é encontrada como matéria-prima pré-processada, em forma de pranchas, chapas, vigas e painéis. Assume-se, portanto, como executadas, as etapas anteriores tais como a seleção, o corte, o desdobro, e a secagem dos produtos florestais.

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas no campo da usinagem de madeiras, principalmente visando a determinação de parâmetros de usinagem, quer relacionados com as ferramentas de corte ou com a natureza do material processado. Todavia, há um aspecto pertinente aos processos de usinagem da madeira que carece de estudos e pesquisas: - *a retirada de calor oriundo do processo de usinagem.*

Atualmente a madeira e materiais similares, utilizados para a fabricação de artigos do mobiliário, embalagens agrícolas e industriais e construções rurais, são manufaturados a seco, sem o emprego de qualquer mecanismo de refrigeração da ferramenta de corte. Independente do material que constitui a ferramenta de corte, a usinagem a seco acarreta inconvenientes tanto para o material usinado quanto para a ferramenta.

Durante a usinagem há a geração de calor, decorrente do atrito entre o material da ferramenta de corte e o material usinado. Conforme DINIZ *et al* (2001) “A presença de calor durante o processo de usinagem é algo indesejado e que deve ser eliminado ou ao menos reduzido, permitindo-se condições de convivência com esse fenômeno”. O calor gerado durante o processo de usinagem pode ocasionar diversos prejuízos à cadeia produtiva em geral, dentre os quais destaca-se a menor vida útil da ferramenta de corte, a presença de não-conformidades no material processado e a necessidade de potência de corte além da necessária para a realização da operação.

A usinagem de madeiras e seus derivados demanda altas velocidades de corte, conseqüentemente, favorecem o atrito entre o material processado e a ferramenta de corte. Tal favorecimento implica maior geração de calor proveniente do processo de usinagem.

Adicionalmente, madeiras não são bons condutores térmicos, de onde se conclui que a maior parte do calor gerado durante o processo de usinagem não se dissipa pela peça-obra, tampouco pelos cavacos removidos. Desta forma, o calor gerado durante o processo de usinagem tende a se concentrar sobre as arestas da ferramenta. Essa concentração de calor sobre os gumes favorece a redução de vida útil da ferramenta, bem como promove a película de material residual processado que, conseqüentemente, agrava substancialmente todo o processo de remoção de material e formação de cavaco. O efetivo uso de um mecanismo de refrigeração que retire o calor gerado durante o processo de usinagem é fundamental para minimizar os custos envolvidos com a compra e a manutenção de ferramentas de corte, com diminuição de operações de troca e reposição de ferramentas.

O surgimento da película de material residual processado, que ocorre principalmente para madeiras que contenham extrativos, tais como as espécies de Eucalipto e Pinus e o MDF (medium density fiberboard), prejudica sensivelmente o desempenho de corte da ferramenta. Nos termos de DINIZ *et al* (2001), em estudos voltados para a usinagem de metais, “a aresta postiça de corte pode ser entendida como sendo um aglomerado de material que se agrega à superfície de corte dos gumes cortantes da ferramenta, fazendo a função destes durante o processo de usinagem”. Para a madeira, o material agregado tem origem nos próprios detritos de usinagem e se aderem por meio dos extrativos e outros elementos aglutinantes presentes no material usinado. Uma vez que o calor proveniente do atrito entre a ferramenta de corte não é retirado, há o favorecimento de

tal aglutinação, pois o calor promove a adesão dos extrativos e partículas à superfície dos gumes cortantes da ferramenta de corte.

Devido à sua natureza higroscópica, a madeira e materiais à base de madeira absorvem líquidos. Quando a madeira processada é destinada para a fabricação de artigos do mobiliário ou embalagens agro-industriais, a absorção de líquidos é um impeditivo para a realização das operações posteriores, como, por exemplo, etapas de acabamento superficial e controle dimensional dos artigos manufaturados. Os fluidos de corte convencionais são fabricados a base de água e óleos minerais e, assim, são absorvidos por materiais higroscópicos, podendo desencadear reações químicas com os extrativos naturais da madeira, alterando suas características. Desse modo, a refrigeração do processo de usinagem de madeira via fluido de corte líquido não é adequada.

Da forma como foi apresentado, observa-se claramente que há um problema importante a ser avaliado e solucionado para a melhoria e a otimização dos processos de usinagem da madeira:

- A necessidade de maiores velocidade de processamento implica em maior geração de calor. Por outro lado, quanto maior a quantidade de calor, menor a eficiência do processo de usinagem, uma vez que ocorre a degradação precoce da ferramenta de corte. Em função da degradação da ferramenta, o corte ocorre de maneira ineficiente, implicando na necessidade de retrabalhos posteriores da peça-obra processada.

Diante da justificativa e da contextualização do problema a pesquisa teve como objetivos:

1.1 Objetivo geral.

Desenvolver, avaliar e validar mecanismo de refrigeração que adota o dióxido de carbono aplicado em forma de névoa, como fluido de corte.

1.2 Objetivos específicos.

Para que o objetivo geral fosse alcançado, os seguintes procedimentos ou objetivos específicos foram contemplados, para cada espécie e para cada operação avaliada neste projeto (fresamento periférico e serramento circular):

- Medir e avaliar a temperatura durante o processo de usinagem com e sem o uso da refrigeração da ferramenta de corte utilizando-se dióxido de carbono.

- Medir e avaliar a vibração do conjunto máquina-ferramenta-peça durante o processo de usinagem com e sem o uso da refrigeração da ferramenta de corte utilizando-se dióxido de carbono.

- Medir e avaliar a rugosidade superficial da peça de madeira, no sentido paralelo e perpendicular às fibras, após o processo de usinagem com e sem o uso da refrigeração da ferramenta de corte utilizando-se dióxido de carbono.

- Avaliar defeitos superficiais visíveis na peça de madeira após o processo de usinagem com e sem o uso da refrigeração da ferramenta de corte utilizando-se dióxido de carbono

- Medir e avaliar desgaste e presença de película de material residual processado aderido às ferramentas de corte com e sem o uso da refrigeração utilizando-se dióxido de carbono.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estado da arte para o processamento da madeira.

Diversos estudos já foram realizados relativos ao tema usinagem da madeira. Neste ponto são apresentados importantes trabalhos, que sustentam e subsidiam o projeto apresentado.

LUCAS FILHO (2004) analisou a usinagem da madeira visando à melhoria de processos de usinagem da madeiras nativas de origem amazônica relacionadas com o segmento produtivo moveleiro. Em seu trabalho, motivado por questões como sustentabilidade setorial e incremento tecnológico, o autor contempla o panorama moveleiro da região sul do Brasil, relacionando os principais processos de usinagem e metodologias de fabricação. Apresenta ainda dados relacionados sobre a gestão de produção das indústrias da região sul do Brasil.

NERI & GONÇALVES (2002) publicaram estudo do mecanismo de formação de cavacos na usinagem de madeira de eucalipto. Os autores afirmam, entre outras coisas, que a melhor qualidade de superfícies de peças fabricadas em eucalipto geralmente coincide com cavacos do tipo II e a melhor superfície de corte é obtida quando a força normal tende ao valor zero, coincidindo com a formação do cavaco tipo II. A pesquisa fornece dados sobre o processamento de madeiras de reflorestamento, como, por exemplo, a determinação da pressão específica de corte relacionada com as madeiras de eucalipto.

GONÇALVES (2000) tratou dos principais processos de usinagem e manufatura da madeira, quantificando e qualificando esses processos; o autor delineou os fundamentos da usinagem da madeira comentando sobre os principais processos de usinagem aplicados a esse material. A obra apresenta diversas tabelas e diagramas que oferecem parâmetros de referencia da usinagem de madeira para o setor madeireiro.

TIBURCIO (2000) & NÉRI (2002) aplicaram o método de Kienzle em experimentos de usinagem de madeiras de reflorestamento para a determinação da pressão específica de corte. Os resultados tornaram-se importantes informações para a continuidade dos estudos do comportamento da usinagem da madeira, como a determinação da força e potência de corte necessária para o processamento da madeira.

BONDUELLE (2000) concluiu que não é possível definir um esforço ou uma potência de corte sem ter conhecimento detalhado do processo colocando em evidencia a interligação de todos os parâmetros. Afirma ainda que qualquer ação que vise reduzir os

esforços de corte promoverá o melhoramento da superfície usinada. Nesse sentido, o autor corrobora com a realização de novos trabalhos, e em especial com essa proposta em apresentação, pois uma vertente desta é justamente a quantificação e minimização dos esforços de corte.

SANTOS (1999) analisou as forças de corte através de modelos matemáticos envolvendo parâmetros de corte tais como espessura de corte, ângulo de inclinação da ferramenta de corte e densidade da madeira. Para o estudo o autor utilizou os dados de NÉRI (1998) para três espécies de madeira de Eucalipto. Como outros trabalhos, esse complementa com informações adicionais o quesito força de corte associada ao processamento da madeira.

NÉRI (1998, 2003) avaliou o comportamento das forças de corte empregadas para a usinagem de três espécies de Eucalipto; o mesmo autor realizou estudo a respeito dos parâmetros de usinagem da madeira de Pinus, incluindo nesse estudo a avaliação da força de corte para amostras cuja origem difere-se em madeira juvenil e adulta.

FARIAS (1996), em estudo desenvolvido sobre a usinagem da madeira *Eucalyptus Grandis* contemplou a operação de fresamento a altas velocidades, e concluiu que ainda faltam conhecimentos sobre a influência dos parâmetros de usinagem e efeito das variáveis do processo sobre o resultado final do processamento da madeira.

PÄIVINEN & HEINIMAA (2005) estudaram as forças de corte pertinentes ao emprego de ferramentas de corte manuais utilizadas no beneficiamento de madeiras, onde são discutidos os resultados da usinagem de madeiras de coníferas em função da utilização de ferramentas manuais.

PHILBIN & GORDON (2005) avaliaram o desgaste da ferramenta de corte, cujos insertos eram constituídos de diamante policristalino, utilizada para a usinagem de madeira para a realização de serramento circular paralelo às fibras da madeira. A pesquisa quantificou a vida útil da ferramenta de corte em diversas condições de usinagem.

KOPA & SALI (2002), em trabalho publicado relatam o comportamento de usinagem da madeira em três direções típicas, onde traça as particularidades desse material, tais como a anisotropia, não homogeneidade e estrutura específica. Nesse sentido, os autores avaliaram as operações de lixamento, corte com serra circular, aplainamento e perfuração.

BAI *et al* (2002) relatam o desempenho de corte de ferramentas a base de diamante policristalino, empregadas para o corte e outras operações de usinagem da madeira. Os autores apresentam as vantagens peculiares do diamante policristalino empregado para o processamento da madeira, das quais destaca a dureza, condutividade térmica e a resistência a abrasão.

GURAU (2002) e BEER *et al* (2001) avaliaram a rugosidade de madeiras pós-processadas. As suas pesquisas apresentam metodologia para o ensaio de determinação da rugosidade após o processamento de peças fabricadas em madeira,

Outras fontes importantes para aferição do estado da arte são os bancos de patentes de invenção. Dentre os organismos de depósito de patentes existentes no mundo, o USPTO (United States Patent and Trademark Office) é um confiável indicador. Buscas realizadas retornaram nas seguintes patentes concedidas, que possuem relação com procedimentos de usinagem da madeira.

Patente de invenção US 6.974.365 (2005). Trata de um equipamento utilizado para a manufatura de painéis de madeira de modo contínuo, onde a peça-obra é fixada automaticamente com contínuo contato com a ferramenta de corte.

Patente de invenção US 6.432.150 (2002). Trata da fabricação de um compósito a base de diamante utilizado para a fabricação de ferramentas de corte para emprego em usinagem de madeiras.

Patente de invenção US 6.938.656 (2005). Trata da construção de um dispositivo ajustável para o processamento da madeira, bem como o método de ajuste do dito dispositivo.

Patente de invenção US 6.641.065 (2003). Trata de um sistema de processamento da madeira, cujo objetivo é a minimização de retrabalhos.

2.2. Panorama moveleiro do Brasil em relação à necessidade de inovação tecnológica.

A questão da inovação tecnológica ainda é tida como tímida para diversos setores produtivos nacionais. A falta de conhecimento e de capacitação é a principal responsável pelo baixo número de micros, pequenas e médias empresas que utilizam o sistema de propriedade industrial. De acordo com instituto nacional da propriedade industrial (INPI, 2006), entre 2000 e 2004 a proporção de micro empresas em atividade e aquelas com

pedidos de proteção ao INPI eram de 0,76% (106.553 contra 817). À medida que as empresas crescem de porte esta relação aumenta. No mesmo período, a proporção entre as pequenas empresas era de e 2,12%, crescendo para 4,35% entre as médias empresas e chegando a 9,33% nas grandes empresas.

De acordo com estudo lançado recentemente, elaborado por especialistas em ciência e tecnologia para a Organização Mundial da Propriedade Intelectual (OMPI, 2006), este panorama aponta para a necessidade de ampliação de programas de capacitação como os que já são desenvolvidos pelo INPI, FINEP e SEBRAE, no âmbito do Programa Focar. O estudo revela também que, entre as microempresas e empresas de pequeno porte, existe uma concentração de atividades em pesquisa e desenvolvimento voltados exclusivamente à *adaptação, imitação e pequenos aperfeiçoamentos* de tecnologias já conhecidas. Esta lógica tende a gerar um número menor de invenções patenteáveis.

Outro fator que compromete os índices destas empresas pode ser atribuído aos industriais que optam por proteger suas invenções com pessoas físicas, pois os custos para inventores individuais são menores. A este comportamento, o relatório da OMPI acrescenta uma “certa visão patrimonialista, tão característica da sociedade brasileira”.

Alinhado com o parágrafo anterior e de acordo com a ABIMOVEL (2005), a indústria brasileira de artigos do mobiliário é formada por mais de dezesseis mil micros, pequenas e médias empresas que geram mais de cento e noventa e cinco mil empregos. Na maioria, essas empresas são de capital nacional, com pouco ou nenhum recurso alocado para o desenvolvimento de novas tecnologias, caracterizando, desse modo, um segmento industrial que necessita de constante apoio. Ações nesse sentido estão sendo tomadas, principalmente direcionadas para qualificação profissional, entretanto, o segmento citado carece, como exposto, de tecnologia.

COUTINHO (1999) afirma que a indústria de artigos do mobiliário apresenta deficiência competitiva cujas fontes são as defasadas tecnologias instaladas, excessivas verticalização no sentido administrativo, baixa cooperação entre as empresas, ausência de *design* próprio, estruturas empresariais amadoras e mão-de-obra despreparada para atuar em regime de economia aberta e competitiva.

De acordo com a ABPM (1998), medidas como a especialização e reestruturação industrial podem modificar o cenário apresentado. Nesse sentido, conforme menciona NAHUZ (1999), “o caminho passa necessariamente pela utilização e conseqüente

desenvolvimento de novas tecnologias voltadas à transformação da matéria-prima, de modo a obtenção de produtos com alto desempenho e valor agregado”.

Ainda conforme mostra BONDUELLE (1997), “a competitividade de empresas cujo negócio é a transformação da madeira em bens de consumo está relacionada de forma íntima com a eficácia dos processos de transformação”. Nesse ínterim vale ressaltar que a maioria dos processos de transformação necessita de um elemento de corte, ou simplesmente de uma ferramenta de corte, o que leva a concluir que melhorias no processamento de corte das madeiras, nos mais diversos aspectos e operações de usinagem, retornam em imediato melhoramento produtivo.

Em trabalho publicado por ALMEIDA (1998) foi destacada a necessidade de mudanças de comportamento das empresas que utilizam a madeira como matéria-prima. Segundo o pesquisador, há a busca por ganhos de produtividade via qualidade de produtos e processos, uma vez que já estão quase exauridas as possibilidades de manter a competitividade apenas com a vantagem da grande produtividade da matéria-prima, no caso a madeira.

De acordo com a ABIMÓVEL (2002), o mercado mundial de artigos do mobiliário atingiu em 1999 cerca de U\$ 60 bilhões. Estados Unidos, Canadá e Japão foram responsáveis por 85% das importações mundiais de artigos do mobiliário e embalagens agrícolas e industriais. Deve ser destacado, conforme menciona LUCAS FILHO (2003), que a tendência de crescimento do comércio internacional de artigos do mobiliário e embalagens agrícolas e industriais não se limita apenas para produtos acabados, mas também em partes, peças e produtos semi-acabados.

Apesar de fatores pró-ativos em termos geográficos, retratados na abundância de matéria-prima (madeira), MALDONADO (2001) afirma que o Brasil não é suficientemente competitivo nesse segmento, uma vez que as Filipinas possui um índice de exportação de artigos manufaturados em madeira para os Estados Unidos da ordem de três vezes mais que o Brasil. Exemplificando, em 1998 esse país exportou algo em torno de US\$ 221 milhões e o Brasil U\$ 66,7 milhões.

2.3. Propriedades da madeira.

Fator preponderante para a correta usinagem e aplicação da madeira como material é o conhecimento de suas propriedades. Devido a essa importância, diversos são os estudos

que versam sobre suas propriedades. Entre os mais clássicos são citados KOCH (1964), PANSIN *et al* (1980) e KOLLMANN & COTÊ (1984). Em síntese a madeira é um produto do tecido xilemático dos vegetais superiores, que se localiza no tronco e galhos das árvores. O xilema é um tecido estruturalmente complexo composto por um conjunto de células com formas e funções diferenciadas.

Os principais tipos de células encontradas no xilema são as fibras, elementos de vaso, raios traquídeos, parênquima axial e algumas estruturas especiais que são os característicos de algumas espécies, tais como os canais resiníferos, canais secretores axiais, fibrotraqueídeos e outras.

A Figura 1 ilustra a estrutura microscópica de uma madeira folhosa, dicotiledônea, mostrando os principais constituintes do lenho. KOLLMANN & COTÊ (1984).

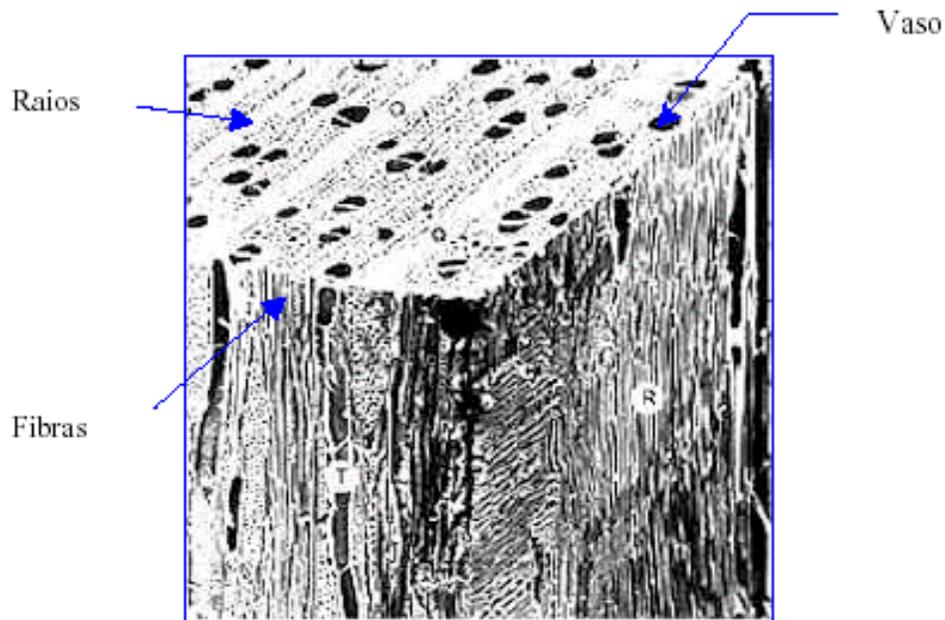


Figura 1 - Estrutura anatômica da madeira. Angiosperma (hardwood). Fonte: IAWA – www.iawa.com

A Figura 2 ilustra a estrutura microscópica de uma madeira conífera, mostrando os principais constituintes do lenho. KOLLMANN & COTÊ (1984).

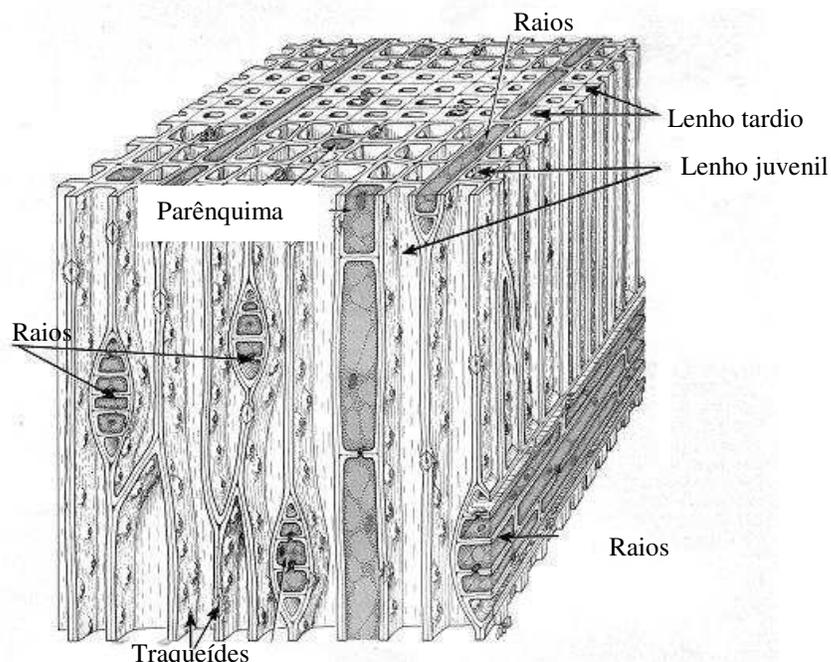


Figura 2 - Estrutura anatômica da madeira. Gimnosperma (softwood). Fonte: IAWA ¹ www.iawa.com

Por apresentarem estruturas diferentes, as espécies pertencentes às classes das Gimnospermas e Angiospermas apresentam comportamento diferenciado na usinagem. Do ponto de vista da usinagem, as resinas presentes em algumas espécies e a característica geométrica dos vasos ou traquídeos podem afetar a qualidade da superfície de corte. As resinas podem aderir à ferramenta de corte e causar defeitos no aplainamento, ocorrendo orifícios na superfície, conhecidos como marcas de cavaco ou “*Chipmarks*”. O diâmetro dos vasos varia entre as espécies e também no interior dos anéis de crescimento (de 20µm a 300µm).

As resinas de certas madeiras, tais como àquelas existentes em madeiras de eucalipto e pinus favorecem a adesão da película de material residual processado. Nesse sentido, o atrito gerado entre a ferramenta de corte e a peça-obra, durante a operação de usinagem facilita essa adesão, GOZELOTO (2003).

¹ IAWA – International Association of Wood Anatomy

2.3.1. Anisotropia.

A madeira é um material heterogêneo e apresenta anisotropia em relação às direções principais, nos planos de corte radial, tangencial e longitudinal, ou seja, apresenta diferentes propriedades de resistência e elasticidade entre os diferentes planos de corte. Pode ser considerado um material ortotrópico, ou seja, que apresenta simetria em sua estrutura nos três planos, exibindo assim, simetria elástica nos mesmos. A anisotropia da madeira é uma propriedade que afeta diretamente o seu comportamento na usinagem, uma vez que em função da direção do plano de corte, haverá maior ou menor esforço para remoção de material.

2.3.2. Massa específica.

A massa específica da madeira pode variar entre gêneros, espécies do mesmo gênero, árvores da mesma espécie e inclusive, entre diferentes partes da mesma árvore.

Inúmeros autores em todo o mundo já constataram que a massa específica é um bom indicador da qualidade da madeira, em função de correlações significativas com propriedades mecânicas e características anatômicas. Dessa forma a densidade terá também importância na usinabilidade da madeira, já que as propriedades mecânicas e as características anatômicas são fatores de grande influência no processamento.

2.3.3. Umidade.

A água presente na madeira é um elemento que não oferece resistência ao corte, ao contrário, atua como facilitador do corte. Assim, o teor de umidade é uma propriedade física que tem grande influência na usinabilidade da madeira.

A água na madeira pode estar presente nos vazios celulares (água livre) ou estar aderida à parede celular (água de impregnação). O ponto de saturação das fibras (PSF) é o teor de umidade no qual a madeira não tem mais água livre, mas somente água de impregnação. A secagem até este ponto não provoca mudança de propriedades na madeira, uma vez que a água livre não está ligada à estrutura do material. No entanto, a saída da água de impregnação (abaixo do PSF) influencia as propriedades da madeira de forma significativa.

Assim, a madeira seca, que se adota para a fabricação de artigos manufaturados, requer maior esforço para o corte do que a madeira verde (com umidade acima do ponto de saturação das fibras) devido o aumento das propriedades de resistência.

2.3.4. Temperatura.

Alguns processos de usinagem utilizam altas temperaturas para facilitar o corte da madeira. Segundo KOCH (1964), a variação da temperatura durante o corte pode afetar a resistência da madeira, interferindo no processo. Os tratamentos térmicos dados ao material em alguns tipos de corte podem ter um efeito permanente sobre suas propriedades mecânicas. GONÇALVES (2000) citava limitada informação experimental a respeito da influencia da temperatura.

Processos de medição de temperatura da madeira têm sido estudado por diversos pesquisadores ao longo do tempo.

BEARD *et al* (1985) sugerem o emprego do termômetro de radiação para medir a temperatura superficial da madeira porque ele pode detectar a temperatura sem encostar no objeto. Já a temperatura interna da madeira pode ser obtida por meio de termopares tipo “T” (cobre-constantan) (Bai e Garrahan, 1984; Holmes, 1988) ou tipo “K” (cromo-alumínio) (Neville e Vermaas, 1988).

NAITO *et al* (1998) examinou o comportamento da madeira durante ensaios estáticos de dobra de corpos de prova fabricados com a madeira cedro amarelo (*Chamaecyparis Lawsoniana* Parl). Como método de avaliação foi comparado a temperatura resultante com e sem o carregamento em diversos pontos dos corpos de prova, para tanto foi utilizado um dispositivo termográfico.

KURYAMA *et al* (2002) mediram a temperatura da madeira durante a realização de ensaios de compressão lateral. Os autores utilizaram corpos de prova de madeira de Hinoki na condição seca. De modo a relacionar a relação entre a deformação e o aumento da temperatura durante a compressão lateral da madeira seca, a superfície dos corpos de prova foram medidas por meio de um dispositivo termográfico e então calculada a taxa de deformação de trabalho em face da energia térmica acumulado no corpo de prova.

RESKA & TORENO (2007), realizaram a medição da temperatura da madeira exposta a intensa radiação térmica, com vistas à prevenção de acidentes relacionados com a ignição da madeira. Para a realização dos ensaios, os pesquisadores adotaram um

calorímetro com configuração vertical sem ignição piloto e com atmosfera norma. O propósito daquela investigação foi desenvolver uma metodologia de medição de temperatura de madeiras e produtos derivados expostas a grande fluxo de calor e construir, assim, uma base de dados de modo a avaliar diferentes modelos de pirólise da madeira.

CANAS *et al* estudaram os efeitos da temperatura e da umidade durante a primeira fase do tratamento térmico da madeira com resposta simultânea de diferentes tipos de madeira (carvalho americano e romeno entre outras), utilizadas para barris de envelhecimento. A medição e avaliação da temperatura da madeira foi feita pelo uso de termopares tipo K.

2.4. Dados sobre os materiais adotados.

2.4.1. Eucalyptus Grandis.

Há várias décadas o *Eucalyptus Grandis* vem sendo cultivado intensivamente no Brasil, com o objetivo principal de atender à demanda do setor de celulose e papel, de chapas duras e painéis aglomerados, bem como o setor de carvão vegetal para uso siderúrgico e metalúrgico. Segundo CETEMO² (2005), é, sem dúvida, uma das espécies mais promissoras para a indústria moveleira, em razão de possuir a maior área plantada dentre as espécies comerciais e apresentar a maior disponibilidade imediata de florestas em idade de corte, destacar-se entre as espécies mais pesquisadas e apresentar uma madeira leve e de boa resistência. Essas mesmas características podem também ser destacadas para seu uso em embalagens.

Estudos realizados com diversas espécies de eucalipto demonstraram que a madeira da espécie em questão se destacou das demais pela qualidade nos processos finais de serraria, aplainamento, tingimento, colagem e união com pregos e parafusos.

Na Tabela 1, COSTA (1996) estabeleceu a comparação entre as propriedades físicas e mecânicas do *Eucalyptus Grandis*, *Pinus Elliottii*, que são madeiras de reflorestamento, Mogno (*Swietenia macrophylla*), Imbuia (*Ocotea porosa*) e Cerejeira (*Amburana cearensis*), que são madeiras nativas. Essa comparação é importante para compreender as diferenças de comportamento dessas espécies à usinagem.

² CETEMO – Centro Tecnológico da Madeira e Mobiliário - SENAI

Tabela 1 – Comparação entre as propriedades físicas de *Eucalyptus Grandis*, *Pinus Elliottii* e algumas espécies nativas brasileiras.

PROPRIEDADES FÍSICAS					
PROPRIEDADES	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Swietenia macrophylla</i>	<i>Ocotea porosa</i>	<i>Amburana cearensis</i>
Massa específica (15% de umidade) g/cm ³	0,68	0,48	0,63	0,65	0,60
Contração radial (%)	4,8	3,4	3,2	2,7	2,9
Contração tangencial (%)	10,6	6,3	4,5	6,3	6,2
Contração volumétrica (%)	17,5	10,5	8,6	9,8	9,3
Coefficiente de retratibilidade volumétrica	0,50	0,39	0,39	0,40	0,45
PROPRIEDADES MECÂNICAS					
Compressão axial					
. Limite de resistência (kgf/ cm ²)					
. Madeira verde	342	189	396	412	384
. Madeira a 15% de umidade	490	321	547	522	434
Flexão estática					
. Limite de resistência (kgf/ cm ²)					
. Madeira verde	763	489	821	326	329
. Madeira a 15% de umidade	1000	710	924	450	483
. Módulo de elasticidade (kgf/cm ²) (madeira verde)	128.500	90.200	108.700	90.000	108.800
. Limite de proporcionalidade	286	140	325	235	271
Cisalhamento – (kgf/cm ²) - madeira verde	98	59	111	98	97
Dureza Janka – (kgf/cm ²) - madeira verde	485	197	504	436	339
Tração normal às fibras - (kgf/cm ²) - madeira verde	64	31	61	68	54
Fendilhamento – (kgf/cm ²)-madeira verde	8,1	4,2	7,1	7,8	5,8

Fonte: COSTA (1996)

Segundo TOMASELLI (2000), a opção pelo *Eucalyptus Grandis* no Brasil está relacionada à excelente resposta silvicultural da espécie, como o rápido crescimento, além de propriedades desejáveis para usos múltiplos, como massa específica média, grã direita, fácil usinagem, boa aceitação de acabamento e cor levemente avermelhada.

ROCHA (2000) complementa que a espécie apresenta boa adaptação em quase todas as regiões do Brasil, com elevado potencial silvicultural e plantios em larga escala; as suas árvores apresentam boa forma, fornecendo toras adequadas para a produção de serrados; apresenta, ainda, uma massa específica ideal para a produção de artigos do mobiliário e embalagens agrícolas e industriais e já existe um grande interesse por parte das indústrias em utilizar sua madeira, a partir de plantios manejados para múltiplos usos. Todos os protótipos já construídos com madeira de *Eucalyptus Grandis* apresentaram excelentes resultados, mas, atualmente, a sua utilização intensiva gera apreensões devido à reduzida disponibilidade de madeira de qualidade no mercado, bem como a continuidade de suprimento.

2.4.2. Pinus Elliottii.

O *Pinus Elliottii* é um gênero da família botânica das *Pinaceae*, da classe das coníferas (Gimnospermas). É uma árvore de grande porte, podendo atingir de 30m a 50m de altura, dependendo da espécie. Segundo MIROV, apud KAGEIAMA e CASER (1982) o gênero *Pinus* provavelmente teve sua origem no norte da Eurásia ou no norte da América, há cerca de duzentos e cinquenta milhões de anos. A partir daí o gênero vem se dispersando pelos continentes europeus e asiáticos, chegando até a América Central e Caribe, onde se formou um centro secundário de evolução, do qual surgiram as incursões para a América do Sul.

PEREIRA (1987) relatou um histórico sobre a introdução do *Pinus* no Brasil. As primeiras coníferas foram introduzidas para fins ornamentais e, em seguida, para fins silviculturais. Posteriormente foram destinadas para suprir a redução de oferta de matéria-prima causada pelo intenso extrativismo nas reservas de Araucária (Pinho-do-Paraná), bem como para reduzir a dependência nacional de importação de celulose e resina, produtos obtidos a partir das coníferas. Com a lei nº 5106 de 1966, de incentivos fiscais, que deu origem ao zoneamento ecológico, a iniciativa privada passou a preponderar sobre o governo, e os reflorestamentos ganharam impulso expressivo.

2.4.3. Painéis de MDF.

Os painéis MDF são definidos pela ASTM-D1554 (1974) e por MALONEY (1996) como “painéis fabricados a seco, feitos com fibras lignocelulósicas combinadas com uma resina sintética ou outro agente ligante, compactados a uma densidade entre 0,50 e 0,80g/cm³ por prensagem a quente, num processo em que a totalidade da colagem entre as fibras é criada pelo adesivo adicionado”.

Conforme afirma ELEOTÉRIO (2000) uma característica favorável presente nos painéis MDF é a maior densidade nas faces. Esta maior densidade coincide com a região mais solicitada quando o painel trabalha sob o esforço de flexão estática. A menor quantidade de espaços vazios permite a pintura de maneira mais econômica e superfícies usinadas com menor rugosidade.

GRIGORIOU (1983) & SUCHSLAND *et al* (1978) concluíram que os painéis MDF apresentam maior estabilidade dimensional que os painéis de partículas ou aglomerados. Este fato é explicado pelo menor teor de umidade no equilíbrio com o

ambiente, pela estrutura dos painéis e pelo baixo potencial de sorção, conforme estudos atribuídos a NIEMZ & POBLETE (1996), JENSEN & KEHR (1995) e XU & SUCHSLAND (1991).

De acordo com uma classificação apresentada por BENADUCE (1998), os painéis MDF comparados com aglomerados, chapas duras e compensados, quando avaliados nas operações de corte, usinabilidade da borda, usinabilidade da superfície, torneamento, furação e operações de revestimento, apresentam desempenho superior às chapas duras.

Segundo NEVES (1998), espera-se um grande crescimento no consumo de painéis industrializados de madeira em relação à madeira maciça. Até 1997, o consumo de painéis MDF era baixo nos segmentos industriais brasileiros, devido principalmente, “ao desconhecimento das qualidades do produto e a recente entrada deste no mercado nacional”, TOMASELLI & DELESPINASSE (1997).

2.5. Principais processos de usinagem da madeira.

2.5.1. Processo de fresamento.

Em seu livro sobre usinagem da madeira, GONÇALVES (2000) cita, entre as operações mais importantes, o fresamento periférico e o serramento circular. Os movimentos relativos entre peça e ferramenta, no caso do fresamento periférico ou lateral, são classificados em fresamento discordante e concordante, classificação também adotada para usinagem de metais. Em todos os casos os conhecimentos da velocidade de corte, da velocidade de avanço, do ângulo de direção efetiva e do ângulo de direção de avanço, além das grandezas de percurso são importantes.

O fresamento envolve a remoção de cavaco em operação de desbaste ou acabamento da superfície. O conjunto do cabeçote com lâminas de corte, mais suportes de fixação e quebra-cavacos são de uso universal em máquinas de beneficiamento de madeira nos processos de aplainamento e fresamento nas mais variadas formas (rasgos, rebaixos, chanfros, molduramento em perfis, etc).

Outra modalidade é o fresamento por meio de ferramentas de corte denominadas fresas. Para efeitos dessa pesquisa foram utilizadas essas ferramentas

O processo de fresamento é considerado, por vários autores de trabalhos sobre usinagem da madeira, a operação mais importante em aplicações tais como confecção de peças e componentes de artigos do mobiliário e embalagens agrícolas e industriais de

madeira. Entre eles estão as pesquisas de BIANCHI (1996) & FARIAS (2000), sendo que o fresamento de perfil (perfilagem periférica e de topo), devido à diversidade de possibilidades de aplicações, é considerado o mais importante no segmento moveleiro.

Segundo BIANCHI (1996), como o movimento da lâmina de corte em relação à peça apresenta as componentes de velocidade de giro da ferramenta e avanço da peça, a resultante é um ciclóide, em geral alongado, pois a velocidade tangencial da ferramenta é superior ao avanço da peça. Como no caso dos metais, a usinagem da madeira por fresamento pode ser concordante ou discordante.

2.5.2. Processo de corte com uso de serras circulares.

Os processos de corte são realizados, principalmente, por serras circulares. As serras circulares apresentam uma grande variedade de diâmetros, espessuras, número de dentes e formatos dos dentes. Em regra geral, quanto maior o diâmetro do disco, maior sua espessura. São considerados discos finos aqueles que apresentam a espessura igual ou menor que o diâmetro dividido por 200 (GONÇALVES, 2000).

Quanto ao tipo, as serras podem ser classificadas em de dentes fixos e dentes postiços. As serras de dentes fixos são geralmente confeccionadas em aço carbono através do processo de estampagem, que define o formato dos dentes, os quais são posteriormente travados e afiados.

Quanto às serras de dentes postiços, vários modelos são fabricados para aplicações especiais, no entanto os mais comuns são os dentes com inserto de metal duro – carboneto de tungstênio, conhecido por pastilhas de “*widea*”. Existem também serras circulares cujos insertos são fabricados com diamante policristalino, este tipo de ferramenta possui custo mais elevado devido à natureza do inserto. O processo de fixação mais comum é a soldagem por indução com adição de lâmina de prata.

GONÇALVES (2000) apresenta alguns parâmetros de corte comumente empregados para serras de dentes fixos em aço carbono e serras de dentes soldados em carboneto de tungstênio. A velocidade de corte para aplicação geral em serramento circular de madeiras moles varia de 47 a 50 m/s. Para madeiras duras de 35 a 45 m/s.

O número de dentes é afetado pelo tipo de trabalho, acabamento ou desbaste, altura dos dentes, espécie de madeira, tipo de cavaco produzido, potência de corte necessária, velocidade de corte e velocidade de avanço.

O corte de madeira “verde” requer menor número de dentes do que para o corte de madeira seca em corte de acabamento. O corte transversal também requer um número de dentes maior que para o serramento circular. Para serras de serramento circular recomenda-se o uso de discos com 32 a 42 dentes e para serras destopadeiras de pêndulo, de 60 a 78 dentes. Quanto menos densas e com maior teor de umidade, menor é o número de dentes necessários para o corte. Para madeira de dicotiledôneas de média e alta massa específica, na condição seca, são utilizadas serras com 42 dentes.

A altura dos dentes depende do passo entre eles, a fim de garantir uma boa rigidez. Para isso, é recomendado manter a relação altura-passo entre 0,35 e 0,50. Quanto à potência requerida, esta aumenta à medida que aumenta o número de dentes para o mesmo diâmetro de disco. A velocidade de avanço, assim como outros parâmetros, é afetada por fatores como tipo de madeira, teor de umidade, potência disponível e altura de corte.

GONÇALVES & RUFFINO (1989) estudando os processos e parâmetros de corte para serrar madeiras concluíram que para discos de serras com dentes travados, velocidade de avanço entre 10 e 20 m/min, passos inferiores a 50 mm e cortes longitudinais de madeiras secas, há um decréscimo do número de dentes conforme cresce a altura de corte para diferentes diâmetros de disco.

2.6. Fatores relevantes para o melhoramento dos processos de usinagem da madeira.

Os fatores que possibilitam o melhoramento dos processos de usinagem da madeira podem ser divididos em duas categorias:

- a) Fatores cuja natureza envolve a geometria e material da ferramenta de corte.
- b) Fatores relacionados ao processo de usinagem, representados pelas condições de usinagem com que a madeira será submetida. Dentre esses fatores, pode ser citada a velocidade, avanço e profundidade de corte.

Assume-se assim que o primeiro grupo de fatores (a) é inerente à ferramenta de corte propriamente dita, ao passo que o segundo grupo (b) relaciona-se com parâmetros, condições de usinagem, natureza da operação e características da máquina-operatriz.

Conforme mostram as publicações de BAI, YAO *et al* (2002), KUSIAK *et al* (2004) & NOVEAU *et al* (2004) novas ferramentas de corte tem sido adotadas para o

processamento da madeira, principalmente ferramentas de corte cujos insertos são fabricados em diamante policristalino ou materiais relacionados.

Referente aos parâmetros relacionados com as condições de usinagem, conforme afirma LUCAS FILHO (2002), “há carência de informações sobre os mecanismos de desgastes envolvidos em diferentes combinações entre ferramenta de corte e peça processada”. A geração dessas informações facilita a produção de ferramentas mais adequadas para as diversas necessidades e para as diversas espécies de madeira.

2.6.1. Geometria da ferramenta.

Os estudos relacionados por STEMMER (2001) levaram a conclusão de que os conceitos são aplicáveis a todos os processos de usinagem e as correlações entre essas variáveis são válidas para todos os processos e todo o tipo de máquina ferramenta utilizada. Neste conceito genérico há uma definição das várias variáveis entre elas o ângulo entre a direção de avanço (ϕ), movimento resultante, direção resultante de corte e ângulo de direção resultante de corte (η).

Os ângulos formados pelos elementos da geometria da parta ativa ou gume cortante da ferramenta são definidos por um sistema de referência partindo de um ponto qualquer no gume, chamado sistema de ferramenta na mão.

A Figura 3 mostra os principais componentes de uma ferramenta que são necessários para a definição das propriedades geométricas.

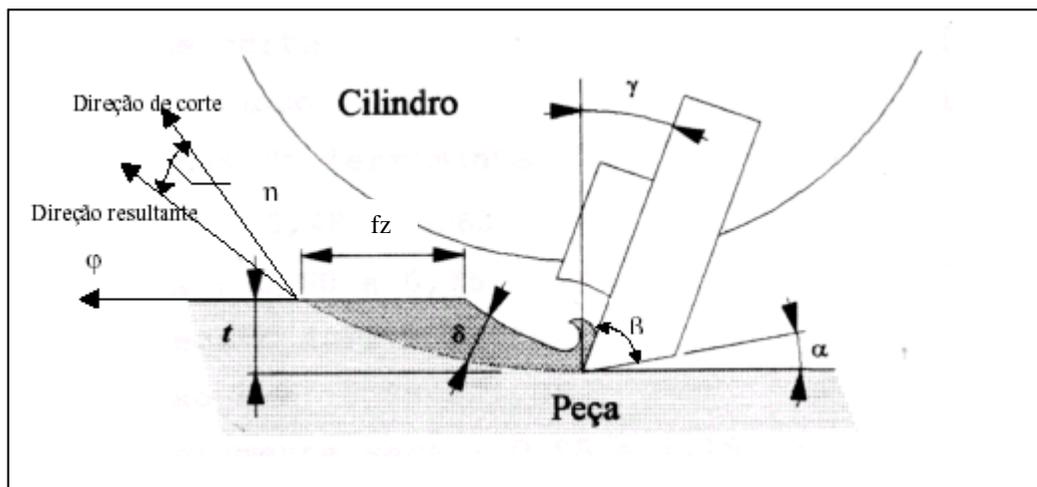


Figura - 3 - Elementos geométricos do gume da ferramenta (BIANCHI, 1996)

Vários autores mencionaram a importância de se conhecer as influências das características geométricas da ferramenta de corte. KIVIMAA (1952), McKENZIE (1962), KOCH (1964) entre outros afirmam que os ângulos de saída (γ), de cunha (β) e de incidência (α) possuem grande influência sobre o resultado do processo.

2.6.2. Grandezas de usinagem.

2.6.2.1. Avanço.

A grandeza de avanço (f) é a relação da dimensão do movimento, expressa em mm, por rotação ou curso, medido no plano de trabalho (STEMMER, 2001). O avanço por dente (f_z) é o percurso de avanço do gume, medido no plano de trabalho. A Figura 4 mostra as variáveis relacionadas às condições de corte importantes para o controle dos processos de usinagem.

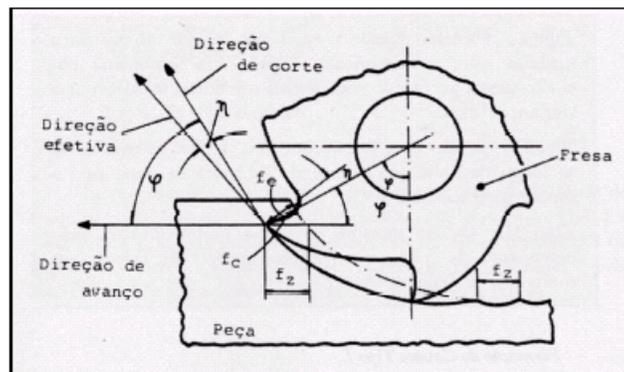


Figura 4 - Avanço da ferramenta sobre a peça. (GONÇALVES, 2000).

O avanço por dente é, por conseguinte, à distância entre duas superfícies de corte consecutivas, medida na direção de avanço, assim: $f_z = f/z$, onde z é o número de dentes ou gumes.

O avanço de corte f_c é a distância entre duas superfícies de corte consecutivas, medida no plano de trabalho e perpendicular a direção de corte: $f_c = f_z \cdot \text{sen } \varphi$. Quando $\varphi = 90^\circ$, como no caso do torneamento e aplainamento, $f_c = f_z = f$. O avanço efetivo f_e é a distância entre duas superfícies de corte consecutivas, medida no plano de trabalho e perpendicular a direção efetiva: $f_e = f_z \cdot \text{sen } (\varphi - \eta)$.

2.6.2.2. Profundidade de corte.

Outra grandeza importante é a penetração da ferramenta. Ela pode ser medida no plano de trabalho. A penetração pode ser passiva, de trabalho e de avanço. A penetração passiva (a_p) é a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. No fresamento e retificação frontal corresponde à profundidade de corte. No fresamento periférico corresponde à largura de corte. Na furação corresponde à metade do diâmetro da broca.

A profundidade de corte (a_e) é a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço (Figura 05). A penetração é importante nas operações de fresamento e retificação.

A penetração de avanço (a_f) é a grandeza de penetração da ferramenta, medida na direção de avanço.

A grandeza de penetração pode também ser medida em relação a uma aresta. Neste caso recebe o índice S. No caso da penetração do gume ser idêntica à da ferramenta este índice pode ser obtido.

A profundidade de corte do gume (a_{se}) é a quantidade que o gume penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicular a direção de avanço. A penetração de avanço do gume (a_{sf}) é a quantidade que a aresta penetra na peça, medida na direção de avanço.

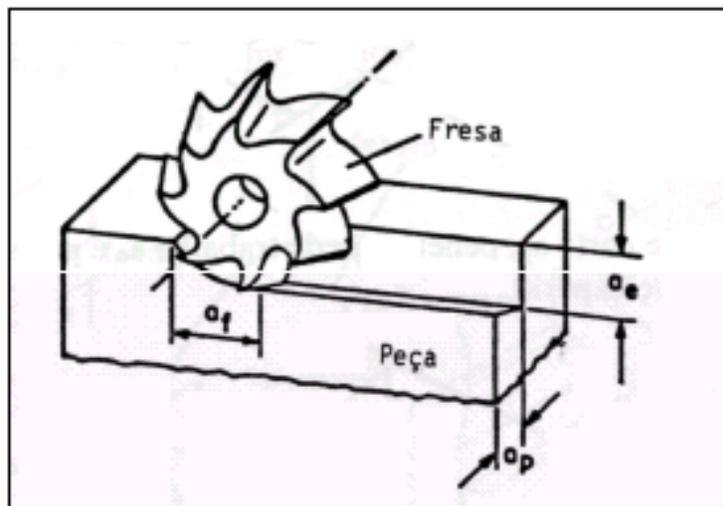


Figura 05 - Esquema ilustrando a profundidade de corte. FERRARESI (1971).

Segundo STEMMER (2001) as grandezas de usinagem descrevem as dimensões da camada de material a ser removido da peça. Elas são obtidas a partir do perfil do gume ativo, das grandezas de penetração e dos avanços.

Segundo GONÇALVES (2000) no serramento circular a espessura de corte corresponde à espessura do cavaco não deformado. KOCH (1964), além de outros pesquisadores, observou que numa dada situação de corte, alterando-se a espessura do cavaco, dois tipos de curvas de forças paralelas são geradas. Uma para cavacos de pequenas dimensões e outra para maiores espessuras de cavaco, com a curva apresentando uma forma aproximada de função linear de “ η ”. Dados experimentais obtidos por MACKENZIE (1964) *et al* conduziram a essas mesmas conclusões.

2.6.3. Materiais das ferramentas de corte.

Segundo STEMMER (2001) & BOEHS (1988) citados por FARIAS (2000), as ferramentas de corte necessitam possuir uma série de propriedades para atender às diferentes solicitações a que estão sujeitas. No caso da usinagem da madeira, são de particular interesse a resistência à abrasão, a tenacidade, a rigidez e a estabilidade química devido à possibilidade de oxidação da ferramenta. Mas, segundo os mesmos autores, no atual estado da tecnologia, nenhum dos materiais disponíveis no mercado cumpre todos esses requisitos simultaneamente, tornando-se necessário, portanto, uma solução de compromisso quando da seleção do material de uma ferramenta para uma determinada operação de usinagem. Para isso, é necessário identificar as exigências primordiais e as secundárias, de modo a escolher o material mais adequado a cada caso. No caso da usinagem da madeira, para cada tipo de operação existirão diferentes solicitações em diferentes graus de importância.

Para a operação de fresamento, por exemplo, as interrupções de corte no processo significam solicitações dinâmicas alternantes para a ferramenta, que eventualmente podem levar a formação de fissuras devido à fadiga e que podem levar a quebra do gume. Por isso, os materiais da ferramenta para fresamento, devem ter alta resistência do gume, resistência à abrasão, tenacidade elevada, resistência interna de ligação e comportamento de desgaste reproduzível (FARIAS, 2000).

BONDUELLE (2001) cita, ainda, a necessidade de uma boa resiliência, para resistir aos choques particularmente repetitivos durante a usinagem (resistência à fadiga) e uma estrutura metálica.

2.7. Planos de serramento circular da madeira.

McKENZIE (1964) propôs notação com dois números para descrever situações diferentes de corte que podem ocorrer durante o serramento circular da madeira. O primeiro representa o ângulo entre o gume da ferramenta e a fibra da madeira. O segundo indica o ângulo entre a direção de corte e a fibra da madeira. Esta notação define as três principais direções de corte chamados 90-0, 90-90, e 0-90. (Figura 6).

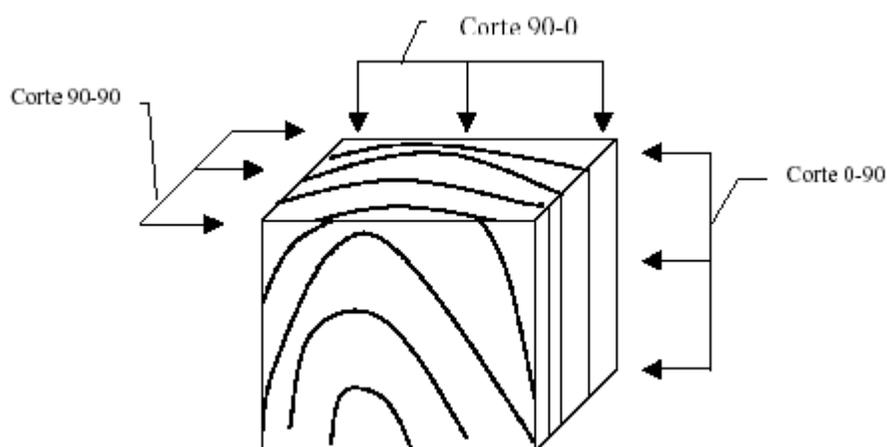


Figura 6 - Sistemas de corte na seção transversal da madeira (Baseado em KOCH, 1964).

2.7.1. Serramento circular 90-0.

Ocorre no processamento na direção paralela às fibras no sentido longitudinal da tora. As serras circulares quando são ajustadas para fazer ranhuras rasas e as plainas trabalham em uma situação bem próxima ao corte 90-0. No corte 90-0, observa-se a formação de três tipos distintos de cavacos (cavaco do tipo I, II e III), cujas nomenclaturas foram definidas por FRANZ (1958). A qualidade da superfície e os defeitos de usinagem estão relacionados com o tipo de cavaco formado.

2.7.2. Serramento circular 90-90.

O corte 90-90 ou corte perpendicular às fibras, é um tipo de corte muito utilizado na indústria de processamento de madeiras, tanto no desdobro primário quanto no desdobro secundário. As serras de fita, respigadeiras (máquinas que produzem as ligações por encaixe “macho-fêmea”) são exemplos de máquinas que trabalham com esse tipo de corte.

O cavaco no corte 90-90 é composto de um cordão de pequenos fragmentos retangulares de madeira o qual se denomina de falha (HOADLEY, 1980). O corte 90-90 exige maiores ângulos de saída da ferramenta, tendo em vista que ângulos pequenos deformam e flexionam drasticamente as fibras da madeira, deixando-as mal cortadas. Este procedimento minimiza os danos superficiais na peça usinada.

O corte longitudinal da serra de fita é um caso especial de corte 90-90. A serra de fita incorpora apenas parte da largura do elemento de corte, ou seja, a trava do dente, que é mais estreita que a peça de madeira a ser cortada. Desta maneira, além da formação do cavaco, o dente deve separar e cortar as faces laterais para passar livremente dentro da ranhura de corte. Para evitar o atrito da serra contra os lados do corte, seus dentes devem ter uma geometria especial na ponta, ou seja, a espessura da serra deve ser mais larga que a espessura da fita.

No caso das serras circulares, a condição de corte se aproxima ao tipo 90-90 quando a serra é utilizada em sua máxima altura, ou seja, quando a serra corta o mais próximo possível de sua parte central. No caso das folhosas, os cavacos para este tipo de corte são uniformes e superfícies melhor qualidade são obtidas com ângulos de saída elevados (30° a 40°), se a ferramenta de corte estiver bem afiada. Pequenos ângulos de saída produzem, normalmente, superfícies de baixa qualidade, quando o material usado é a madeira seca (WOODSON, 1979).

2.7.3. Serramento circular 0-90.

O corte 0-90 ocorre na direção radial – corte perpendicular às fibras. Em geral, as forças de cortes neste caso são menores que às aquelas aplicadas para o serramento circular 90-0. (WOODSON, 1979). A aplicação típica para esse tipo de corte é a laminação da madeira. Nesse sentido, uma vez que a ferramenta de corte esteja em condições de processo, o produto final do serramento circular 0-90 será uma lâmina contínua de material processado.

2.8. Tipos de cavacos oriundos dos processos de usinagem da madeira.

Em alguns tipos de processamento, a qualidade da superfície usinada tem grande importância no processo e, portanto, o estabelecimento de parâmetros que permitam seu monitoramento é fundamental. A qualidade da superfície usinada está associada ao tipo de formação do cavaco, o qual, por sua vez, está diretamente relacionado ao ângulo de saída da ferramenta, à espessura de corte e ao valor e direção da força normal. No corte 90-0 (corte paralelo), dependendo dos parâmetros de corte citados, podem ser obtidos três tipos distintos de cavacos.

2.8.1. Cavaco tipo I.

Formado quando as condições de corte são tais que a madeira rompe por fendilhamento em um plano à frente da ferramenta de corte e o cavaco se separa como uma viga engastada. As etapas de formação são: a) compressão paralela às fibras; b) abertura de fenda à frente da aresta-de-corte da ferramenta; c) ruptura por fendilhamento seguindo a direção da fibra; d) o fendilhamento continua até que os esforços de flexão se tornam o fator limitante e o cavaco se quebra como se fosse uma viga engastada; e) um outro ciclo se inicia. NÉRI (2002).



Figura 7 - Cavaco tipo I obtido no ensaio de serramento circular 90-0. Espécie: Eucalipto grandis, espessura de corte: 1,52 mm e ângulo de saída: $\gamma = 30^\circ$. (NÉRI, 1998).

2.8.2. Cavaco tipo II.

Formado quando a ruptura da madeira se produz ao longo de uma linha que se estende a partir da aresta-de-corte da ferramenta. Neste caso, a ruptura se dá por cisalhamento diagonal e forma um cavaco contínuo. Este tipo de cavaco se forma em condições limitadas. A ferramenta impõe à madeira uma compressão paralela e provoca

tensões de cisalhamento diagonais. À medida que o corte avança é formado um cavaco contínuo e levemente espiralado. O raio desta espiral aumenta à medida que a espessura do cavaco aumenta. Existe uma continuidade na formação deste tipo de cavaco que é o tipo ideal do ponto de vista de qualidade de superfície gerada na usinagem. NÉRI (2002).

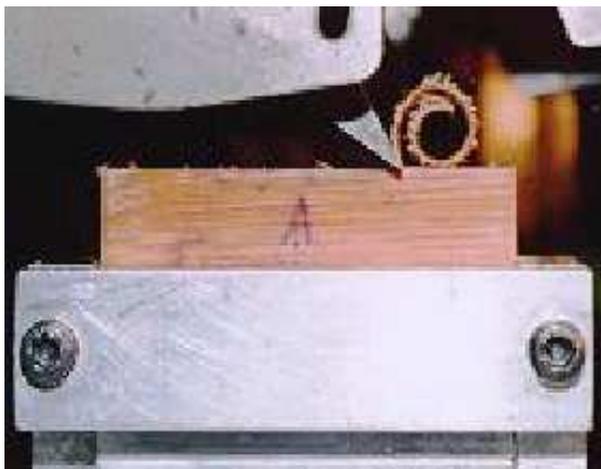


Figura 8 - Cavaco tipo II obtido no ensaio de serramento circular 90-0. Espécie: Eucalipto grandis, espessura de corte: 0,38 mm e ângulo de saída: $\gamma = 30^\circ$. (NÉRI, 1998).

2.8.3. Cavaco tipo III.

As forças de corte produzem rupturas por compressão paralela e cisalhamento longitudinal na madeira diante da aresta da ferramenta de corte. O cavaco é sem forma definida e reduzido a fragmentos. O cavaco tipo III é formado de maneira cíclica, tem dificuldade de se destacar da face de ataque da ferramenta e é, então, compactado contra esta face. Tensões são transferidas às outras superfícies que por sua vez serão também compactadas iniciando outro ciclo, NÉRI (2002)



Figura 9 - Cavaco tipo III obtido no ensaio de serramento circular 90-0. Espécie: Eucalipto Grandis, espessura de corte: 1,52 mm e ângulo de saída: $\gamma = 10^\circ$. (NÉRI, 1998).

2.9. Considerações sobre processos de usinagem em geral.

2.9.1. Fluido de corte.

Os fluidos de corte podem ser identificados como um artifício para a eliminação do calor gerado no processo de usinagem mecânica, o que se trata de um processo de refrigeração e uma metodologia para evitar a geração do calor, neste caso tratando-se de um processo de lubrificação. Os fluidos de corte podem ser classificados em três grupos, aéreos, aquosos e oleosos.

Os fluidos aéreos adotados na usinagem mecânica dos materiais são principalmente constituídos pelo ar. Possuem um efeito mais mecânico, pela remoção da material usinado da região de corte, que propriamente efeitos refrigerantes ou lubrificantes, entretanto são aplicados em alguns processos de usinagem, tal como o processo de usinagem de ferros fundidos.

Os fluidos de corte tipo aquosos podem ser classificados em dois grandes subgrupos, a água propriamente dita e as emulsões. A água praticamente não é utilizada nos processos de usinagem de materiais metálicos, é utilizada principalmente em processos de usinagem de rochas e alguns tipos de cerâmica e vidros.

As emulsões, mistura de óleo e água, possuem um alto poder de refrigeração, por ter como base água. Possui ainda efeitos lubrificantes devido aos óleos dissolvidos nesta mistura. Esses fluidos de corte aquoso-emulsionáveis são largamente empregados nos mais diversos processos de usinagem onde são envolvidos materiais metálicos ferrosos e não ferrosos.

Os fluidos oleosos são aqueles que basicamente se constituem por óleos de origem vegetal, mineral ou sintético. Podem ser classificados, ainda, como fluidos oleosos leves e pesados. De modo a possuir melhores efeitos lubrificantes, esses fluidos podem ser aditivados com substâncias especiais, tais quais compostos a base de cloro, enxofre e fósforo. A principal característica desses fluidos de corte, devido a sua natureza, é evitar a geração de calor, pelo efeito evidentemente lubrificante que possuem.

Conforme cita HEISEL (1998), a aplicação de fluidos de corte, durante os processos de usinagem, implicam em custos operacionais e impactos ambientais, sobretudo

quando se trata de fluídos de corte oleosos e emulsionáveis. Tal consideração deve ser levada em conta quando da definição do fluido de corte a ser aplicado nas operações de usinagem.

2.9.2. Calor oriundo do processo de usinagem.

Conforme menciona CALDEIRANI (1996), praticamente toda a energia mecânica associada à formação do cavaco, durante dado processo de usinagem, se transforma em energia térmica (calor). As fontes geradoras de calor no processo de usinagem são a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento, o atrito do cavaco com a ferramenta e o atrito da ferramenta com a peça em processo de usinagem. Pode se dizer, entretanto, que a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento são as principais fontes geradoras de calor.

A maior parte do calor gerado é dissipada pelo cavaco, sobretudo quando são aplicadas grandes velocidades de corte. Entretanto tal afirmação é válida apenas para materiais com grandes coeficientes de transferência térmica (h), o que dessa forma exclui a madeira, que possui o coeficiente de transferência térmica ao valor de $0,1 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$. Como comparativo, para o aço ABNT 1020 esse mesmo coeficiente tem valor de $50 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$.

O baixo coeficiente de transferência térmica da madeira significa dizer que o calor gerado durante o processo de usinagem não será eliminado pelos cavacos originados pelo processo nem se dissipará pela peça em fabricação, permanecendo e concentrando-se sobre as arestas da ferramenta de corte.

O aumento da geração de calor e, conseqüentemente da temperatura, acelera e é acelerado pelo desgaste da ferramenta, o qual aumenta o coeficiente de atrito e conseqüentemente da força de corte, implicando no aumento da potência de corte necessária para a realização da operação de usinagem.

2.9.3. Desgastes da ferramenta de corte.

Conforme mencionam MACHADO (1980) e DINIZ (2001), diversos tipos de desgastes ocorrem sobre as ferramentas de corte, dentre esses os principais são o desgaste frontal, o desgaste de cratera a deformação plástica, os lascamentos, trincas e a quebra.

Os principais mecanismos causadores do desgaste da ferramenta de corte são: a película de material residual processado, a abrasão mecânica, a aderência, a difusão e a

oxidação. Quando se trata da usinagem de madeiras os desgastes mais pertinentes são: o desgaste de flanco, a deformação plástica e as trincas de origem térmica. Para esses desgastes, os principais mecanismos causadores são, respectivamente, a aresta postiça de corte e a excessiva concentração de calor sobre as arestas de corte da ferramenta.

De acordo com DINIZ (2001), a aresta postiça de corte é uma camada de cavaco que permanece aderida à aresta de corte, modificando seu comportamento em relação à força de corte. Na usinagem de metais, conforme transcorre o processo, a aresta postiça de corte adquire suficiente resistência mecânica (encruamento) e aderência de modo que não se solta da aresta de corte, fazendo a função desta, durante o processo de usinagem, prejudicando o desempenho geral do processo.

O aumento da temperatura de corte ocasiona defeitos visíveis na madeira processada. Os principais efeitos observáveis a olho nu são traços de queimadura por onde ocorre a passagem da ferramenta de corte e a aspereza excessiva da parte usinada, característica particular de processos de usinagem que cujas ferramentas rompem bruscamente as fibras que compõe o material usinado. Esse último dano é ocasionado pela perda do fio-de-corte da ferramenta, conhecido também por desgaste de flanco, que acontece em função do aumento da carga térmica concentrada sobre o gume da ferramenta.

2.10. Usinagem da madeira *Eucalyptus Grandis* com aplicação de dióxido de carbono como fluido de corte.

Em pesquisas preliminares, GOZELOTO (2003), usou o dióxido de carbono na usinagem da madeira *Eucalyptus Grandis*. Os resultados sugerem que a adoção de um efetivo mecanismo de refrigeração da ferramenta de corte, de fato, pode retornar em resultados satisfatórios seja para a peça usinada, seja para a ferramenta de corte.

As pesquisas preliminares levaram em conta a operação de fresamento tangencial de corpos de prova cuja umidade era de 12%. As condições de ensaio estão relacionadas na Tabela 02.

Tabela 02. Parâmetros de usinagem para os ensaios preliminares

Parâmetro	Valor
Velocidade de corte	4710 m/min
Avanço	0,01mm/Z / 3 m/min

A Figura 10 mostra a montagem do experimento preliminar, (a) máquina-operatriz; (b) difusor de névoa carbônica; (c) corpo de prova; (d) cilindro de dióxido de carbono.

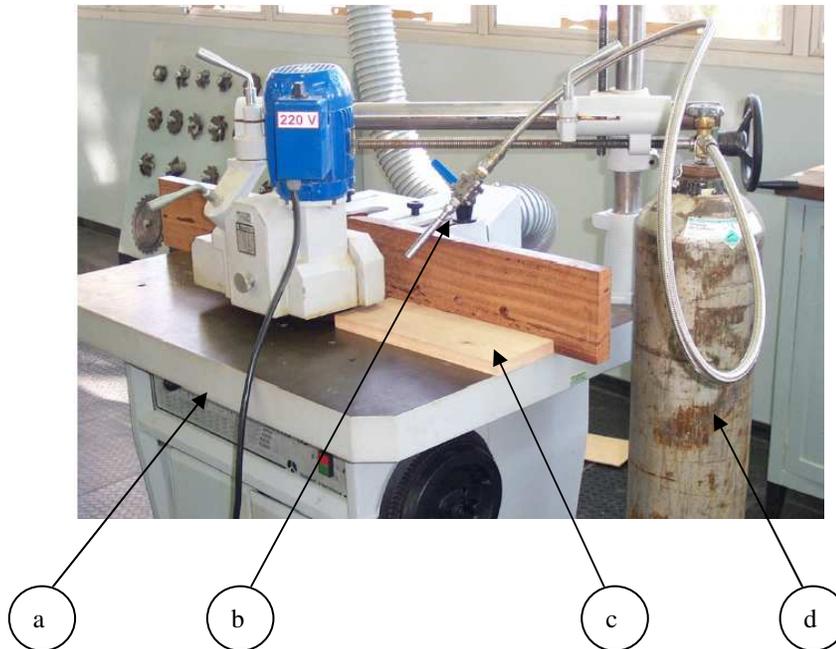


Figura 10 - Tupia modelo Rockwell-Invicta RS-15, em conjunto com o cilindro de CO₂ (GOZELOTO, 2003).

A Figura 11 mostra o mecanismo de refrigeração em funcionamento, onde se observa a saída de cristais de dióxido de carbono pelo difusor.

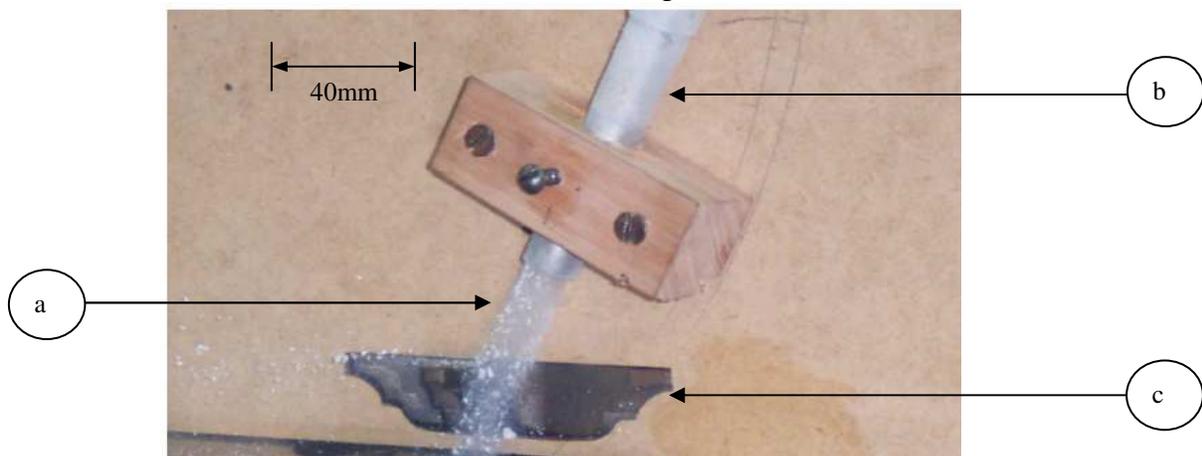


Figura 11 -. Névoa carbônica (a) expelida pelo difusor (b) em direção da ferramenta de corte (c). (GOZELOTO, 2003).

A Figura 12 mostra a ferramenta de corte utilizada para a usinagem da madeira, que não adotou o dióxido de carbono como fluido de corte, observa-se claramente a adesão de material e conseqüente formação da película de material residual processado.

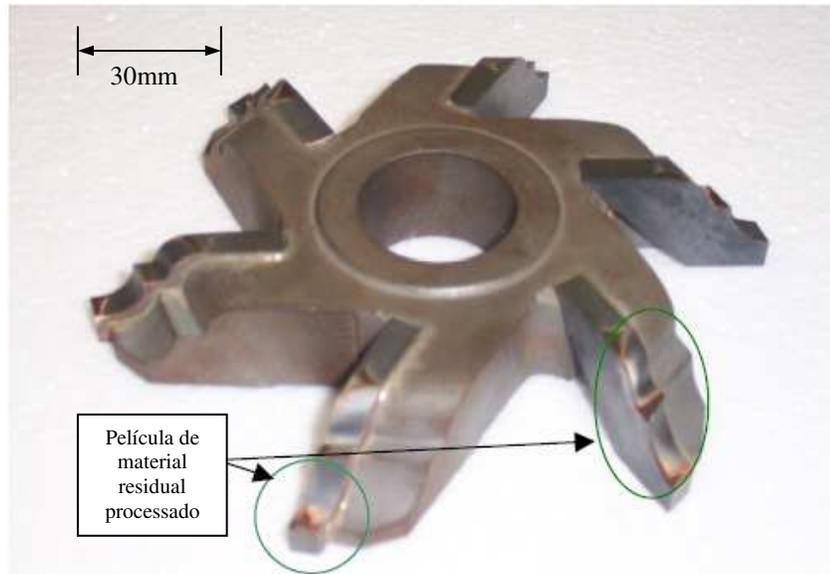


Figura 12 - Ferramenta de corte utilizada sem mecanismo de refrigeração com formação da película de material residual processado, (GOZELOTO, 2003).

A Figura 13 mostra o estado superficial do corpo de prova usinado com a ferramenta mostrada na Figura 12. Observa-se que o trajeto da ferramenta pela região usinada resultou em defeitos visíveis, como as partes carbonizadas destacadas na Figura.

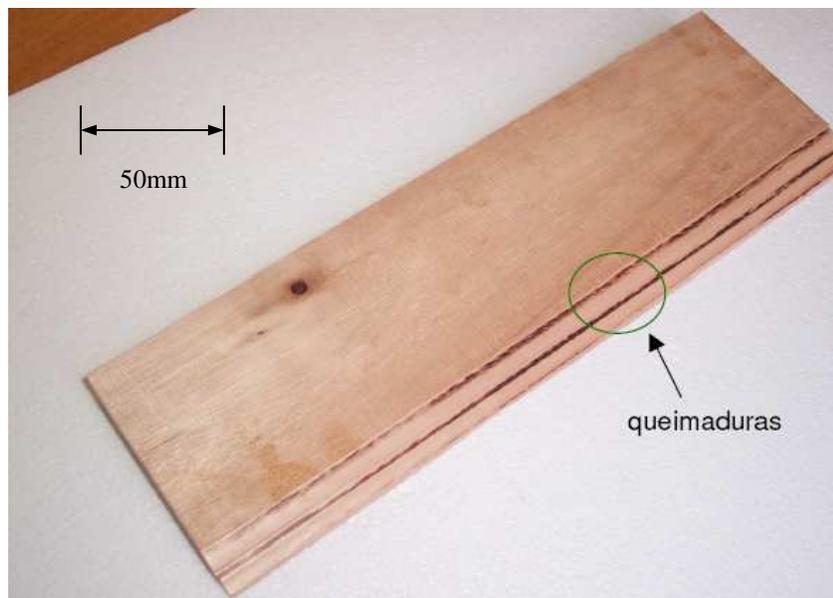


Figura 13 - Corpo de prova com defeito decorrente da usinagem da madeira sem mecanismo de refrigeração, (GOZELOTO, 2003).

A Figura 14 mostra a condição final da ferramenta de corte que foi utilizada com a adoção do mecanismo de refrigeração por dióxido de carbono.



Figura 14 - Ferramenta de corte utilizada **na qual não** se nota a formação da película de material residual processado.

A Figura 15 mostra a ausência de defeitos decorrentes do processo de usinagem. O corpo de prova exibido foi usinado com ferramenta refrigerada por dióxido de carbono.

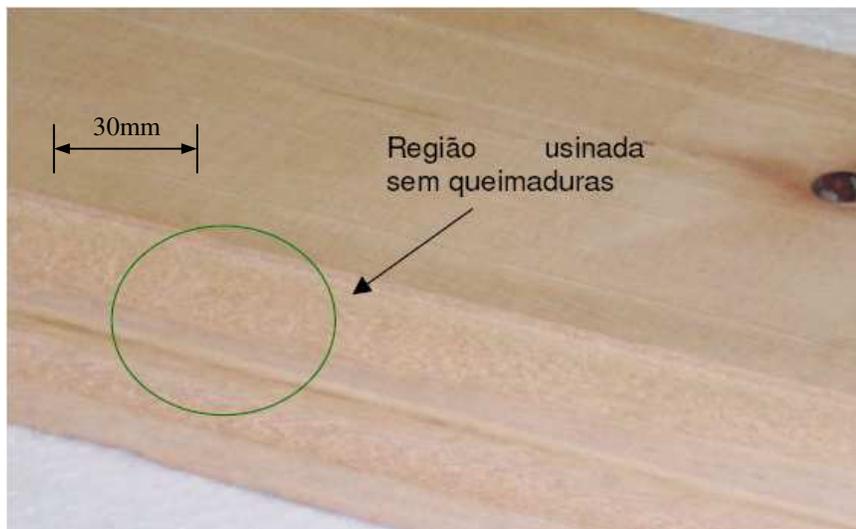


Figura 15 - Corpo de prova sem defeito decorrente da usinagem da madeira com mecanismo de refrigeração, (GOZELOTO, 2003).

Estes resultados preliminares, obtidos ainda de forma pouco organizada do ponto de vista do método científico e com pouca variação de parâmetros, impulsionaram a elaboração desta proposta de pesquisa em nível de doutorado.

2.11. Questões ambientais relacionadas com a aplicação de dióxido de carbono como fluido de corte.

O dióxido de carbono é um gás incolor e inodoro, levemente ácido. Pode ser produzido através da queima completa de matéria orgânica. Neste processo, os gases da combustão contêm, além do CO₂, vapor d'água, oxigênio, nitrogênio, monóxido de carbono e compostos de enxofre, que podem estar contidos na matéria prima. O CO₂ separado destes outros gases é purificado, comprimido e liquefeito para sua comercialização. No entanto, a forma mais econômica de se obter o CO₂ é recuperá-lo da atmosfera através de uma grande variedade de processos onde ele é subproduto. Acondicionado liquefeito em cilindros à pressão de vapor de 58,3 kgf/cm² man. a 21°C.

O dióxido de carbono é usado em equipamentos de refrigeração onde é evaporado para possibilitar o resfriamento do sistema. Grandes quantidades de CO₂ são também utilizadas para a fabricação de gelo seco, sendo que a maior utilização do gelo seco é preservar alimentos na distribuição. Este gás é também utilizado em atmosferas controladas para a preservação de alimentos embalados em latas ou sacos plásticos. Uma parte substancial do dióxido de carbono produzida no mundo é usada na carbonatação de refrigerantes e de água mineral com gás. Uma aplicação muito importante é a de agente extintor no combate a incêndios. É ainda utilizado, na inertização de tubulações para a transferência de materiais inflamáveis e para a inertização de materiais inflamáveis durante sua produção ou estocagem. O dióxido de carbono é utilizado também no tratamento de águas para a neutralização de efluentes alcalinos, como agente de proteção na soldagem de metais, em combinação com óxido nitroso na fabricação de chantilly e como propelente para alguns líquidos. Na área laboratorial, é utilizado em cromatografia supercrítica.

Embora o dióxido de carbono seja o gás que contribui para o efeito estufa, a adoção do mesmo, para os propósitos dessa pesquisa não provoca impacto ambiental, uma vez que, no balanço do processo, não está sendo gerada nenhuma molécula a mais do gás. Trata-se de um ciclo no qual o gás engarrafado é liberado em pequena quantidade e, ao se expandir, gera o processo de refrigeração desejado, sendo posteriormente novamente capturado da atmosfera.

Pelo exposto, conclui-se que há grande quantidade de referências bibliográficas que tratam dos temas relacionados com a usinagem da madeira, demonstrando ser tema de

importância. Apesar disso verifica-se que há carência de informações relacionadas com procedimentos de refrigeração da ferramenta de corte. Verifica-se, pela revisão, que a bibliográfica consultada concentra-se na parametrização dos processos de usinagem e na uniformização de seus procedimentos, deixando em aberto questões relacionadas com a formação da película de material residual processado e eventuais sistemas de remoção de calor originado do processo de usinagem. Dessa forma, a pesquisa se justifica e permite apresentar novas informações sobre a questão da refrigeração do processo de usinagem da madeira, com avaliações das conseqüências desse processo na qualidade da ferramenta de corte e no estado superficial da madeira processada.

3. MATERIAL E MÉTODOS.

3.1. Operação de serramento circular.

3.1.1. Material.

Os materiais adotados para o desenvolvimento da pesquisa foram madeiras de *Eucalypto Grandis* e de *Pinus Elliotti* e chapas de fibra de média densidade MDF. Esses materiais foram adotados por serem amplamente utilizadas na fabricação de artigos do mobiliário, embalagens agrícolas e em construção rurais.

O fluido de corte refrigerante utilizado durante a realização dos procedimentos de usinagem foi o dióxido de carbono aplicado na forma de névoa.

Para cada material (Eucalipto, Pinus e MDF), foram confeccionados 60 corpos de prova, com dimensões de 450x120x20 [mm] (Figura 16). As dimensões apresentadas foram arbitradas uma vez que não houve registro anterior relacionado com essa experimentação e a norma ASTM D1666-87 não menciona qualquer caracterização para esse tipo de ensaio.

De acordo com o planejamento estatístico da experimentação (detalhado no item 3.1.4), definiu-se um total de 48 corpos de prova para cada material. Corpos de prova adicionais foram confeccionados para eventuais substituições de corpos de prova invalidados por problemas operacionais durante a realização dos ensaios.

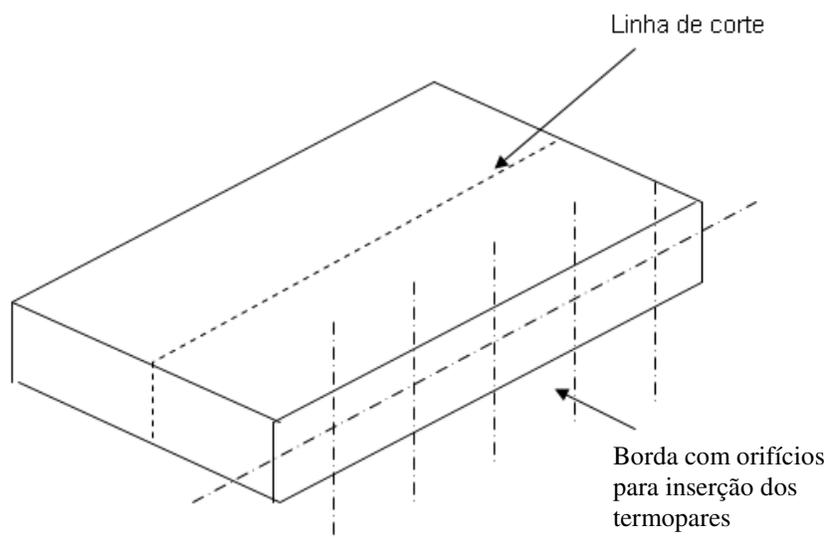


Figura 16 - Representação do corpo de prova para operação de serramento circular com serra circular.

Os corpos de prova foram preparados nas instalações da escola SENAI Luiz Scavone, localizada em Itatiba, SP.

Foram observadas condições tais como ausência de defeitos na estrutura do material e a ausência de deterioração por parte de fungos e outros agentes biológicos. Os corpos de prova fabricados em eucalipto e pinus foram retirados de modo que, durante a realização dos ensaios, a ferramenta cortasse o material perpendicularmente aos anéis de crescimento, correspondendo a um corte 90-90 (segundo a nomenclatura de Mckenzie, 1960). A Figura 17 ilustra essa concepção.

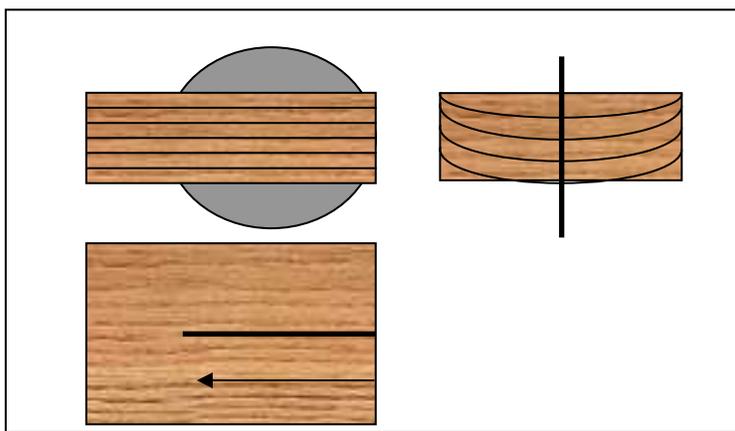


Figura 17 - Ilustração de como da orientação dos anéis em função da direção de corte.

Todos os corpos de prova foram climatizados de modo a ajustar a umidade em valores contidos entre $12\pm 1\%$. Para isso foi adotada a câmara climática, modelo Marconi MA-835/450UR, com controle de temperatura e umidade relativa (Figura 18).



Figura 18 - Câmara climática utilizada para ajuste de umidade dos corpos de prova.

Uma vez que os corpos de prova alcançaram a condição de umidade estabelecida, os mesmos foram submetidos à análise dimensional com o objetivo de calcular a densidade aparente. O cálculo da densidade aparente teve como objetivo verificar se a distribuição dessa característica encontrava-se dentro da normalidade e ainda averiguar a magnitude da dispersão dessa característica entre os corpos de prova.

Para a medição do volume dos corpos de prova foram utilizados dois instrumentos devidamente calibrados. O primeiro instrumento utilizado foi um paquímetro analógico com capacidade de medição de 0 a 500 [mm] e o segundo instrumento de medição foi um paquímetro com capacidade de medição de 0 a 300 [mm]. Ambos os instrumentos de medição possuíam resolução de 0,05 [mm]. O paquímetro com a escala maior foi utilizado para medir o comprimento dos corpos de prova, enquanto que o segundo foi utilizado para outras medições.

Ao fim da medição de cada corpo de prova, os mesmos foram acondicionados em embalagens plásticas seladas, de modo a preservá-los da influência do meio ambiente na umidade.

No momento do ensaio cada corpo de prova era retirado da embalagem e, na seqüência, eram feitas as furações em uma das bordas para encaixe dos termopares. A Figura 16 mostra o posicionamento das furações dos corpos de prova enquanto a Figura 19 mostra um corpo de prova com os furos já executados em sua borda para inserção dos termopares.

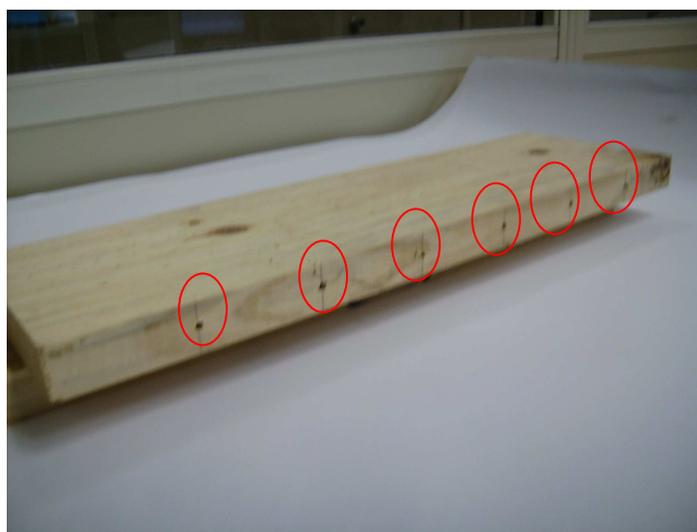


Figura 19 - Corpo de prova com furações (detalhe) para inserção dos termopares.

Após as furações os corpos de prova eram encaminhado para a realização dos ensaios, cujo detalhamento é apresentado no item 3.1.5.5.

3.1.2. Equipamentos.

A operação de usinagem foi realizada com as seguintes ferramentas, instrumentos de medição e máquina:

- Máquina operatriz (esquadrejadeira) com base horizontal deslizante em guias paralelas, potência de 7,5cv, alimentação trifásica 220V, conforme mostra a Figura 20.



Figura 20 - Máquina operatriz serra esquadrejadeira localizada nas instalações da Escola SENAI Luiz Scavone e utilizada para a realização dos ensaios.

- Serras circulares fabricadas em aço ABNT 1040 com 32 insertos em Carbetto de Tungstênio (WC), classe K-10, largura de 4 mm e altura de 8mm, diâmetro externo de 350mm e furo central de fixação de 20mm, conforme mostra a Figura 21.



Figura 21 – Serra circular.

- Termopares tipo K. Seis termopares de penetração e um termopar para tomada de temperatura ambiente. Adotou-se esse tipo de termopar em função de suas características técnicas, condizentes com o propósito de medição, uma vez que esse tipo de termopar (tipo K), é adequado para o monitoramento de temperaturas acima e abaixo de zero graus (Figura 22).

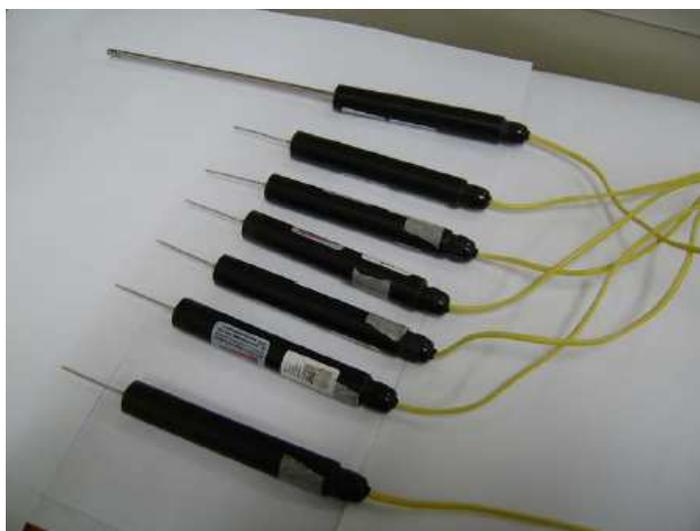


Figura 22 – Termopares tipo K.

- Termo-higrômetro Instrutherm modelo HTR 157, com escala para medição de umidade de 0% a 100% e temperatura de -40 °C a 200°C (Figura 23).



Figura 23. Termo-higrômetro.

- Interface para termopar modelo TC 08 com oito canais e saída USB (Figura 24).



Figura 24. Interface para termopar.

- Termômetro infravermelho com mira laser modelo TI 870, com faixa de medição de temperatura de -30°C a 800°C – Instrutherm (Figura 25).



Figura 25. Termômetro infravermelho.

- Medidor de vibração Instrutherm MV 670, com uma entrada para sensor tipo acelerômetro piezo-elétrico e saída para datalogger (Figura 26).



Figura 26. Medidor de vibração.

- Datalogger Instrutherm modelo CDR 510 (Figura 27).



Figura 27 – Datalogger.

- Rugosímetro modelo Mitutoyo Surftest SJ 211.1- (Figura 28).



Figura 28 – rugosímetro.

- Instrumentos de medição dimensional, paquímetro universal com resolução de 0,05mm.
- Cilindros com dióxido de carbono liquefeito.
- Dutos e Válvulas reguladoras de fluxo e pressão transporte do dióxido de carbono (Figura 31).



Figura 29 - Dutos e mangueiras.

- Laptop PC com processador de 1.8GHz, memória RAM de 256k, com sistema operacional Windows XP.
- Software Statgraphics para tratamento estatístico dos dados.
- Câmera digital.

3.1.3. Metodologia.

Foram destinadas duas serras circulares, conforme modelo apresentado na Figura 21, para a realização dos ensaios. Uma serra foi utilizada durante a realização dos cortes a seco dos corpos de prova e a outra para os cortes com o mecanismo de refrigeração. Esse procedimento foi realizado visando evitar que o desgaste da serra fosse um fator de interferência na avaliação do efeito da refrigeração.

Os corpos de prova foram submetidos à usinagem mecânica no equipamento esquadrejadeira (Figura 20).

Para a realização dos ensaios foram montados sistemas para:

- Monitoramento e medição da temperatura de usinagem interna dos corpos de prova.
- Medição da vibração do conjunto máquina-ferramenta-peça.
- Medição da umidade relativa próxima à região em processo de usinagem durante a usinagem propriamente dita.
- Medição temperatura externa e aos arredores da região em processo de usinagem.

Foram consideradas como variáveis de processo os seguintes fatores:

- Posicionamento da direção de aplicação do fluido de corte.
- Monitoramento da vazão do fluido de corte.
- Monitoramento da velocidade de corte da ferramenta.

Foram consideradas respostas dos experimentos os seguintes registros:

- A temperatura registrada pelos termopares inseridos nos corpos de prova, cuja unidade foi expressa em graus Celsius.
- A vibração registrada pelo instrumento MV 670, cuja unidade foi expressa em m/s.
- A temperatura externa nas proximidades da região de encontro da ferramenta de corte com o material processado, cuja unidade foi expressa em graus Celsius.
- A umidade relativa do ambiente próximo à região em processamento de usinagem, expressa em percentual.
- A rugosidade superficial dos corpos de prova usinados, sendo que para a realização dos experimentos desta pesquisa foram adotados os parâmetros de rugosidade média aritmética [Ra] e como complemento, a rugosidade máxima [Ry], cuja unidade foi expressa em μm .
- O estado superficial, em termos de rugosidade, dos insertos das ferramentas de corte empregadas nos ensaios, cujo parâmetro adotado foi a rugosidade média aritmética [Ra] e rugosidade máxima [Ry], expressas em μm .

Foram consideradas constantes dos ensaios as os seguintes parâmetros:

- A espessura (profundidade de corte) estabelecida em 20mm.
- A largura de corte, estabelecida em 5mm, equivalente à espessura dos insertos cortantes da serra circular.
- A velocidade de avanço da ferramenta de corte, estabelecida em 150mm/min, equivalente a 0,0013mm/inserto; 0,0010mm/inserto; 0,0008mm/inserto, respectivamente, para as velocidades de corte 3846,50; 4945,50 e 6044,50m/min. Essas velocidades de corte são muito inferiores às utilizadas normalmente em processos de usinagem industrial da madeira. A adoção das mesmas se deu para que os processos de desgaste das arestas de corte da ferramenta, em função de

maiores atritos, fossem acelerados, permitindo avaliação durante o período de ensaio.

- A umidade relativa dos materiais, estabelecida em $12 \pm 1\%$.

3.1.4. Planejamento experimental.

Para a realização do planejamento experimental foi utilizado o programa computacional Statgraphics v.4.1. O planejamento adotado foi o fatorial completo com uma réplica para cada experimento.

A Tabela 3 mostra os fatores, níveis, valores e código dos níveis adotados no planejamento experimental.

TABELA 3. Fatores e níveis do planejamento experimental com respectivos valores e codificação.

Fatores	Quantidade de níveis	Valor de cada nível	Código
Velocidade de corte	3	64,10 m/s	1
		82,50 m/s	2
		100,70 m/s	3
Vazão do fluido de corte	4	15g/min	1
		30g/min	2
		45g/min	3
		Sem fluido de corte	4
Direção do fluido de corte	2	Mesma direção do avanço da ferramenta	1
		Direção oposta ao avanço da ferramenta	2

A Tabela 4, inserida no ANEXO, mostra em detalhes a codificação do planejamento experimental.

3.1.5. Condução da usinagem dos corpos de prova – montagem dos sistemas de aquisição de dados.

3.15.1. Sistema para a medição de temperatura interna do corpo de prova durante os procedimentos de usinagem.

Foram inseridos, em cada corpo de prova, antes do início da usinagem, seis sensores de temperatura, termopares tipo K. Cada termopar foi inserido nos orifícios previamente executados em uma das bordas do corpo de prova, sendo equidistante o espaçamento entre os termopares. Cada termopar foi inserido com profundidade de 55 milímetros, sendo que cada furo executado no corpo de prova para essa finalidade tinha a profundidade de 56 ± 1 mm.

Os termopares foram inseridos nos corpos de prova conforme mostra o esquema da Figura 30.

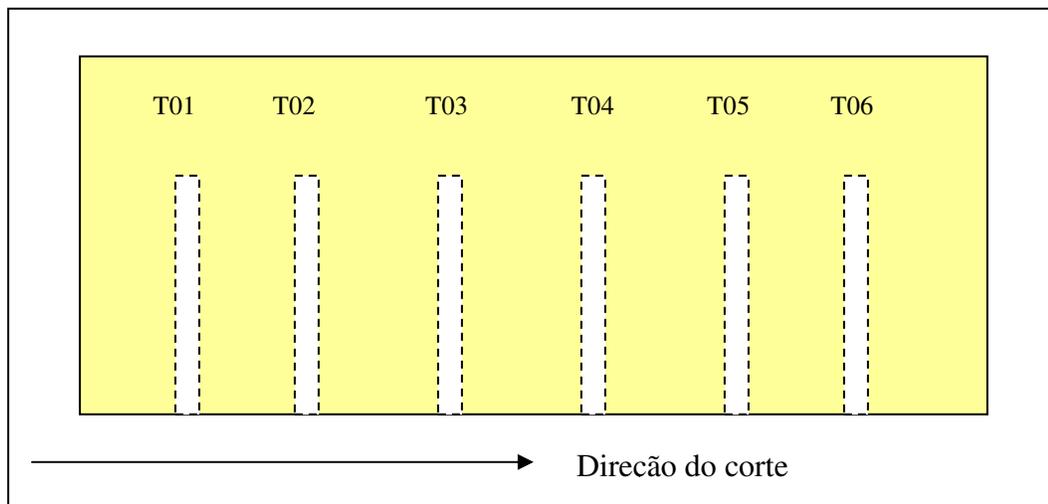


Figura 30 - Indicação de inserção dos termopares.

Uma vez que os termopares estavam inseridos no corpo de prova os mesmos foram conectados na interface para termopar (Figura 24). Por sua vez, a referida interface foi conectada ao laptop modelo Toshiba Satellite 1414, no qual foi previamente instalado o programa computacional Picolog technology, cujas funções eram adquirir, armazenar e gravar os dados obtidos do sistema de monitoramento da variável temperatura.

A taxa de aquisição de sinais provenientes do aparato mencionado foi de um sinal a cada 100ms por termopar. Como o experimento era composto por seis termopares foram

alocados seis canais para a realização da medição de temperatura interna durante os procedimentos de usinagem e ensaio dos corpos de prova.

A Figura 31 mostra a interface gráfica apresentada pelo programa computacional *Picolog technology* durante a configuração para aquisição de dados.

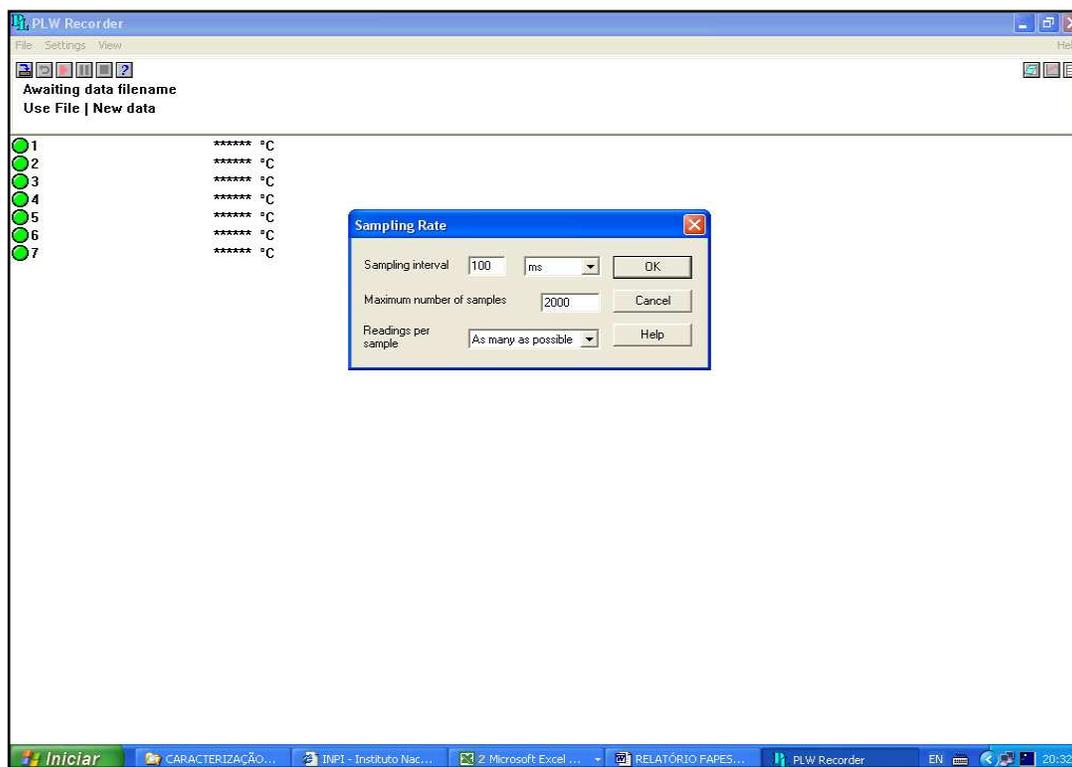


Figura 31 - Interface gráfica do programa computacional *Picolog technology*.

A Figura 32 mostra os termopares inseridos no corpo de prova, conectados na interface e a interface conectada no laptop. A Figura 33 apresenta um detalhe do corpo de prova e das conexões dos termopares.

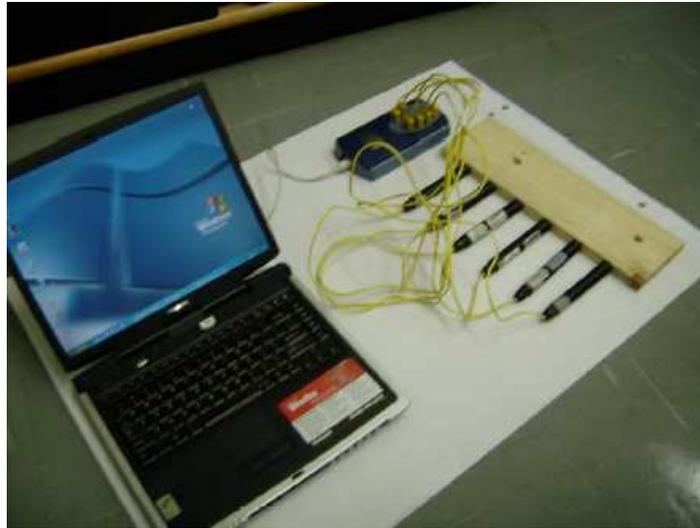


Figura 32 - Termopares inseridos no corpo de prova.

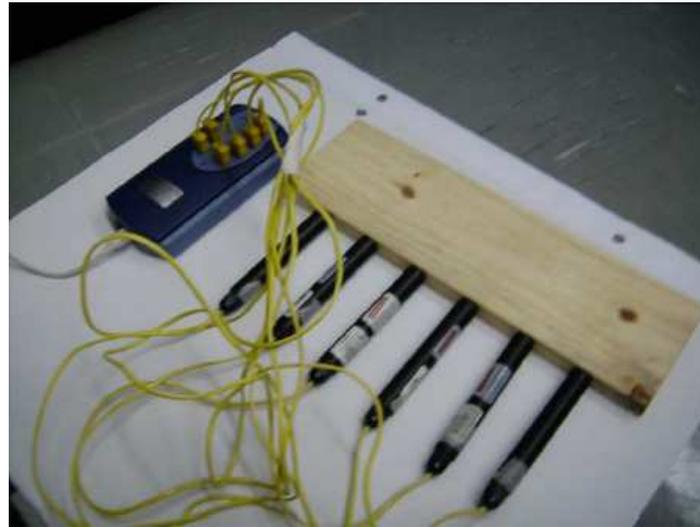


Figura 33 - Detalhe do corpo de prova e das conexões dos termopares.

3.1.5.2. Sistema para a medição da vibração do conjunto máquina-ferramenta-peça.

A vibração do sistema composto pela máquina operatriz, ferramenta de corte e corpo de prova foi medida por meio do medidor de vibração conforme Figura 26. Esse medidor tem como sensor um acelerômetro piezelétrico conectado ao dispositivo de medição propriamente dito. A unidade adotada para medição da grandeza em questão foi m/s e a taxa de aquisição de medição foi de um valor a cada segundo. Assim, o aparelho foi configurado de modo a registrar a cada segundo o maior valor encontrado de vibração.

O sensor de vibração foi fixado no corpo de prova a 225 mm de cada borda (em relação ao comprimento de 450mm), adotando assim a posição central e, em relação à largura, a 30 mm da borda onde estavam inseridos os termopares.

Os dados obtidos pelo medidor de vibração eram transferidos e armazenados em tempo real no datalogger Instrutherm modelo CDR 510. Posteriormente os dados armazenados eram transferidos para o computador, ordenados e acondicionados para análises estatísticas.

A Figura 34 mostra o medidor de vibração conectado ao *datalogger* e a Figura 35 apresenta um detalhe do posicionamento do sensor de vibração sobre o corpo de prova.

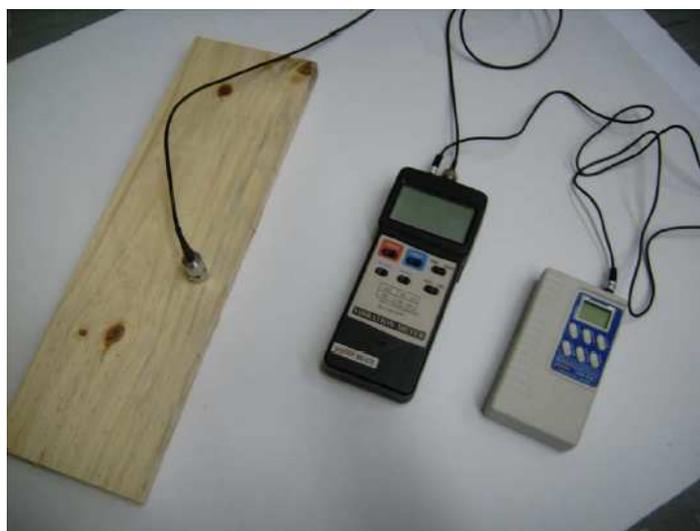


Figura 34 - Medidor de vibração conectado ao datalogger.



Figura 35 - Detalhe do posicionamento do sensor de vibração sobre o corpo de prova.

3.1.5.3. Sistema para medição da umidade próxima a região em processo de usinagem.

A umidade relativa do ambiente próximo à região em processo de usinagem foi monitorada com vistas a verificar eventual influência dessa condição sobre material processado. Para isso, foi acondicionado sobre o corpo de prova o termo-higrômetro. Esse instrumento registrou, a cada intervalo de 30s, a umidade relativa presente próxima à região em processo de usinagem.

A Figura 36 mostra o modo como o referido instrumento foi acondicionado para sua utilização.

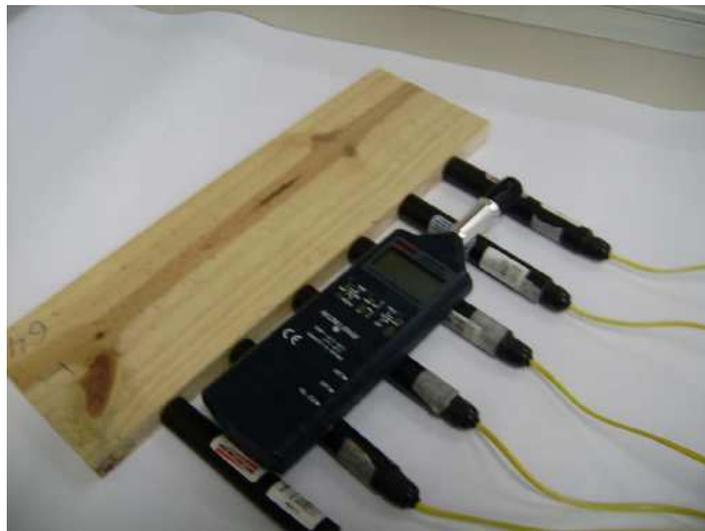


Figura 36 - Acondicionamento do termo-higrômetro.

3.1.5.4. Sistema para medição da temperatura externa e aos arredores da região em processo de usinagem.

A temperatura externa, nos arredores da região em processo de usinagem, foi medida de duas maneiras:

- Adotando-se o termômetro digital infravermelho com mira a laser.
- Utilizando-se termopar específico para medições de temperatura ambiente, conforme mostrado na Figura 37. Esse termopar foi conectado no sétimo canal da interface para termopares e a taxa de aquisição de dados para esse termopar foi igual a adotada para os demais termopares.

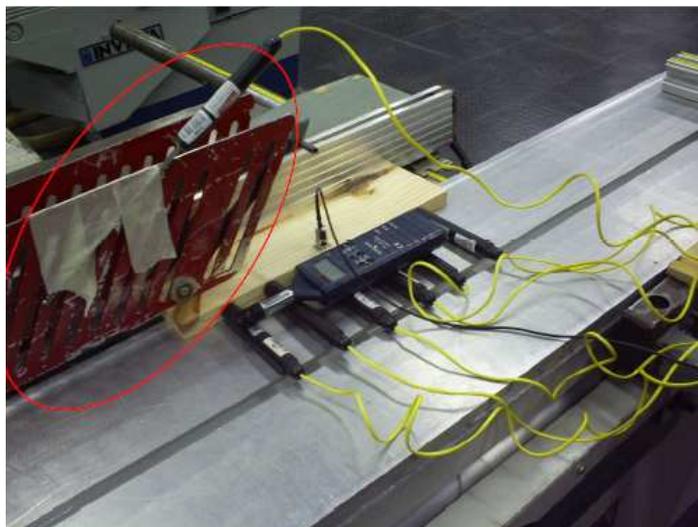


Figura 37 - Termopar específico para medições de temperatura ambiente.

3.1.5.5. Realização dos ensaios.

As Figuras 38, 39, 40, 41 e 42 mostram os sistemas montados durante a realização dos ensaios.



Figura 38 – Sistemas montados.

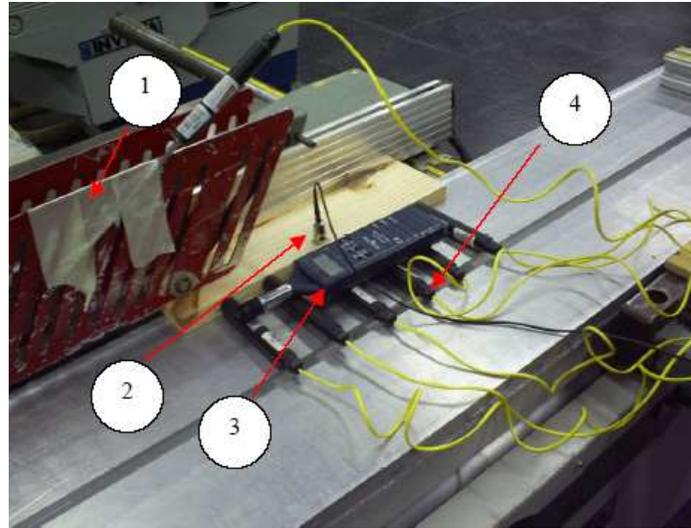


Figura 39 - Sistemas montados e em funcionamento. 1-) monitoramento da temperatura ambiente; 2-) monitoramento da vibração; 3-) monitoramento da umidade do ambiente; 4-) monitoramento da temperatura interna do corpo de prova durante o processo de usinagem.

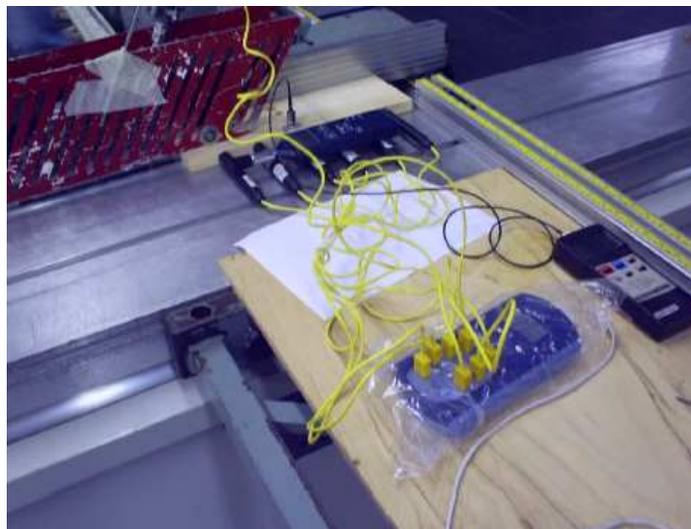


Figura 40 - Detalhe dos sistemas montados.

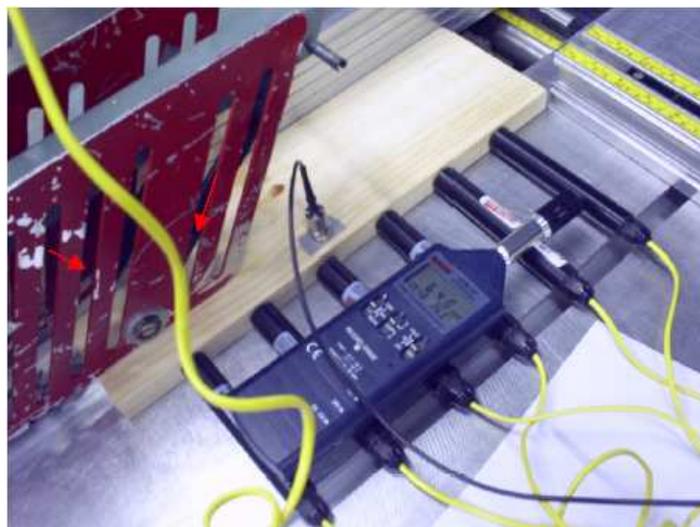


Figura 41 - Outro detalhe dos sistemas montados.

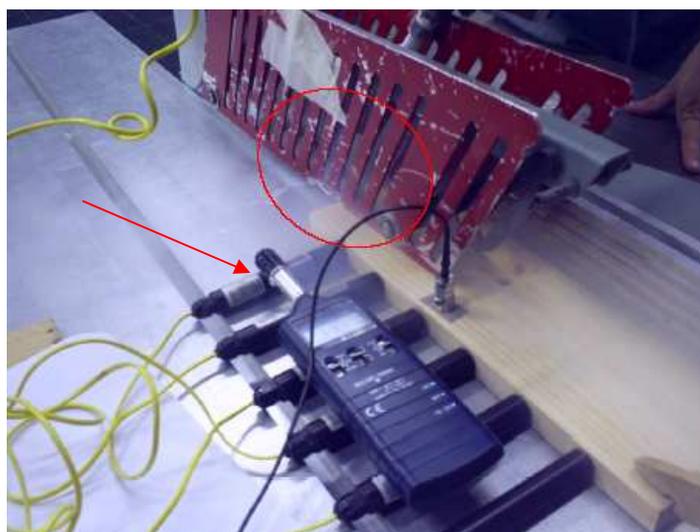


Figura 42 - Sistemas montados e em funcionamento. No detalhe vestígios da névoa carbônica.

3.1.5.6. Metodologia para medição da rugosidade dos corpos de prova após a usinagem.

Após a usinagem dos corpos de prova foi realizada a medição da rugosidade dos mesmos. Para essa finalidade, foram tomadas quatro medidas de rugosidade no sentido paralelo às fibras (para o caso das madeiras). Os parâmetros adotados foram a rugosidade média aritmética, R_a e rugosidade máxima, R_y .

A região definida para a tomada das medidas de rugosidade foi a região central do corpo de prova usinado, conforme ilustra a Figura 43.

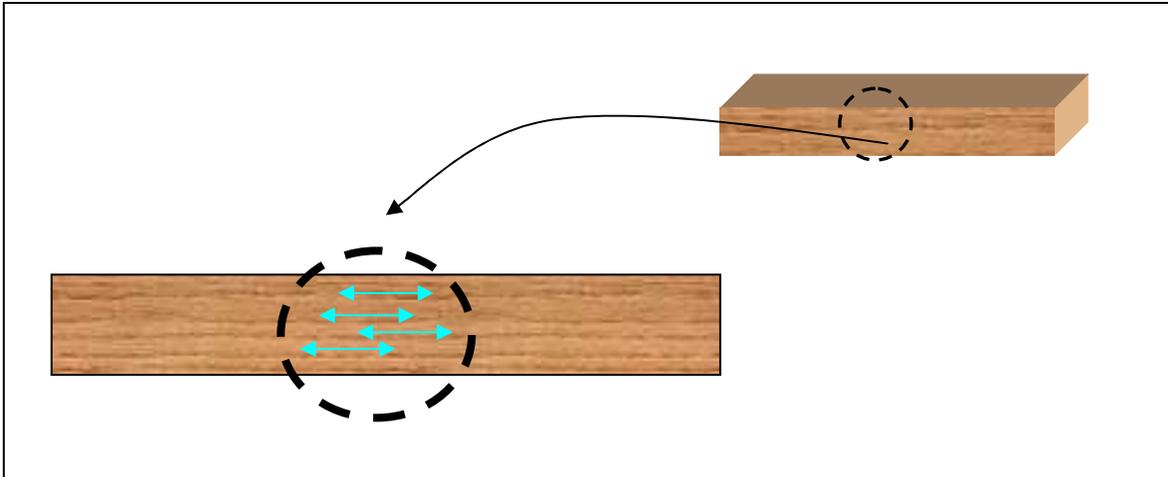


Figura 43 - Representação e indicação da região adotada para medição da rugosidade dos corpos de prova. As setas indicam o sentido da medição da rugosidade.

3.1.5.7. Metodologia de medição das avarias nas ferramentas de corte empregadas nas operações de usinagem.

Para esse propósito foram tomadas as rugosidades dos insertos das ferramentas. Adotou-se o mesmo modelo de rugosímetro usado para a medição das rugosidades dos corpos de prova. Foram avaliados 10 insertos de cada ferramenta (serra circular).

Foi feita também uma inspeção visual após a realização dos ensaios de modo a averiguar a formação da aresta postiça de corte sobre os insertos das ferramentas empregadas nos ensaios.

3.1.6. Avaliação estatística dos resultados.

Os resultados foram avaliados de maneira compatível com o planejamento experimental. O programa computacional utilizado para essa avaliação foi o Statgraphics v.4.1.

3.2. Operação de fresamento tangencial.

3.2.1. Material.

Os materiais adotados para essa operação foram das mesmas espécies adotadas para a operação de serramento. Da mesma forma, foram fabricados 60 corpos de prova, para essa operação e as dimensões dos corpos de prova foram 450x80x20 [mm].

O fluido de corte refrigerante utilizado durante a realização dos procedimentos de usinagem foi o dióxido de carbono aplicado na forma de névoa.

De acordo com o planejamento estatístico do experimento (detalhado no item 3.2.4), foram utilizados 48 corpos de prova para cada material. Corpos de prova adicionais foram confeccionados para eventuais substituições de corpos de prova invalidados por problemas durante a realização dos ensaios.

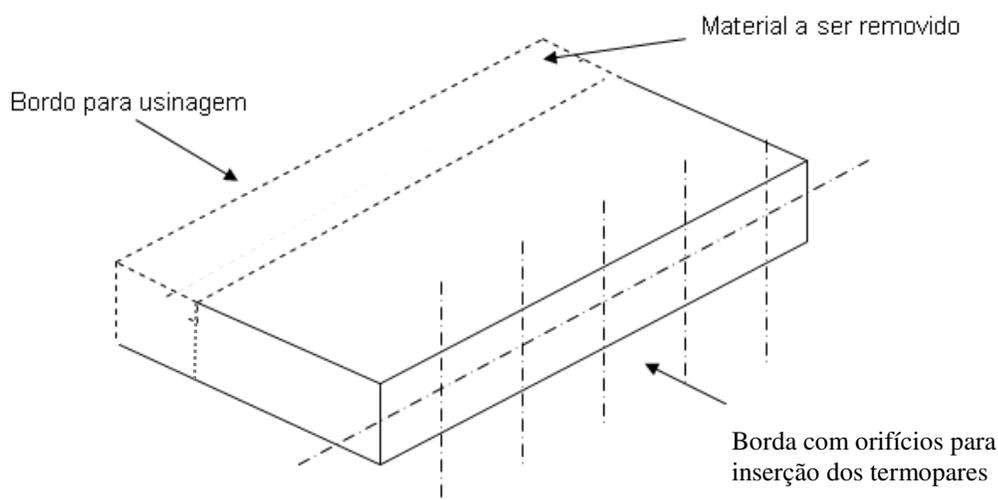


Figura 44 - Representação do corpo de prova para operação de fresamento tangencial com fresa perfilada.

Foram observadas condições tais como ausência de defeitos na estrutura do material e a ausência de deterioração por parte de fungos e outros agentes biológicos. Os corpos de prova fabricados em eucalipto e pinus foram retirados de modo que, durante a realização dos ensaios, a ferramenta cortasse o material paralelamente aos anéis de crescimento da madeira, correspondendo a um corte 90-0 (segundo a nomenclatura de Mckenzie, 1960). A Figura 45 ilustra essa concepção.

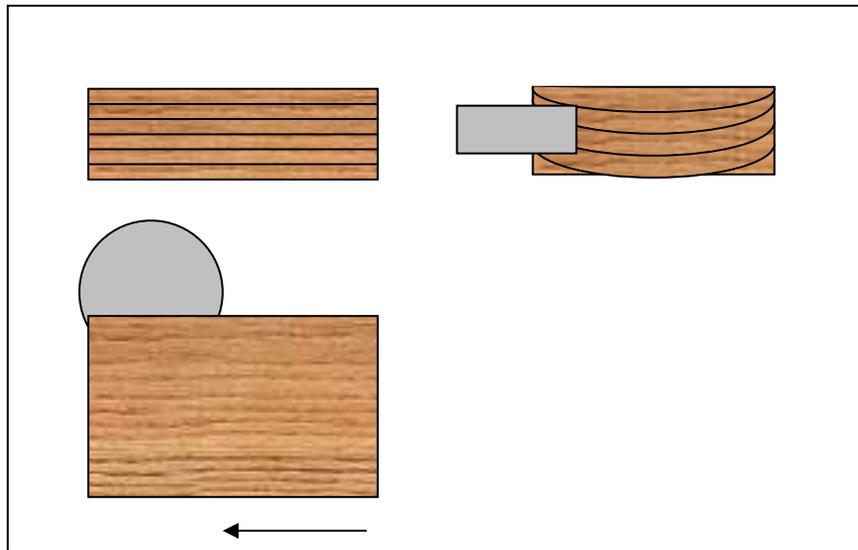


Figura 45 - Ilustração da orientação dos anéis em função da direção de corte.

Assim como os corpos de prova utilizados na operação de serramento circular, todos os utilizados para a execução dos procedimentos de usinagem de fresamento tangencial foram climatizados de modo a ajustar a umidade em valores contidos entre $12\pm 1\%$.

Uma vez que os corpos de prova alcançaram a condição de umidade estabelecida, os mesmos foram submetidos à análise dimensional com o objetivo de se calcular a densidade aparente individualmente de cada um, com vistas a verificar se a distribuição dessa característica encontrava-se dentro da normalidade e ainda averiguar a magnitude da dispersão dessa característica inerente aos materiais utilizados para a fabricação dos corpos de prova. Foram adotados os mesmos instrumentos de medição usados nos procedimentos descritos no item 3.1.1.

Ao fim da medição de cada corpo de prova, os mesmos foram acondicionados em embalagens plásticas seladas, de modo a preservá-los da influência do meio ambiente, enquanto esses não eram disponibilizados para a realização dos ensaios.

Da mesma forma empregada para os corpos de prova adotados nos procedimentos de usinagem de serramento circular, no momento da realização da operação de fresamento tangencial os corpos de prova eram retirados da embalagem e, na seqüência, eram feitos os furos em uma das bordas para encaixe dos termopares.

Uma vez que cada corpo de prova estava com os furos realizados em sua borda, esse era encaminhado para a realização dos ensaios, cujo detalhamento pode ser visto no item 3.2.5.1.

3.2.2. Equipamentos.

A operação de usinagem foi realizada com as seguintes ferramentas, instrumentos de medição e máquina:

- Máquina operatriz denominada fresadora de eixo vertical (tupia) com base horizontal e alimentador automático de avanço, potência de 7,5cv e alimentação trifásica 220V, conforme mostra a Figura 46.



Figura 46 - Máquina operatriz fresadora lateral (tupia), localizada nas instalações da Escola SENAI Luiz Scavone e utilizada para a realização dos ensaios.

- Fresa lateral fabricada em aço ABNT 1040 com 06 insertos em carbeto de tungstênio (WC), classe K-10, com largura de 20mm e altura de 15mm, diâmetro externo de 100mm e furo central de fixação de 20mm, conforme mostra a Figura 47.



Figura 47 - Fresa lateral com 6 insertos em carbeto de tungstênio (WC).

Os demais instrumentos, dispositivos e sensores foram os mesmos utilizados para a realização dos procedimentos de usinagem na operação de serramento circular, conforme Figuras 22 a 31.

3.2.3 Metodologia.

Foram destinadas duas fresas conforme modelo apresentado na Figura 47 para a realização dos ensaios. Uma fresa foi destinada para a realização dos cortes a seco dos corpos de prova e a outra para os cortes com o mecanismo de refrigeração. Esse procedimento foi realizado visando evitar que o desgaste da fresa fosse um fator de interferência na avaliação do efeito da refrigeração.

Os corpos de prova foram submetidos a usinagem mecânica no equipamento fresadora lateral (tupia) conforme mostrado na Figura 46.

Os mesmos sistemas de monitoramento e medição descritos no item 3.1.3 foram adotados para a realização da operação de fresamento tangencial.

Foram consideradas como variáveis de processo os seguintes fatores:

- A velocidade de corte da ferramenta.
- A direção de aplicação do fluido de corte.
- A vazão de fluido de corte.

As mesmas respostas descritas no item 3.1.3 foram consideradas para a operação de fresamento tangencial.

Foram consideradas constantes dos ensaios as os seguintes parâmetros:

- A profundidade de corte estabelecida em 15mm.
- A velocidade de avanço da ferramenta.
- A umidade relativa dos materiais, estabelecida em $12 \pm 1\%$.

3.2.4. Planejamento experimental.

Para a realização do planejamento experimental foi utilizado o programa computacional Statgraphics v.4.1. O planejamento adotado foi o fatorial completo com a arbitração de uma réplica para cada experimento realizado.

A Tabela 5 mostra os fatores, níveis, valores e código dos níveis adotados no planejamento experimental.

TABELA 5. Fatores e níveis do planejamento experimental com respectivos valores e codificação.

Fatores	Quantidade de níveis	Valor de cada nível	Código
Velocidade de corte	3	26 m/min	1
		39 m/min	2
		52 m/min	3
Vazão do fluido de corte	4	15g/min	1
		30g/min	2
		45g/min	3
		Sem fluido de corte	4
Direção do fluido de corte	2	Mesma direção do avanço da ferramenta	1
		Direção oposta ao avanço da ferramenta	2

A Tabela 06, no ANEXO, mostra o detalhamento da codificação do planejamento experimental.

3.2.5. Condução da usinagem dos corpos de prova - montagem dos sistemas de aquisição de dados.

Foram adotados os mesmos sistemas de aquisição de dados e metodologias para monitoramento de processo aplicados no item 3.1.5 e descritos nos itens 3.1.5.1, 3.1.5.2, 3.1.5.3, 3.1.5.4, 3.1.5.6, 3.1.5.7.

3.2.5.1. Realização dos ensaios.

As Figuras 48, 49, 50, 51 e 52 mostram os sistemas montados durante a realização dos ensaios.

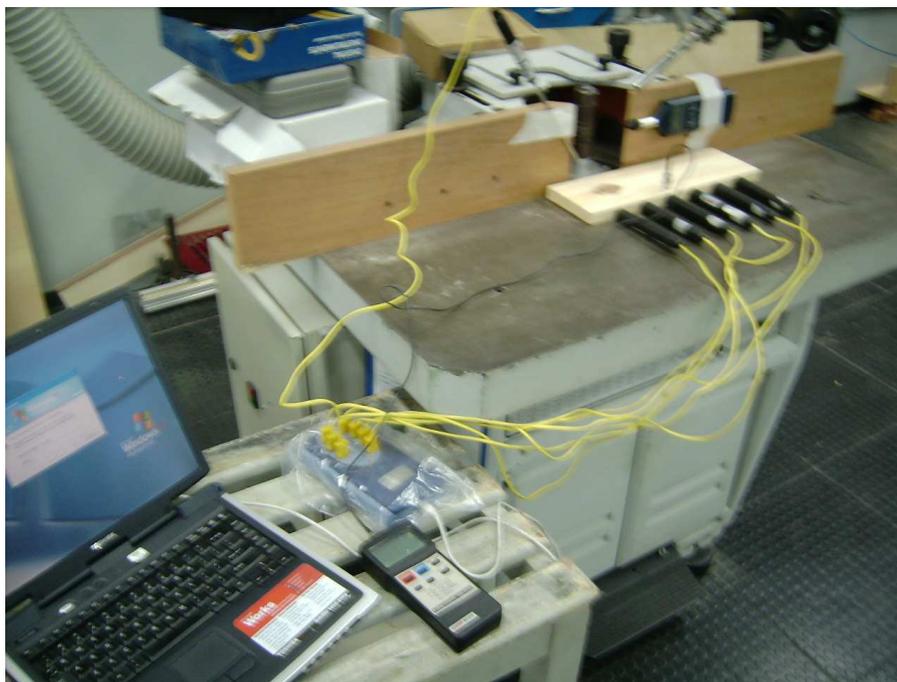


Figura 48 - Sistemas montados.

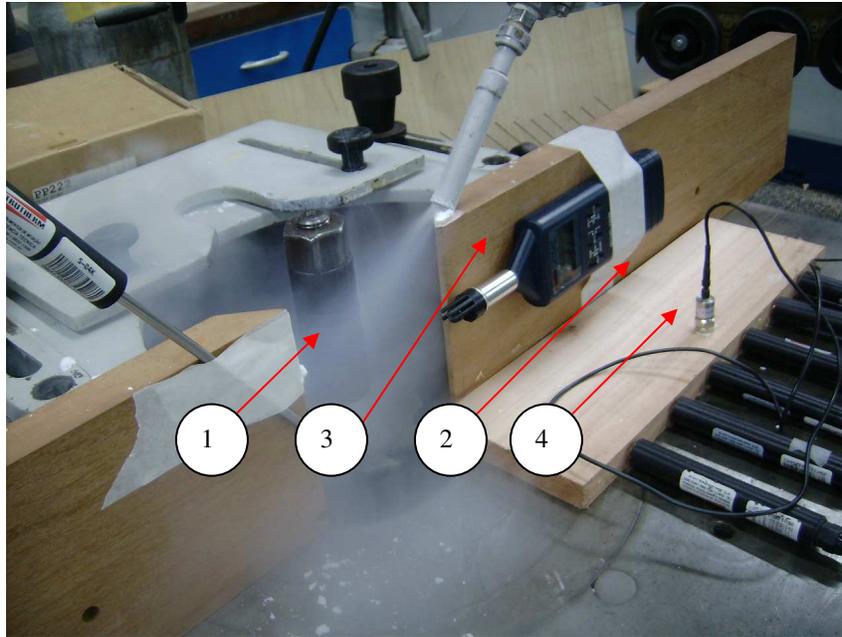


Figura 49- Sistemas montados e em funcionamento. Observam-se os quatro sistemas montados: 1.-monitoramento da temperatura ambiente; 2-monitoramento da vibração; 3-monitoramento da umidade do ambiente; 4-monitoramento da temperatura interna do corpo de prova durante o processo de usinagem.



Figura 50 - Sistemas montados – detalhe dos termopares.



Figura 51 - Névoa carbônica.



Figura 52 - Detalhe termo-higrômetro e sensor de vibração.

3.2.6. Avaliação estatística dos resultados.

Os resultados foram avaliados de maneira compatível com o planejamento experimental. O Programa computacional utilizado para essa avaliação foi o Statgraphics v.4.1.

4. RESULTADOS.

4.1. Eucalyptus Grandis – Operação de serramento circular.

4.1.1 Caracterização dos corpos de prova.

Na Tabela 7 do ANEXO são apresentados os resultados de medições nos corpos de prova utilizados nos experimentos realizados com a utilização de serras circulares.

A Figura 53 mostra histograma da densidade aparente dos corpos de prova fabricados em eucalipto grandis para a realização dos ensaios.

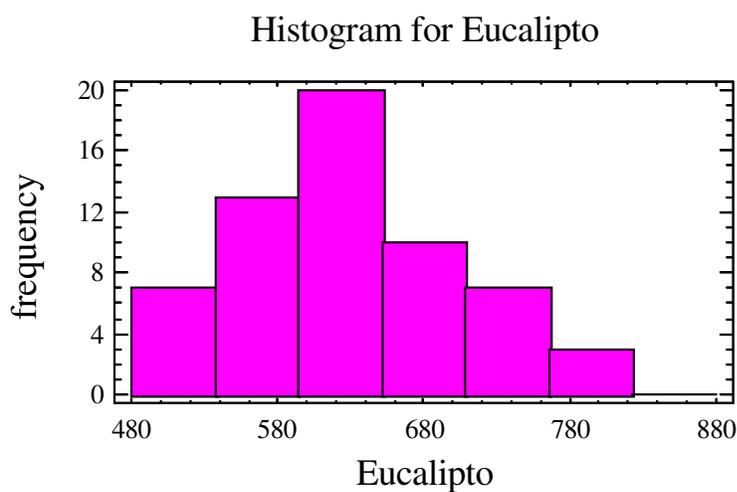


Figura 53. Histograma da densidade aparente dos corpos de prova de eucalipto.

A Tabela 08 apresenta o sumário estatístico referente aos corpos de prova fabricados em eucalipto grandis relacionado com a densidade aparente dos corpos de prova.

TABELA 08. Sumário estatístico para os corpos de prova de eucalipto - densidade aparente dos corpos de prova.

Estatístico	Valor
Contagem	60
Variância	5232,82
Mínimo	502,71
Máximo	769,72
Média	626,57
Desvio padrão	72,34
Amplitude	267,01
Curtose padrão	-1,29
Alisamento padrão	1,00
Coefficiente de variação	11,54%

Dentre os materiais processados, o eucalipto grandis apresentou maior densidade aparente (valor médio de 626,57kg/m³) e maior coeficiente de variação da densidade (11,54%). Os resultados apresentados pela Tabela 8 evidenciam a distribuição normal dos valores de densidade dos corpos de prova utilizados nos experimentos

4.1.2. Resultados pertinentes aos materiais usados - monitoramento da temperatura.

A temperatura oriunda do processo de usinagem dos corpos de prova foi monitorada conforme sistema especificado no capítulo 3. O propósito da medição foi averiguar a eficiência do sistema de refrigeração e determinar a melhor condição para aplicação desse sistema.

Cada termopar inserido no corpo de prova registrou entre 1800 a 2000 sinais. O intervalo entre cada aquisição foi de 100ms e foram considerados para análise os primeiros 1800 sinais.

Os resultados adquiridos pelos termopares foram analisados por termopar individualmente. Assim, foram feitas 18 análises estatísticas (seis termopares com três velocidades de cortes diferentes) que compararam as médias dos valores obtidos para cada

termopar em função das condições de usinagem com as quais os corpos de prova foram usinados. As análises foram agrupadas em função da velocidade de corte adotada para a realização dos ensaios.

Foram agrupados os valores obtidos de cada termopar. As condições são apresentadas em códigos, [x, y, z] onde “x” indica a velocidade de corte, “y” de CO₂ e “z” indica a direção de aplicação do fluido de corte. Todos os códigos estão de acordo com o planejamento experimental apresentado. Os valores para “resposta” estão apresentados em °C.

A Tabela 9 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada e relacionada com a velocidade de corte de **3846,50m/min**. Os valores anotados em azul indicam as condições que apresentaram menores temperaturas durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maiores temperaturas durante o processo de usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de aproximadamente 2%.

TABELA 9 – Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	111	112	121	122	131	132	141	142
1	23,10	23,20	22,60	23,20	20,71	20,95	24,78	25,10
2	23,97	24,01	23,35	22,61	20,81	21,75	25,42	24,41
3	22,71	24,00	23,39	23,20	22,05	21,76	25,45	24,05
4	22,62	23,18	23,20	21,19	20,78	21,78	24,01	24,05
5	22,62	23,19	22,60	23,20	20,78	21,48	25,19	24,38
6	23,01	23,20	22,40	22,65	21,21	21,03	24,42	25,21
Coeficiente de variação	2%	2%	2%	3%	2%	2%	2%	2%

A Tabela 10 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada e relacionada com a velocidade de corte de **4945,50m/min**. Os valores anotados em azul indicam as condições que apresentaram menores temperaturas durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de usinagem. O

coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de aproximadamente 3%.

TABELA 10 - Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	211	212	221	222	231	232	241	242
1	23,20	24,60	21,41	24,21	21,18	20,95	25,00	25,10
2	23,18	24,47	22,85	22,50	22,71	21,87	24,45	25,00
3	23,60	22,50	24,42	22,90	22,05	23,31	25,18	25,02
4	22,41	22,58	22,21	22,81	22,01	21,91	25,02	24,19
5	23,40	23,91	22,51	22,91	24,07	22,70	24,00	24,38
6	23,20	22,91	22,53	22,91	22,61	22,69	24,10	24,50
Coeficiente de variação	2%	4%	4%	3%	4%	4%	2%	2%

A Tabela 11 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada relacionada com a velocidade de corte de **6044,50m/min**. Os valores anotados em azul indicam as condições que apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de aproximadamente 2%.

TABELA 11 - Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	311	312	321	322	331	332	341	342
1	22,95	24,61	21,20	22,05	21,01	21,62	25,50	24,45
2	22,87	24,59	21,22	22,05	21,05	21,61	25,52	24,51
3	24,43	24,58	22,95	23,01	21,61	21,31	25,19	24,61
4	24,40	24,61	22,83	23,02	21,61	21,39	25,09	24,59
5	24,12	24,10	22,19	23,03	21,12	21,60	26,81	25,40
6	23,02	24,43	21,18	22,02	21,04	21,21	25,01	24,22
Coeficiente de variação	3%	1%	4%	2%	1%	1%	3%	2%

Os resultados apresentados pelas análises dos valores obtidos pelos termopares, relacionados nas Tabelas 09, 10 e 11, levam as seguintes considerações:

- Para as três velocidades de corte adotadas os menores valores de temperatura foram obtidos com a vazão de 45g/min de dióxido de carbono aplicado no mesmo sentido de corte da ferramenta. (131; 231; 331).

- Quando a vazão do fluido de corte era reduzida para outros níveis, a temperatura aumentava.

- Fica evidenciado que a adoção do mecanismo de refrigeração reduz o valor de temperatura na região em processo de usinagem. Sempre a usinagem a seco retornou em maior aquecimento da região em processo de usinagem. (141; 241; 341 e 142; 242; 342). A redução foi em torno de 4,5 °C, considerando as condições críticas destacadas.

4.1.2.1. Avaliação dos fatores e níveis relacionados com a temperatura de usinagem.

Com base no planejamento experimental citado no item 3.1.4, foram feitas as análises de significância dos fatores velocidade de corte, vazão e direção de aplicação do fluido de corte. A análise foi feita para todos os termopares, cada qual apresentada individualmente.

Termopar #1.

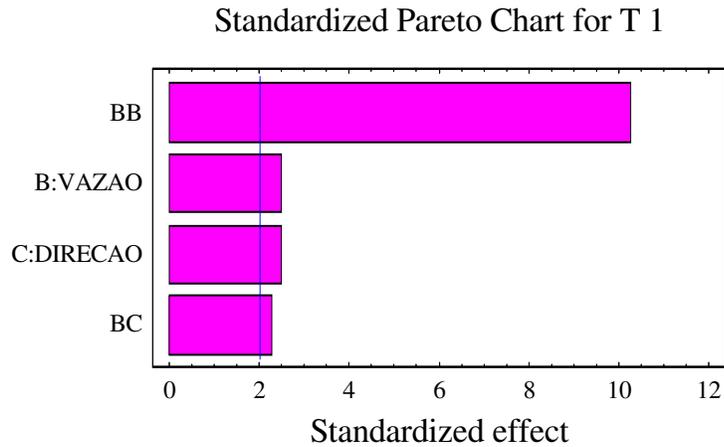


Figura 54 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #1.

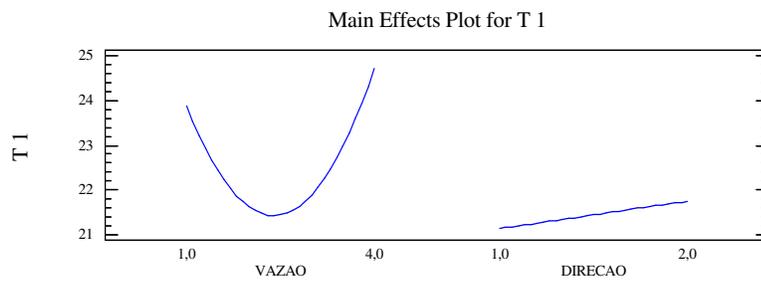


Figura 55 - Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #1.

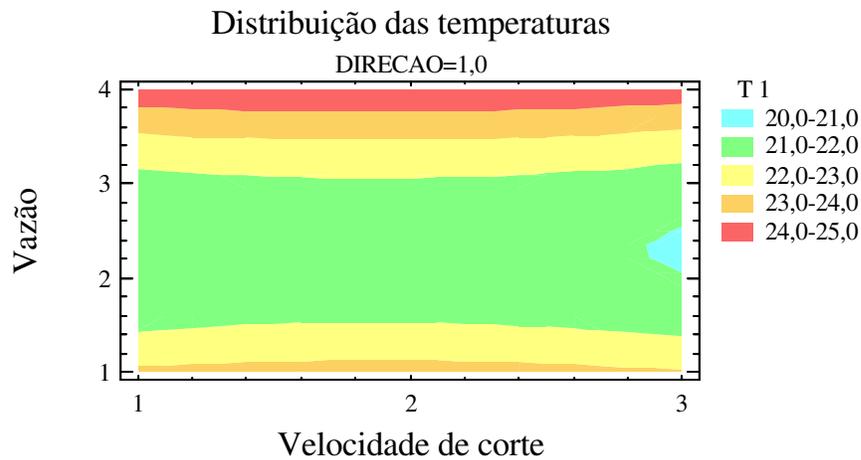


Figura 56 - Distribuição das temperaturas. Termopar #1.

Termopar #2.

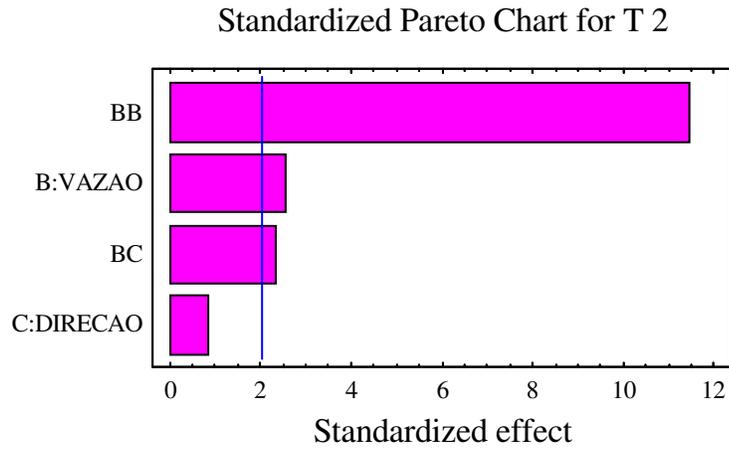


Figura 57 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #2.

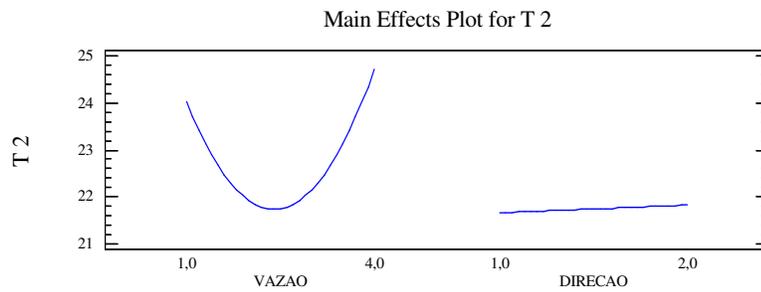


Figura 58 - Comportamento dos efeitos principais relacionados com o termopar #2.

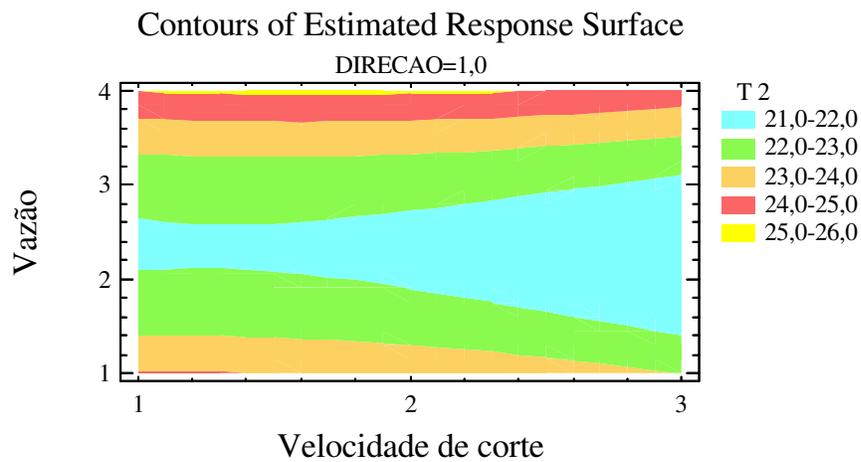


Figura 59 - Distribuição das temperaturas. Termopar #2.

Termopar #3.

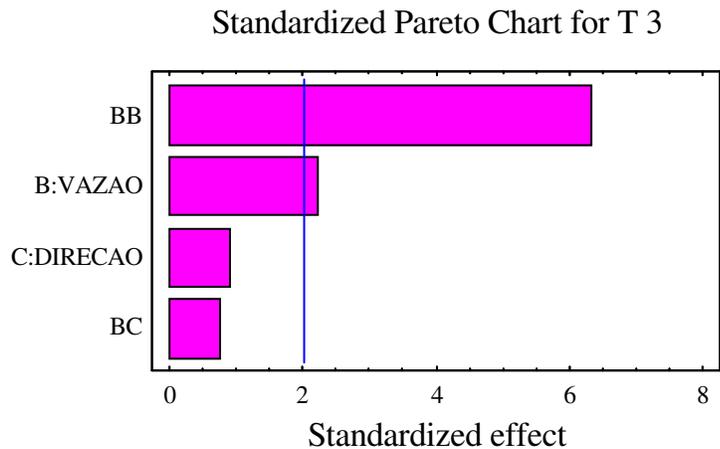


Figura 60 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #3

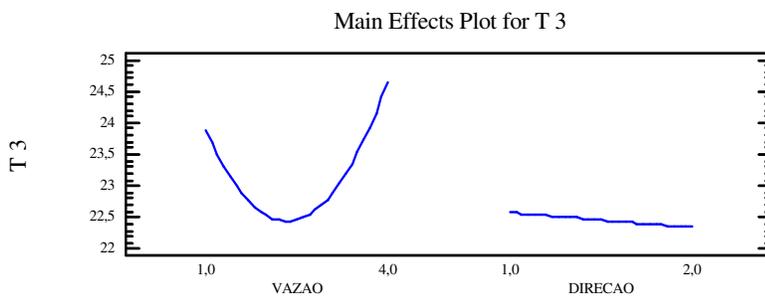


Figura 61 - Comportamento dos efeitos principais relacionados com o termopar #3.

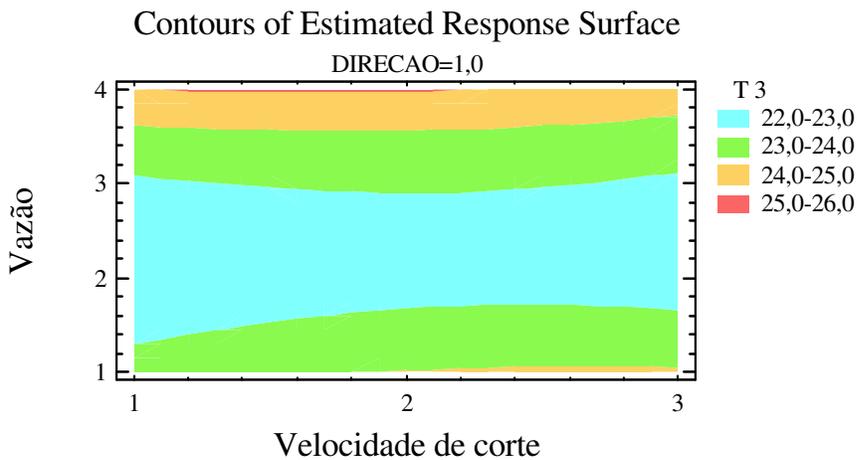


Figura 62 - Distribuição das temperaturas. Termopar #3.

Termopar #4.

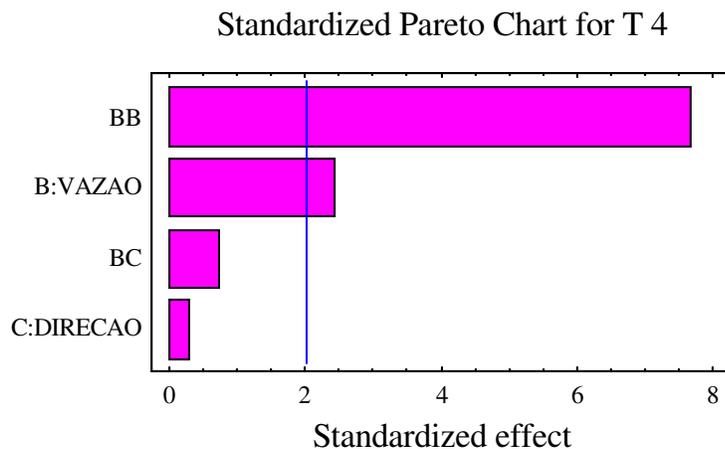


Figura 63 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #4.

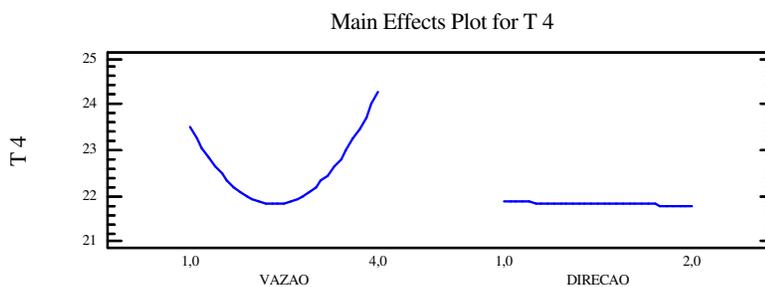


Figura 64 - Comportamento dos efeitos principais relacionados com o termopar #4.

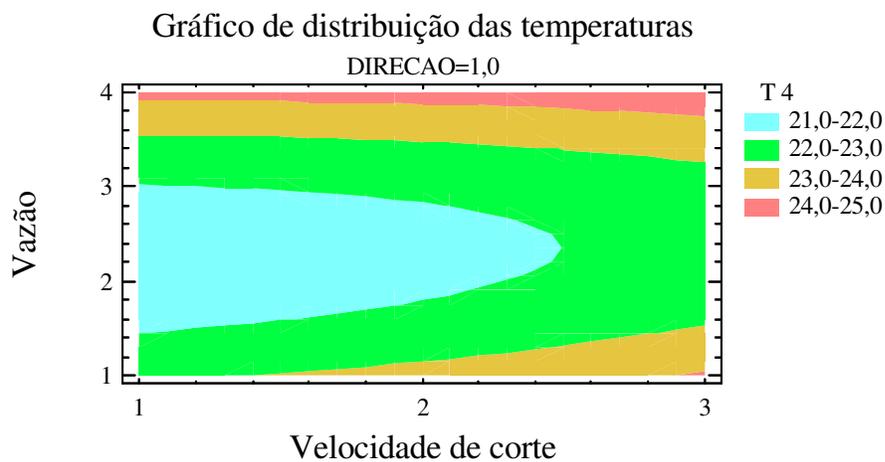


Figura 65 - Distribuição das temperaturas. Termopar #4.

Termopar #5.

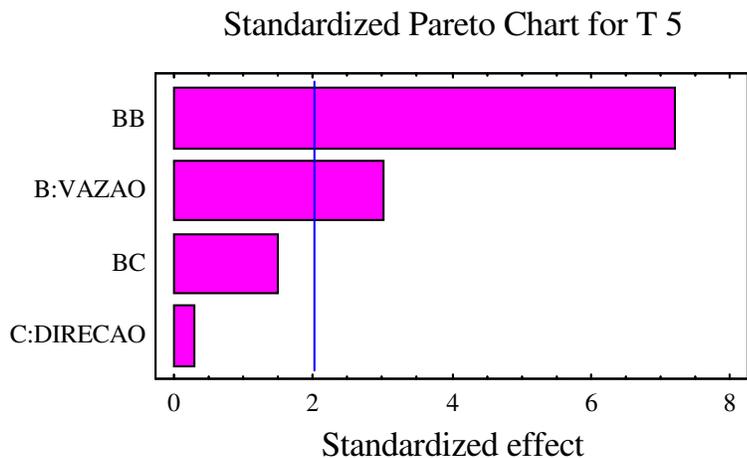


Figura 66 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #5.

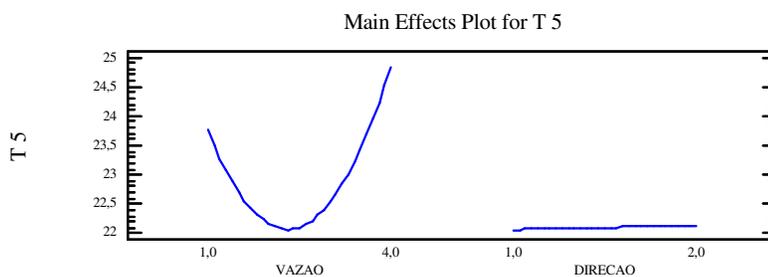


Figura 67 - Comportamento dos efeitos principais relacionados com o termopar #5.

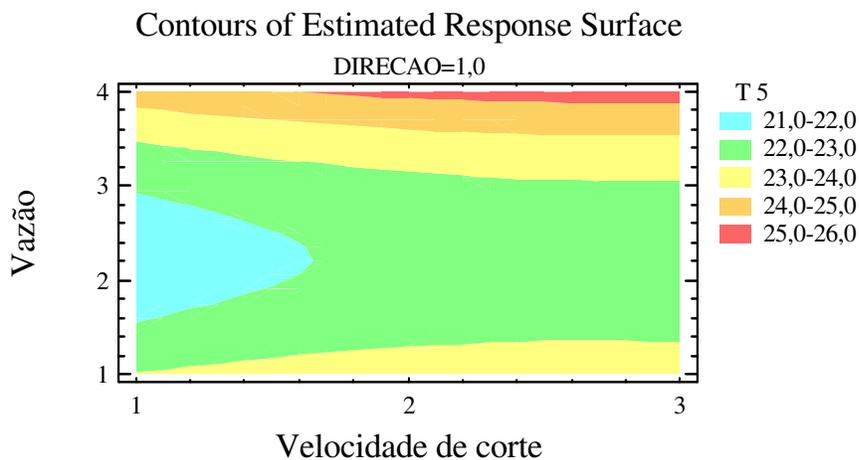


Figura 68 - Distribuição das temperaturas. Termopar #5.

Termopar #6.

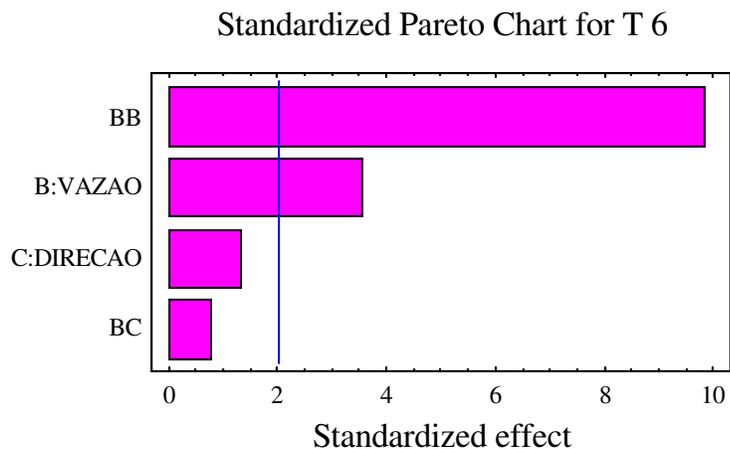


Figura 69 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #6.

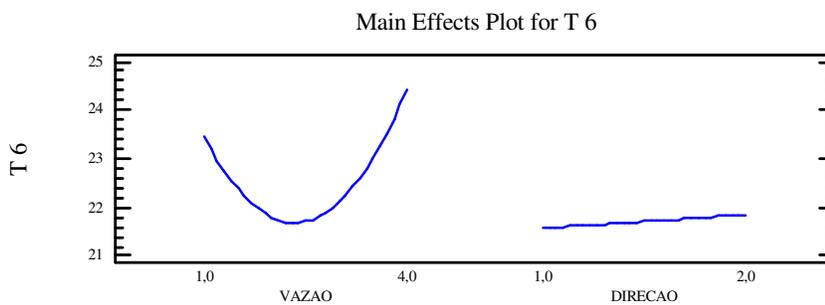


Figura 70 - Comportamento dos efeitos principais relacionados com o termopar #6.

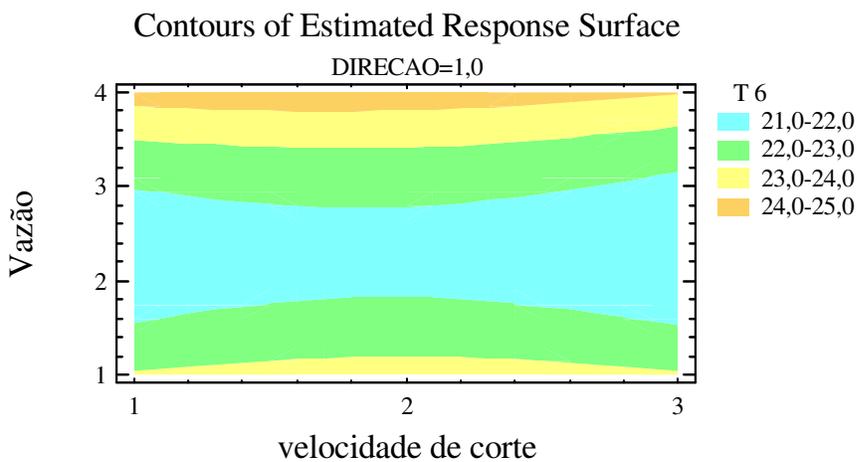


Figura 71 - Distribuição das temperaturas. Termopar #6.

As Figuras, 54, 57, 60, 63, 66 e 69 mostram que a vazão é fator significativo para o efeito temperatura de usinagem. O fator direção é indicado como significativo apenas pelo termopar #1, o mesmo termopar indica que a interação entre os fatores vazão e direção também é significativa.

As Figuras 55, 58, 71, 74, 77 e 80 mostram como ocorre o comportamento dos fatores vazão e direção. Percebe-se nitidamente que quanto maior a vazão tanto menor é o efeito temperatura. Percebe-se ainda que para o nível “4” do fator vazão há o maior valor para o efeito temperatura, uma vez que esse nível corresponde a nenhuma vazão de CO₂. O comportamento do fator direção mostra que, de forma geral, as menores temperaturas são obtidas quando o fluido de corte atua no sentido de corte da ferramenta (nível 1); apenas os termopares #3 e #4 indicam que há favorecimento quando o fluido de corte é adicionado no sentido contrário (nível 2) ao corte do material.

As Figuras 56, 59, 62, 65, 68 e 71 mostram a distribuição das temperaturas com a direção de aplicação do fluido de corte ao nível “1” (mesmo sentido de corte), em função das variáveis “vazão *versus* velocidade de corte”.

Para cada termopar foi efetuada a regressão relacionada com os fatores vazão e direção. Os resultados são apresentados na Tabela 12.

TABELA 12. Equações relacionadas com os termopares e os efeitos vazão e direção do fluido de corte. Eucalipto, operação de serramento circular.

Termopar	Equação	R²
1	$T_1 = [25,892 - (5,328xQ) + (1,866xD) + (1,270xQ^2) - (0,5xQxD)]$	72,05%
2	$T_2 = [26,630 - (4,974xQ) + (1,218xD) + (1,1675xQ^2) - (0,421xQxD)]$	75,06%
3	$T_3 = [26,575 - (3,523xQ) + (0,195xD) + (0,806xQ^2) - (0,170xQxD)]$	47,69%
4	$T_4 = [26,423 - (4,084xQ) + (0,325xD) + (0,917xQ^2) - (0,1596xQxD)]$	57,26%
5	$T_5 = [25,819 - (3,956xQ) + (0,966xD) + (0,971xQ^2) - (0,357xQxD)]$	56,05%
6	$T_6 = [26,172 - (4,421xQ) + (0,615xD) + (0,989xQ^2) - (0,137xQxD)]$	70,21%
Geral	$T_n = [26,252 - (4,381xQ) + (0,864xD) + (1,020xQ^2) - (0,291xQxD)]$	63,05%

Q = vazão; *D* = direção

As regressões que apresentaram melhores ajustes são, em ordem crescente, aquelas relacionadas com os termopares #2, #1 e #6, todos com valores maiores que 70% para R². O ajuste com menor R² está relacionado com o termopar #3. A regressão apresentada em

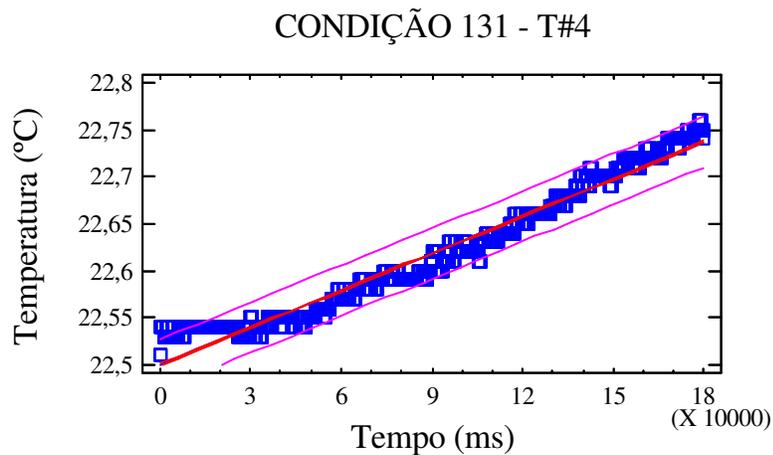
azul é a combinação das regressões dos seis termopares. Para sua obtenção foram somados os coeficientes de cada equação e dividido proporcionalmente pelos seis termopares. Há que se considerar, em face dos resultados apresentado, o efeito de isolamento térmica do material processado.

Consideração adicional deve ser feita em relação ao procedimento de medição da temperatura. Conforme indicado na Figura 30 do capítulo materiais e métodos, os termopares foram inseridos de modo equidistante. Entre o fim do furo para inserção do termopar e o contato efetivo da ferramenta de corte com o material processado foi deixada uma distancia de 1mm, assim os furos para inserção dos termopares eram cegos. Com esse procedimento evitou-se o contato entre o termopar e o dióxido de carbono ou mesmo a ferramenta de corte, possibilitando assim a medição da temperatura interna do corpo de prova. Como não houve referência anterior relacionado a esse procedimento, a distância de 1mm foi deliberadamente arbitrada, entretanto cabe discussões sobre o valor arbitrado, bem como da quantidade de termopares disponibilizados para o processo de monitoramento da temperatura. As mesmas considerações são apropriadas para o capítulo 4.2.

4.1.2.2. Curvas de aquecimento para as condições de menor aquecimento apresentado durante a realização dos ensaios.

Para conhecer o comportamento do aumento da temperatura na região em processo de usinagem, foram levantadas as curvas de aquecimento para as condições que apresentaram a menor temperatura durante o processo de usinagem dos corpos de prova. Para efeitos de análise, foram levantadas as curvas com base nos valores registrados pelo termopar #4. Com vistas à comparação, foram levantadas as curvas de aquecimento das condições 131, 231 e 331, comparadas com as condições 141, 241 e 341 (condições com maiores velocidades de corte e sem refrigeração).

4.1.2.2.1. Condição 131.



$$\text{Temperatura} = 22,5 + (1,32 \times 10^{-6} \times \text{Tempo}). \text{ [}^\circ\text{C]}.$$

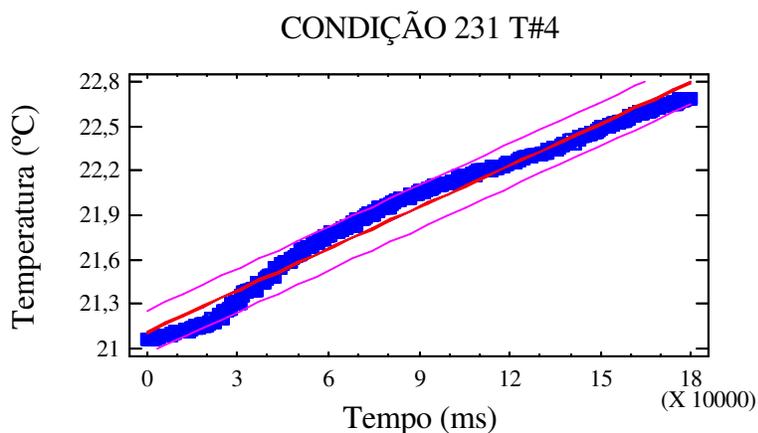
Figura 72 - Regressão condição 131 - termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual 0,980526 e o R^2 é igual a 96,14 %.

O baixo valor para o coeficiente angular indica que a temperatura se mantém razoavelmente estável em função do tempo. Para que haja o aumento de 1 (um) $^\circ\text{C}$ no processo de usinagem, conduzido dentro das variáveis adotadas para esse experimento, são necessários 12,65min. Tem-se assim, a taxa de aumento da temperatura aproximada de 1/12.

Percebe-se, pela Figura apresentada, que no instante $t = 30000\text{ms}$ (30s) inicia-se o aumento de temperatura decorrente do processo de usinagem, que foi controlado pela adoção do mecanismo de refrigeração.

4.1.2.2.2. Condição 231.



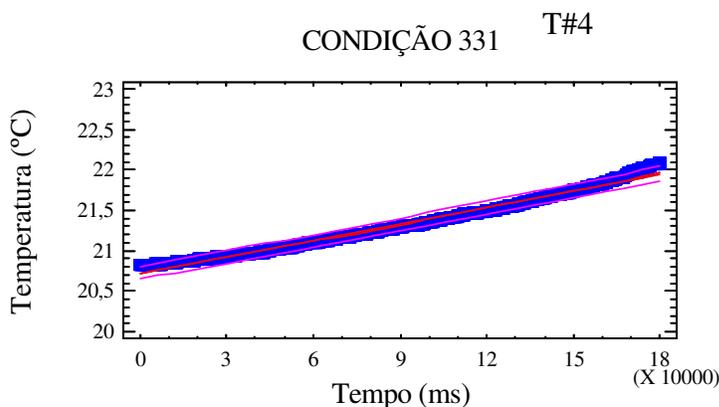
$$\text{Temperatura} = 21,1112 + (9,36^{-6} \times \text{Tempo}). [^{\circ}\text{C}].$$

Figura 73 - Regressão condição 231 - termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a 0,98846 e o R^2 é igual a 97,7052 %.

O baixo valor para o coeficiente angular indica que a temperatura se mantém razoavelmente estável em função do tempo. Para que haja o aumento de 01 (um) grau $^{\circ}\text{C}$ no processo de usinagem, conduzido dentro das variáveis adotadas para esse experimento, são necessários 2,65min. Tem-se assim, a taxa de aumento da temperatura aproximada de 1/3.

4.1.2.2.3. Condição 331.



$$\text{Temperatura} = 20,7115 + (6,85^{-6} \times \text{Tempo}). [^{\circ}\text{C}].$$

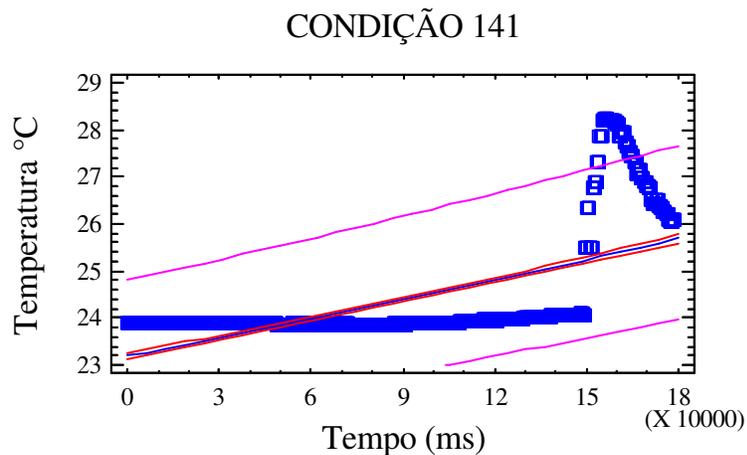
Figura 74 - Regressão condição 331- termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a 0,991 e o R² é igual a 98,267 %.

O baixo valor para o coeficiente angular, indica que a temperatura se mantém estável em função do tempo. Para que haja o aumento de 01 (um) grau Celsius no processo de usinagem, conduzido dentro das variáveis adotadas para esse experimento, são necessários 2,45min. Tem-se assim, a taxa de aumento da temperatura aproximada de 1/2.

Essa condição apresentou, mesmo com o mecanismo de refrigeração, um aquecimento linear seis vezes mais acentuado que o apresentado pela condição 131. A temperatura inicial registrada durante o corte do material era de aproximadamente 21°C e a temperatura final registrada foi 22,05°C. Nesse sentido a adoção do mecanismo de refrigeração favoreceu resultados menores encontrados para as temperaturas iniciais e finais quando comparadas com a condição 141.

4.1.2.2.4. Condição 141.



$$\text{Temperatura} = 1/[4,3 \times 10^{-2} - (2,32 \times 10^{-8} \times \text{Tempo})]. \text{ [}^\circ\text{C]}.$$

Figura 75 - Regressão condição 141. termopar #4.

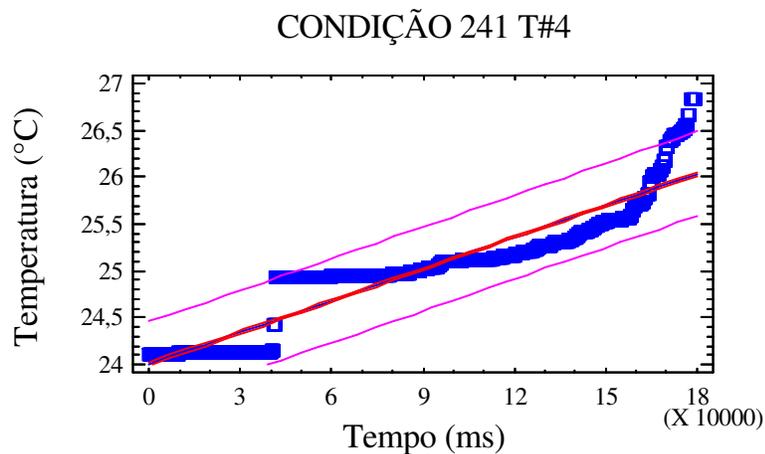
O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $-0,6448$ e o R² é igual a 41,57%.

A taxa de crescimento da temperatura de usinagem, para a condição apresentada é de 4°C para cada 3min, resultando na taxa de 4/3.

Podem ser observados pela Figura 75 que a temperatura manteve-se estável até o momento 15000ms (2,5min), momento em que a temperatura registrada pelo termopar

aumenta mais que 4°C e seqüencialmente começa a declinar até o instante 180000ms (3min), quando ocorreu a finalização do corte. No instante $t = 150000\text{ms}$, o comprimento cortado pela serra circular era de 375 mm, ou seja, maior que o próprio diâmetro da serra. A partir desse ponto, toda superfície axial da serra está em contato com o material em processo de usinagem, tal contato favorece a geração de calor, em função do atrito entre a peça e disco da ferramenta de corte. Conforme a serra avança, a área de contato axial diminui, diminuindo-se assim, o calor proveniente do atrito entre os materiais.

4.1.2.2.5. Condição 241.



$$\text{Temperatura} = 1/[0,04,2 \times 10^{-2} - (1,79 \times 10^{-8} \times \text{Tempo})]. \text{ [}^\circ\text{C]}.$$

Figura 76 - Regressão condição 241. Termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $-0,9343$ e o R^2 é igual a $87,30\%$.

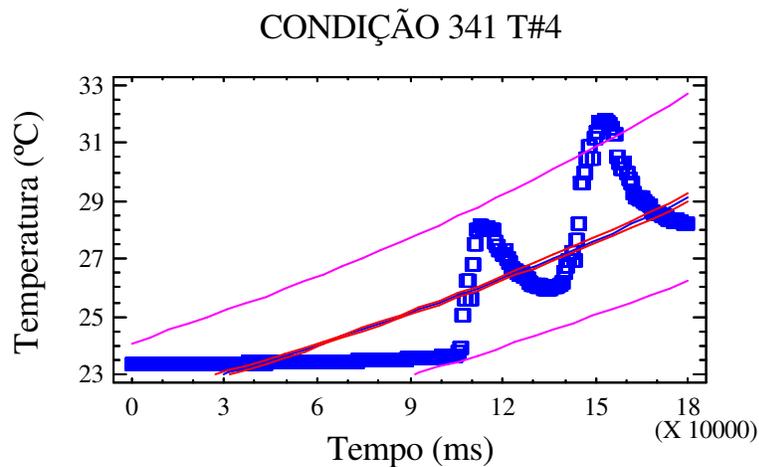
A taxa de crescimento da temperatura de usinagem, para a condição apresentada é de 2°C para cada 3min, minuto, resultando na taxa de $2/3$.

Para essa condição de corte o termopar registrou que até o instante $t = 33000\text{ms}$ (33s) a temperatura se manteve estável, a partir do qual há a elevação abrupta de 1°C na temperatura, que adota o comportamento de aumento constante até o instante $t = 180000\text{ms}$ (3min), quando ocorre o fim do corte do material.

Percebe-se através da Figura 76, em comparação com A Figura 75, que o momento do abrupto aquecimento da região em processo de usinagem ocorre mais

precocemente. Nota-se ainda que para o caso da condição 241 (Figura 76), não há a tendência de diminuição desse acréscimo, permanecendo em elevação.

4.1.2.2.6. Condição 341.



$$\text{Temperatura} = 1/[4,53 \times 10^{-2} - (6,076 \times 10^{-8} \times \text{Tempo})]. \text{ [}^\circ\text{C]}.$$

Figura 77 - Regressão condição 34. Termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $-0,8556$ e o R^2 é igual a $73,20\%$.

A taxa de crescimento da temperatura de usinagem, para a condição apresentada é de 1°C para cada $0,5\text{min}$, deste modo, aproximadamente 2°C por minuto, resultando na taxa de $2/1$.

A temperatura se mantém constante até o instante $t = 105000\text{ms}$ ($1,75\text{min}$), instante em que começa um ciclo ascendente de aumento e diminuição até o instante $t = 180000\text{ms}$ (3min), quando o corte é finalizado.

O aquecimento abrupto que ocorre no instante $t = 105000\text{ms}$, cujo valor registrado desse aumento foi de aproximadamente 6°C , está relacionado à área de contato entre o disco da serra circular com o material em processo de usinagem, neste instante aproximadamente 262mm do disco de corte está inserida no material, situação em que pelo atrito entre os materiais, ocorre o aumento da temperatura.

O pico de aquecimento ocorre no instante $t = 150000\text{ms}$ ($2,50\text{min}$), cuja temperatura alcançou aproximadamente 32°C . O pico de aquecimento ocorre no mesmo

instante que anotado para a condição 141 (fig. 97). A partir desse momento começa a ocorrer diminuição da temperatura registrada pelo termopar #4 até a finalização do corte do material.

4.1.2.3. Resumo dos resultados apresentados.

A Tabela 13 indica o resumo encontrado para as condições que apresentaram melhores resultados em termos de retirada de calor e compara com a situação onde não foi aplicado o mecanismo de refrigeração.

TABELA 13. Resultados obtidos pelo termopar #4.

Condição	Equação	R ²	Correlação	Taxa de aquecimento
331	$T = 20,715 + (6,8 \times 10^{-6} \times t)$	98,26 %	0,9913	38%
231	$T = 21,111 + (9,4 \times 10^{-6} \times t)$	97,70 %	0,98846	41%
131	$T = 22,5 + (1,3 \times 10^{-6} \times t)$	96,14 %	0,98052	8%
341	$T = 1/[0,045 - (6,076 \times 10^{-8} \times t)]$	73,20%	-0,8556	200%
241	$T = 1/[0,041 - (1,792 \times 10^{-8} \times t)]$	87,30 %.	-0,9343	66%
141	$T = 1/[(0,043 - (2,316 \times 10^{-8} \times t)]$	41,57 %	-0,6448	90%

Para as condições nas quais o mecanismo de refrigeração foi adotado, os modelos matemáticos para as equações de regressão tendem a ser lineares, com elevado valor de correlação e R². A taxa de aquecimento, expressa em porcentagem, reflete em quantos graus °C por minuto a temperatura é elevada durante o processo de usinagem. A condição com o uso do mecanismo de refrigeração com maior taxa de crescimento foi a 231. Percebe-se que a adoção do mecanismo de refrigeração, independente do nível adotado (15, 30 ou 45[g/min]), não estabilizou a função de aquecimento. O efeito do CO₂ permitiu a modificação da função (de uma função recíproca em y, para uma função linear) e diminuição da taxa de aquecimento, porém não a inibindo plenamente.

Para as condições que não adotaram o mecanismo de refrigeração, as regressões tendem a ser não lineares, com valores razoáveis de correlação e R². A condição que apresentou maior taxa de aquecimento sem a adoção do mecanismo de refrigeração foi a 341, que retrata a maior velocidade de corte. Nota-se que a falta do mecanismo de refrigeração implica em menores valores de correlação e ajuste da função que rege o

comportamento térmico do processo de usinagem. Pode-se afirmar que a falta do mecanismo de refrigeração não permite o efetivo controle do efeito da temperatura durante o processo de usinagem de materiais, para o caso apresentado, o eucalipto.

4.1.3. Avaliação do estado superficial dos corpos de prova usinados. Operação de serramento circular com serra circular.

A avaliação do estado superficial dos corpos de prova foi realizada por dois métodos, a avaliação de defeitos macroscópicos e a avaliação da rugosidade superficial da região usinada. Com referência a avaliação da rugosidade superficial, avaliou-se os parâmetros Ra e Ry. A metodologia adotada para efeitos de medição seguiu o disposto no item 3.1.5.6.

4.3.3.1. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ra.

Os resultados de medições obtidos para o parâmetro Ra estão apresentados na Tabela 14 do ANEXO. Com base nos resultados foi feita a análise estatística de modo a verificar a influência dos fatores envolvidos na experimentação. É importante mencionar que, para o caso de tomadas de medidas de rugosidade de corpos de prova fabricados em madeira, pelas propriedades intrínsecas deste material, o valor do coeficiente de variação é elevado. Deste modo, foram consideradas para a análise somente as medições que resultaram em coeficiente de variação máximo de 25%. Para as situações que excedessem esse patamar, o conjunto de medidas era descartado e novas medições eram realizadas.

Para efeitos de avaliação foi analisado o valor médio obtido entre as quatro medições.

As Figuras 78 e 79 mostram a influência dos fatores sobre o parâmetro de rugosidade Ra. Conforme observado, parece haver influência da direção de aplicação do fluido de corte no estado superficial, mensurado pelo parâmetro Ra.

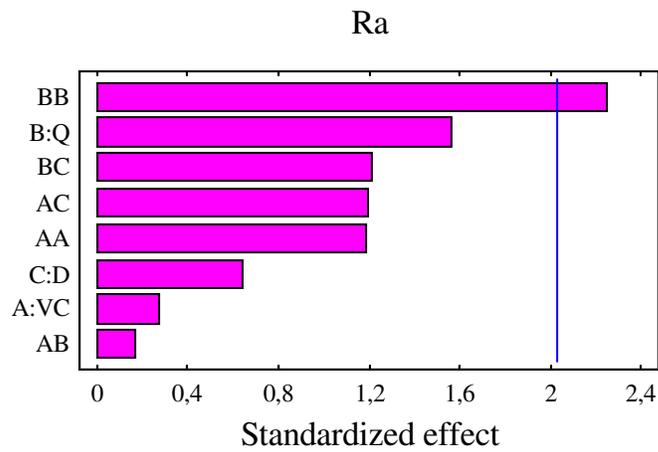


Figura 78 – Gráfico de Pareto -Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

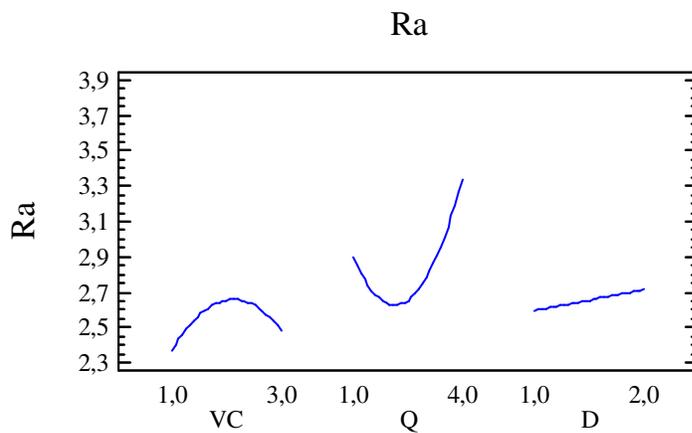


Figura 79 - Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

A Figura 80 mostra o gráfico de contorno cuja evidência é dada para a direção 1 (mesmo sentido da ferramenta de corte). Observa-se que ao nível 4 do fator vazão (ou seja, sem vazão) ocorre os maiores valores para rugosidade superficial Ra.

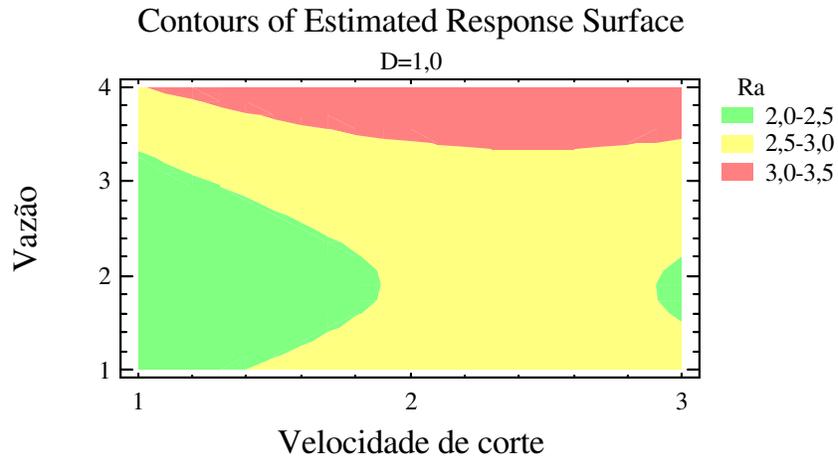


Figura 80 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação “1”

A Figura 81 mostra o gráfico de contorno evidenciando a direção “2”. Observa-se que os melhores (menores valores) foram obtidos com o nível “2” e “3” para vazão, combinado com a velocidade de corte ao nível “3”.

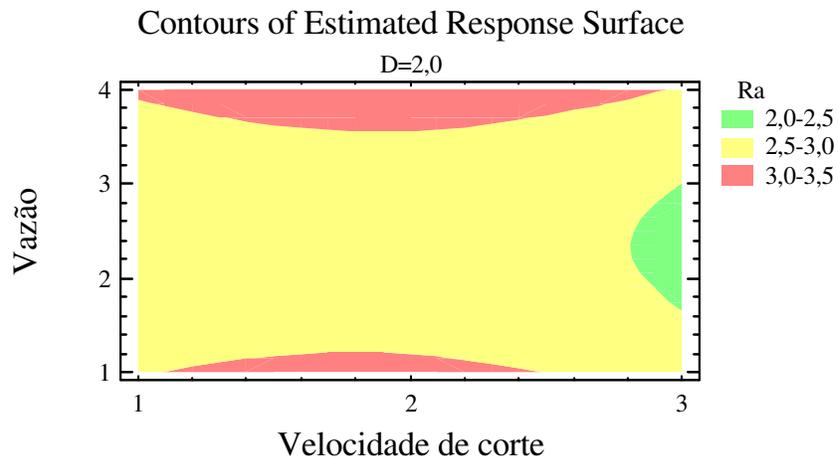


Figura 81 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação “1”.

A Tabela 15 expõe o resumo estatístico relacionado com o parâmetro de rugosidade Ra encontrado na superfície dos corpos de prova usinados. Na Tabela o fator “A” designa velocidade de corte, o fator “B” designa Vazão e o fator “C” direção.

Tabela 15. Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra apresentada pelos corpos de prova.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
A	0,03061	1	0,03061	0,08	0,7833
B	0,97803	1	0,97803	2,45	0,1258
C	0,16567	1	0,16567	0,42	0,5233
AA	0,55815	1	0,55815	1,40	0,2443
AB	0,01190	1	0,01190	0,03	0,8638
AC	0,57245	1	0,57245	1,43	0,2385
BB	2,00901	1	2,00901	5,03	0,0308
BC	0,58806	1	0,58806	1,47	0,2323
Bloco	0,02827	1	0,02827	0,07	0,7916
Erro total	15,1672	38	0,39913		
Erro total corrigido	36,1364	47	20,2141		

Assim, com base nos gráficos e na análise estatística presume-se que o fator mais significativa seja a aplicação do fluido de corte (dióxido de carbono). Nota-se pela Figura 99 que a rugosidade Ra tende a ser maior quando o nível de vazão é nulo (nível “4”) e quando a velocidade de corte está ao nível “2” (a intermediária especificada para essa experimentação). O fator direção parece apontar para que os menores valores de rugosidade são obtidos quando a direção estava ao nível “1” (mesmo sentido da direção da ferramenta de corte).

Entretanto, o modelo como apresentado possui baixo ajuste, cujo valor encontrado para R^2 para o experimento foi de 24,96%, e o mesmo valor corrigido foi de 9,57%.

4.1.3.2. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ry.

Os resultados encontrados para o parâmetro Ry estão dispostos em anexo na Tabela 16.

Com base nesses resultados foi feita a análise estatística de modo a verificar a influência dos fatores envolvidos na experimentação.

Da mesma forma que descrito para a tomada de medidas para avaliação da rugosidade Ra, para o parâmetro Ry foram selecionados os conjuntos de medidas que

retornassem ao coeficiente de variação de até 25%. Para efeitos de avaliação foi analisado o valor médio obtido entre as quatro medições.

A Figura 82 mostra a influência dos fatores sobre o parâmetro de rugosidade R_y . Conforme observado, há influência da aplicação do fluido de corte no estado superficial, nos resultados mensurados para o parâmetro R_y .

A Figura 83 mostra os principais efeitos dos fatores e com relação ao parâmetro de rugosidade R_y . Nota-se que para esse parâmetro, a direção de aplicação do fluido de corte não mostrou qualquer influência.

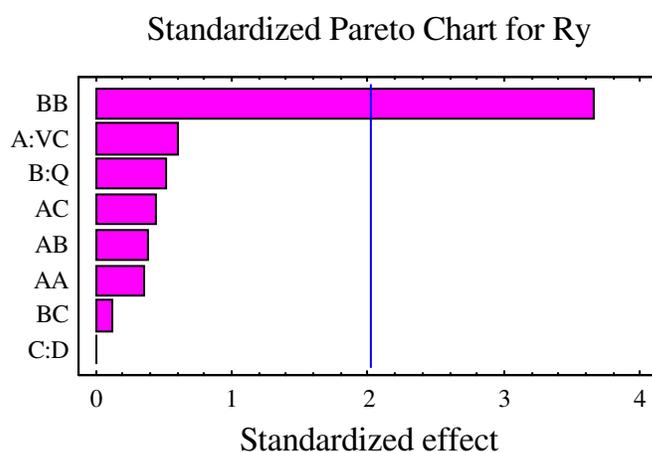


Figura 82 – Gráfico de Pareto -Influência dos fatores sobre a rugosidade R_y dos corpos de prova.

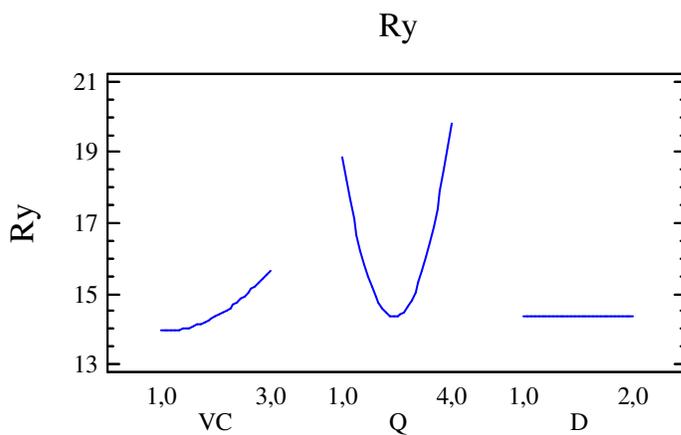


Figura 83 – Influência dos fatores sobre a rugosidade R_y dos corpos de prova.

Na seqüência, A Figura 84 mostra o gráfico de contorno cuja evidencia é dada para a direção 1 (mesmo sentido da ferramenta de corte). Observa-se que os melhores resultados são encontrados com a vazão ao nível “2” e “3” combinados com a velocidade de corte aos níveis “1” e “2”. Nota-se que para o nível “4” (sem vazão), há os resultados menos satisfatórios.

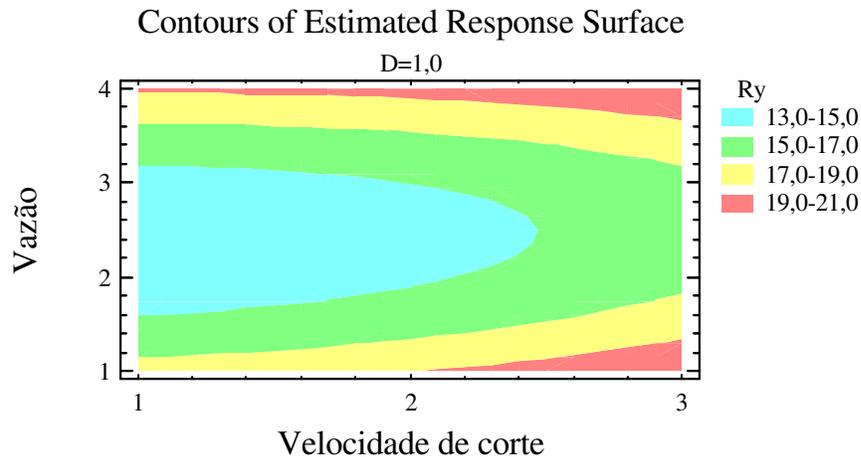


Figura 84 - Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

A Figura 85 mostra o gráfico de contorno evidenciando a direção “2”. Pode ser observado o mesmo comportamento descrito para A Figura 104.

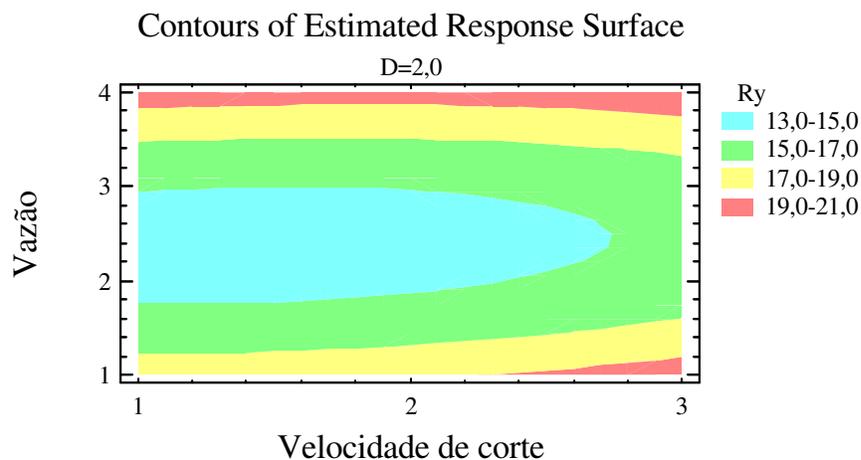


Figura 85 - Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

A Tabela 17 expõe o resumo estatístico relacionado com o parâmetro de rugosidade Ra encontrado na superfície dos corpos de prova usinados. Na Tabela o fator “A” designa velocidade de corte, o fator “B” designa Vazão e o fator “C” direção.

Tabela 17. Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra apresentada pelos corpos de prova.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
A	5,3665	1	5,3665	0,36	0,5503
B	4,5730	1	4,5730	0,26	0,6124
C	0,0004	1	0,0004	0,00	0,9959
AA	2,3064	1	2,3064	0,13	0,7188
AB	2,7040	1	2,7040	0,15	0,6966
AC	3,3540	1	3,3540	0,19	0,6642
BB	234,7460	1	234,7460	13,40	0,0008
BC	0,2891	1	0,2891	0,02	0,8985
Bloco	12,6119	1	12,6119	0,72	0,4016
Erro total	665,9	38	17,5237		
Erro total corrigido	923,025	47			

Assim, com base nos gráficos e na análise estatística executada presume-se que o fator significativo em segunda ordem seja a aplicação do fluido de corte (dióxido de carbono). Pode-se afirmar que a direção não influi nos resultados e que a vazão que retornou em melhores resultados (menor valor de rugosidade) foi ao nível “2” e “3”.

Para o modelo apresentado o ajuste encontrado para R^2 foi 27,85%, e o mesmo valor corrigido foi de 13,05%, indicando que o mesmo não está suficientemente ajustado.

Verifica-se que, para ambos os parâmetros de rugosidade (Ra e Ry) existe forte influência da natureza do material processado sobre o resultado final em termos de acabamento. Por essa razão é extremamente difícil a obtenção de resultados de medição cujos coeficientes de variação sejam menores que 25%, uma vez que a própria anatomia do material impede a obtenção de tais resultados. No sentido de minimizar ao máximo tal circunstância, os *cut-offs* (espaço de amostragem por onde o sensor do rugosímetro efetua a varredura) foram estabelecidos em 0,8mm. Notou-se que com *cut-offs* maiores os resultados tendiam a ser menos coesos, aumentando assim o coeficiente de variação entre as tomadas das medidas. Esse mesmo procedimento foi adotado para outras avaliações de

rugosidade dos corpos de prova fabricados em eucalipto e pinus, para ambas as operações (serramento circular com serra circular e fresamento lateral com fresa perfilada).

4.1.3.3. Avaliação dos defeitos macroscópicos sobre a superfície usinada.

São apresentadas, na seqüência, as fotos dos corpos de prova usinados que apresentaram evidências de combustão na superfície usinada.

4.1.3.3.1. Corpo de prova 34, condição 141.



Figura 86 - Corpo de prova 34 condição 141

4.1.3.3.2. Corpo de prova 45 condição 241.

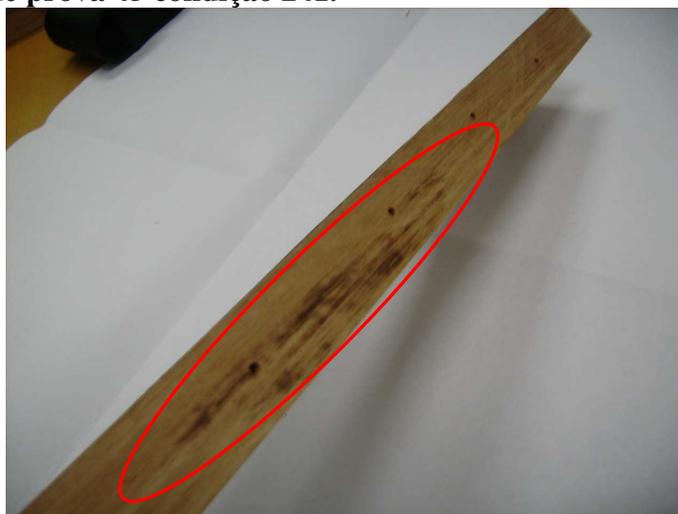


Figura 87 - Corpo de prova 45 condição 241

4.1.3.3.3. Corpo de prova 36 condição 341.



Figura 88 - Corpo de prova 36 condição 341.

4.1.3.3.4. Corpo de prova 37 condição 342.



Figura 89 - Corpo de prova 37 condição 342.

Conforme pode ser observado, para as condições de usinagem sem a adoção do dióxido de carbono como fluido de corte, ocorreu combustão da superfície por onde a ferramenta de corte realizou o corte, com dano acentuado na superfície cortada dos corpos de prova.

4.1.4. Avaliação da vibração no conjunto corpo de prova e máquina operatriz.

Conforme procedimento descrito no item 3.1.5.2, (Figuras 34 a 36) foi medida a vibração do conjunto corpo de prova e máquina operatriz.

Percebeu-se que não ocorreu influência significativa na vibração medida durante a execução dos ensaios com a adição do fluido de corte com aqueles nos quais não foi adotado esse mecanismo de refrigeração.

Para a análise foram tomados os valores médios de cada conjunto de dados relacionados com cada corpo de prova. Assim, para a vazão $Q=1$, por exemplo, foram destinados para análise os oito dados relativos aos valores médios de cada ensaio realizado com esse nível de vazão. Cada valor teve origem nos 180 dados obtidos durante a realização de cada ensaio.

A Figura 90 mostra o gráfico de comparação das médias para os quatro níveis de vazão propostos aos experimentos, onde “Q1”, “Q2” e “Q3” retratam o uso do fluido de corte e “Q4” representa sua ausência.

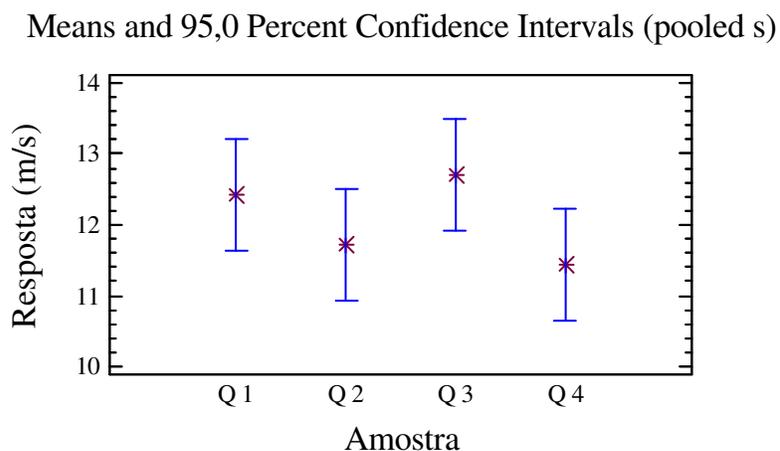


Figura 90 – Gráfico das médias para a análise de vibração resultante do corte dos corpos de prova referente à operação de serramento circular com serra circular.

A Tabela 18 resume os resultados estatísticos obtidos. O valor de “p” está muito próximo do limite estabelecido para um intervalo de confiança ao nível de 95%.

Tabela 18. Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra apresentada pelos corpos de prova.

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
Entre os grupos	7,5714	3	2,5238	2,49	0,0842
Dentro dos grupos	24,2857	24	1,0119	1,40	
Erro total corrigido	31,8571	27			

4.1.5. Avaliação da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem.

O procedimento para a medição da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem foi realizado de acordo com o item 3.1.5.3, conforme Figura 37.

A análise dos dados obtidos foi feita de acordo com o mesmo procedimento do item 4.1.4. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 91 e Tabela 19.

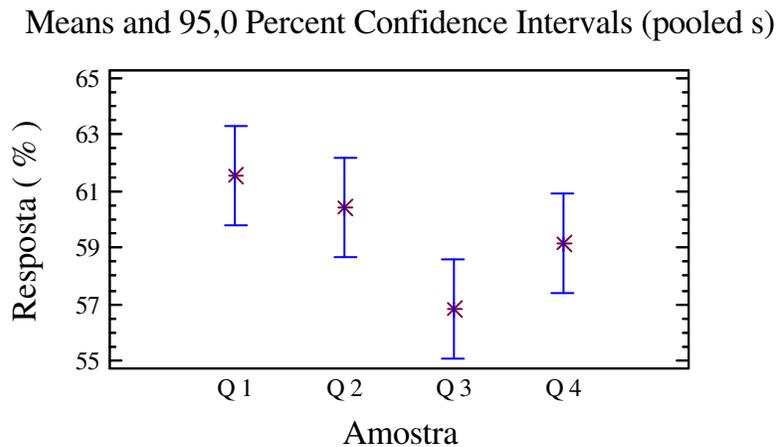


Figura 91 – Gráfico das médias para a análise da umidade relativa próxima a região onde ocorreu o corte referente à operação de serramento circular com serra circular.

Tabela 19. Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra apresentada pelos corpos de prova.

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
Entre os grupos	85,8571	3	28,619	5,58	0,0048
Dentro dos grupos	123,143	24	5,1309	1,40	
Erro total corrigido	209,0	27			

Percebe-se, pela análise, que há influência significativa do fator vazão do dióxido de carbono. Pela análise das médias de cada ensaio é possível verificar que ao nível de 45g/min de vazão de dióxido de carbono ocorre queda da umidade relativa do ar ao redor

do processo de usinagem. Uma explicação para esse fenômeno decorre das temperaturas muito abaixo de 0°C. Desta forma, toda umidade presente próxima da região onde ocorre a usinagem do material condensa-se e posteriormente congela-se. A temperatura medida entre o difusor e a superfície material em processo de usinagem situou-se entre -15°C a -30°C.

A menor umidade relativa próxima à região em processo de usinagem é fator favorável ao processo em si, uma vez que a ausência de umidade implica em corte realizado a seco sem provável absorção de umidade pela madeira em processamento.

4.1.6. Avaliação temperatura externa próxima à região em processo de usinagem.

O monitoramento da temperatura foi feito de acordo com a Figura 38, descrita no item 3.1.5.4. Verificou-se que a temperatura próxima à região em processo de usinagem manteve-se constantemente abaixo de 0°C em todos os níveis de aplicação do dióxido de carbono como fluido de corte.

4.2. Eucalyptus Grandis – Operação de fresamento tangencial.

Os resultados apresentados referem-se aos experimentos realizados com a máquina operatriz serra esquadrejadeira com a utilização de serras circulares. Todos os corpos de prova foram ensaiados seguindo-se o planejamento experimental mostrado no item 3.2.4.

4.2.1. Caracterização dos corpos de prova.

A Tabela 20 no ANEXO apresenta os dados de caracterização dos corpos de prova fabricados com Eucalyptus grandis.

A Figura 92 mostra histograma da densidade aparente dos corpos de prova fabricados em eucalipto para a realização dos ensaios.

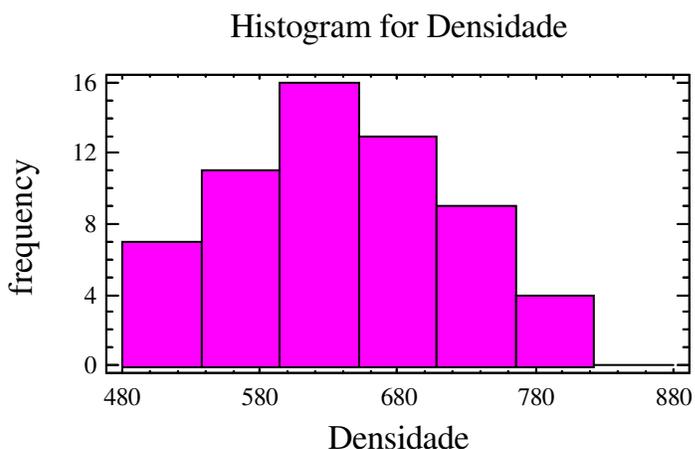


Figura 92. Histograma da densidade aparente dos corpos de prova de eucalipto.

A Tabela 21 contempla o sumário estatístico referente aos corpos de prova fabricados em eucalipto relacionado com a densidade aparente dos corpos de prova.

TABELA 21. Sumário estatístico para os corpos de prova de eucalipto - densidade aparente dos corpos de prova.

Estatístico	Valor
Contagem	60
Variância	6456,99
Mínimo	502,38
Máximo	809,36
Média	639,37
Desvio padrão	80,35
Amplitude	306,97
Curtose padrão	-1,23
Alisamento padrão	0,71
Coefficiente de variação	12,57%

Dentre os materiais usinados, os corpos de prova fabricados em eucalipto apresentaram maior valor para a densidade aparente, cujo valor médio foi de 639,37kg/m³, o coeficiente de variação dos corpos de prova fabricados com essa madeira foi 12,57%, também o maior dentre os três materiais processados.

4.2.2. Resultados pertinentes aos materiais usinados - monitoramento da temperatura.

A temperatura oriunda do processo de usinagem dos corpos de prova foi monitorada conforme sistema especificado no capítulo 3. O propósito da medição foi averiguar a eficiência do sistema de refrigeração e determinar a melhor condição para aplicação desse sistema.

Cada termopar inserido no corpo de prova registrou entre 1800 a 2000 sinais. O intervalo entre cada aquisição foi de 100ms e foram considerados para análise os primeiros 1800 sinais.

Os mesmos procedimentos adotados para o tópico 4.1.2 foram aplicados para essa experimentação.

A Tabela 22 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada. Os valores anotados em azul indicam a condição que

apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de 2,0%.

TABELA 22 – Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	111	112	121	122	131	132	141	142
1	23,10	22,80	22,10	22,70	20,10	20,01	24,40	23,80
2	22,50	22,50	21,50	21,90	20,50	20,25	24,01	21,76
3	22,51	22,60	21,75	21,30	20,25	20,74	23,51	23,49
4	23,02	22,96	21,40	21,27	20,60	20,80	23,90	24,01
5	23,05	23,30	22,76	22,80	21,05	21,20	23,80	23,95
6	22,70	23,23	21,90	22,01	20,38	21,20	24,05	24,01
Coeficiente de variação	1%	1%	2%	3%	2%	2%	1%	4%

A Tabela 23 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada. Os valores anotados em azul indicam a condição que apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de aproximadamente 2%.

TABELA 23 – Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	211	212	221	222	231	232	241	242
1	24,00	23,80	22,01	21,61	21,19	21,07	23,61	24,52
2	23,81	23,20	22,62	21,41	20,43	21,00	24,05	23,92
3	23,82	23,18	22,09	21,38	20,42	20,58	23,81	23,86
4	23,08	23,58	21,41	22,05	21,05	21,10	24,23	23,90
5	23,21	24,19	22,42	22,02	21,81	21,18	24,49	24,23
6	23,20	23,51	22,40	22,00	20,98	21,05	24,73	23,20
Coeficiente de variação	2%	2%	2%	1%	2%	1%	2%	2%

A Tabela 24 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada. Os valores anotados em azul indicam a condição que apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de aproximadamente 2,2%.

TABELA 24 – Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	311	312	321	322	331	332	341	342
1	25,42	25,61	23,41	23,06	21,23	21,76	26,65	26,58
2	25,40	24,80	22,40	22,05	21,64	21,70	26,60	26,57
3	25,41	25,20	22,42	22,20	21,45	21,61	26,52	25,82
4	25,45	25,30	23,05	22,18	21,42	22,23	26,40	25,83
5	26,21	26,01	22,31	22,20	21,43	22,28	26,21	26,70
6	23,40	24,41	24,40	22,21	21,51	22,24	25,30	25,95
Coeficiente de variação	4%	2%	4%	2%	1%	1%	2%	2%

Os resultados apresentados pelas análises dos valores obtidos pelos termopares, relacionados nas Tabelas 22, 23 e 24, levam as seguintes considerações:

- *Para as três velocidades de corte adotadas os menores valores de temperatura foram obtidos com a vazão de 45g/min de dióxido de carbono aplicado no mesmo sentido de corte da ferramenta. (131; 231; 331).*

- *Quando a vazão do fluido de corte era reduzida para outros níveis, a temperatura registrada também era aumentada.*

- *Fica evidenciado que a adoção do mecanismo de refrigeração reduz o valor de temperatura na região em processo de usinagem. Sempre a usinagem a seco retornou em maior aquecimento da região em processo de usinagem. (141; 241; 341 e 142; 242; 342)*

4.2.2.1. Avaliação dos fatores e níveis relacionados com a temperatura de usinagem.

Com base no planejamento experimental citado no item 3.2.4, foram feitas as análises de significância dos fatores velocidade de corte, vazão e direção de aplicação do

fluido de corte. A análise foi feita para todos os termopares, cada qual apresentada individualmente.

Termopar # 1

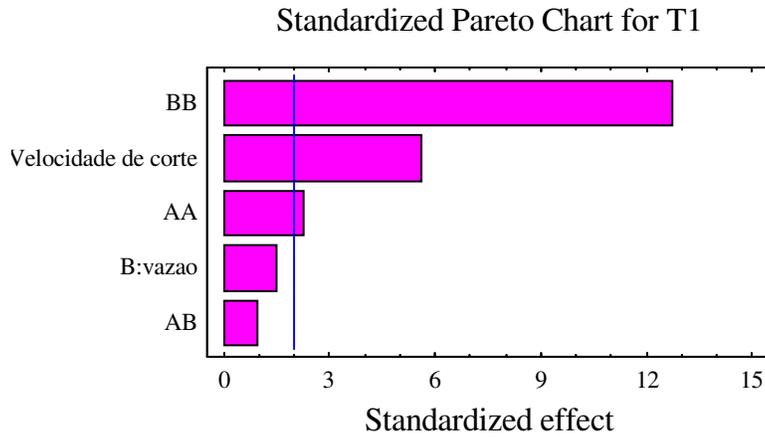


Figura 93 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #1.

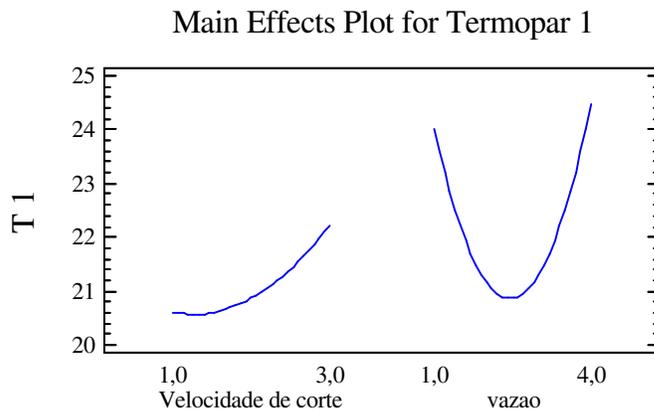


Figura 94 - Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #1.

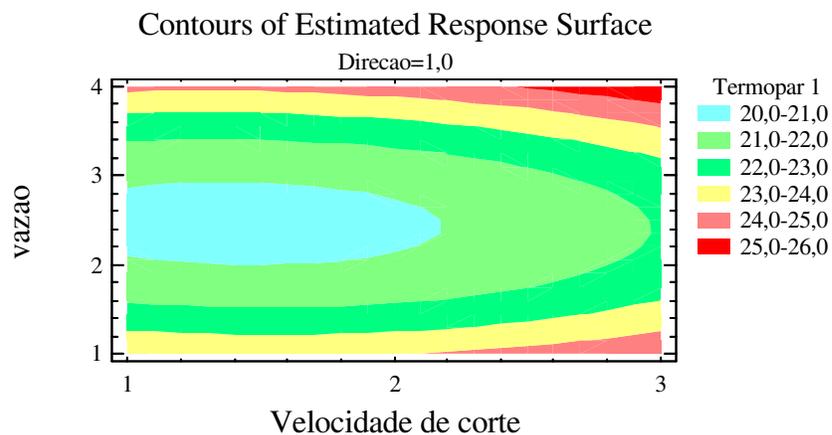


Figura 95 - Distribuição das temperaturas. Termopar #1.

Termopar # 2

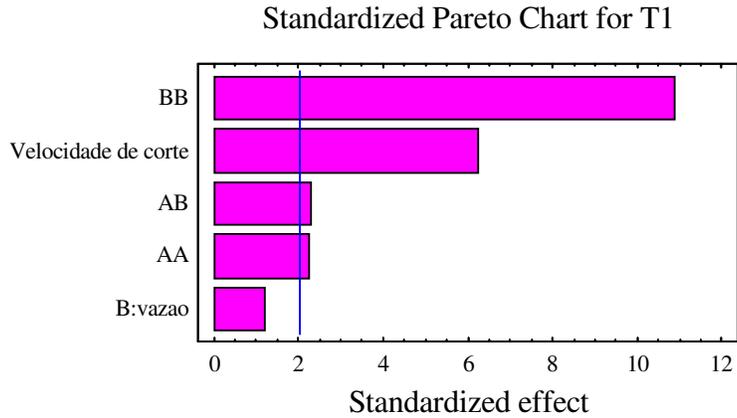


Figura 96- Efeitos padrões relacionados com o termopar #2.

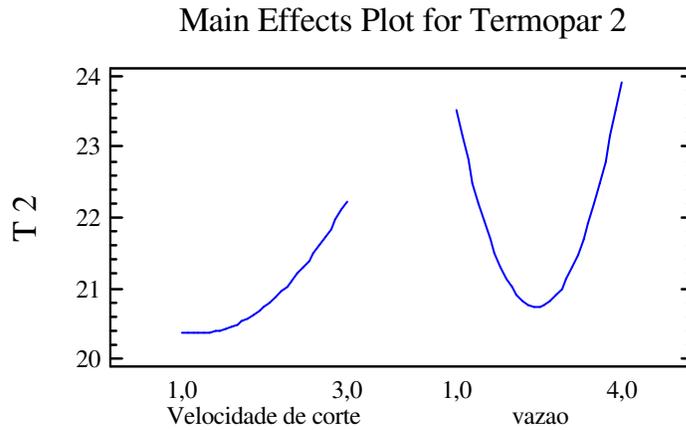


Figura 97 - Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #2.

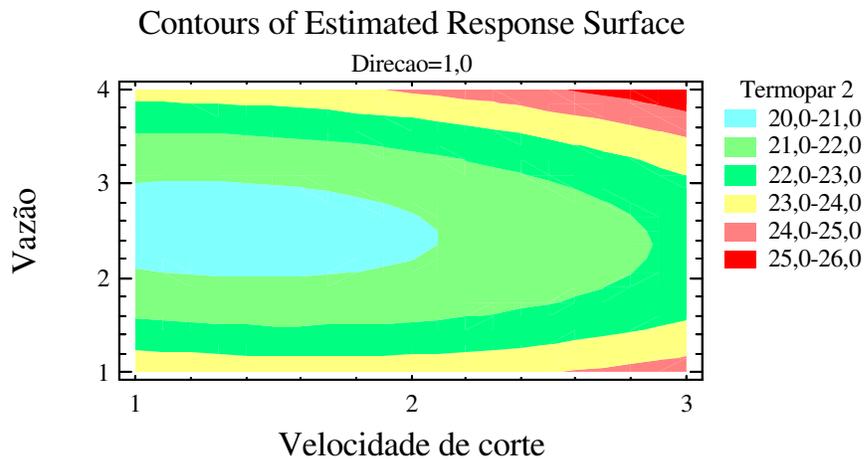


Figura 98 - Distribuição das temperaturas . Termopar #2.

Termopar # 3

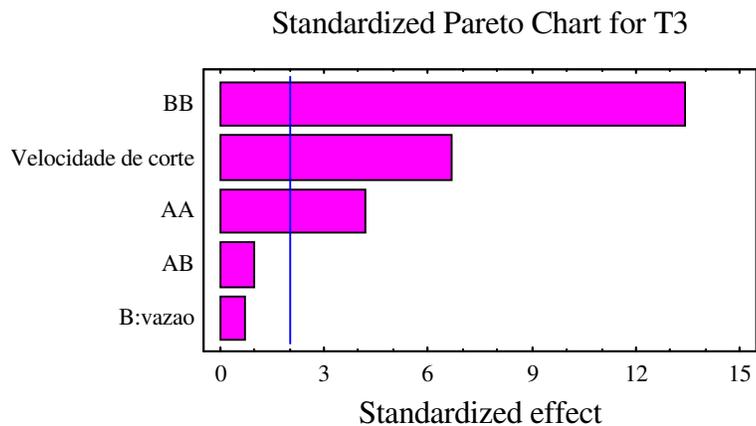


Figura 99 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #3.

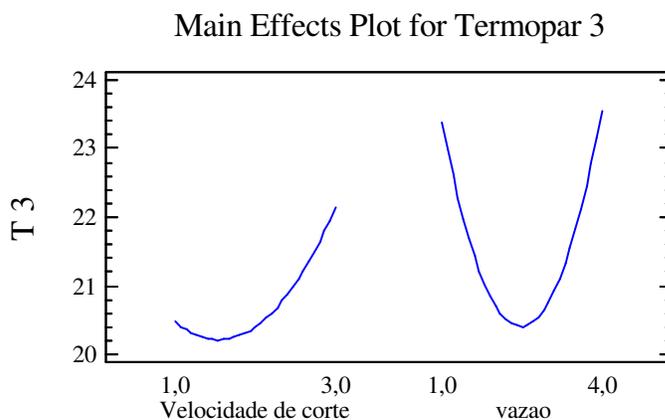


Figura 100 - Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #3.

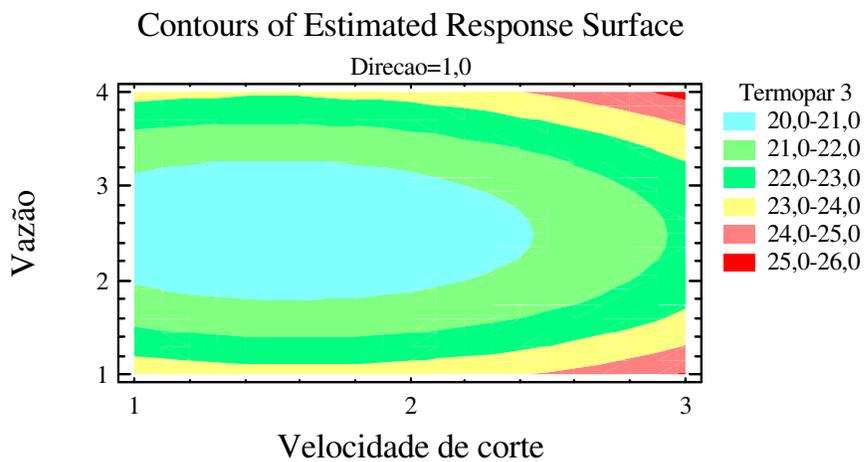


Figura 101 - Distribuição das temperaturas Termopar #3.

Termopar # 4

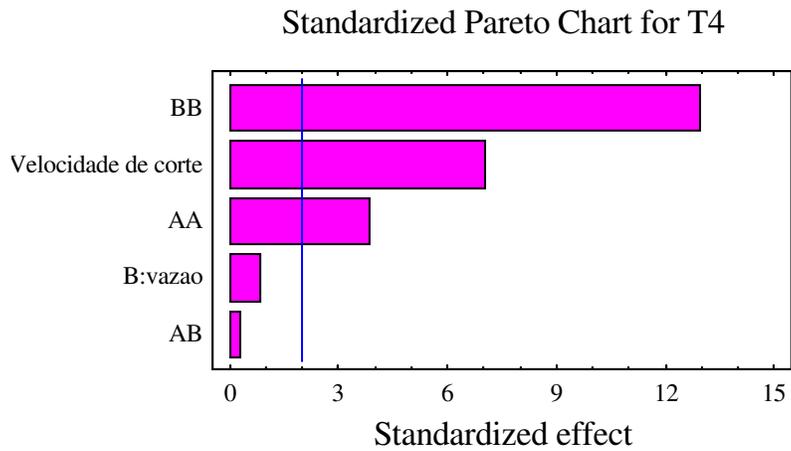


Figura 102 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #4.

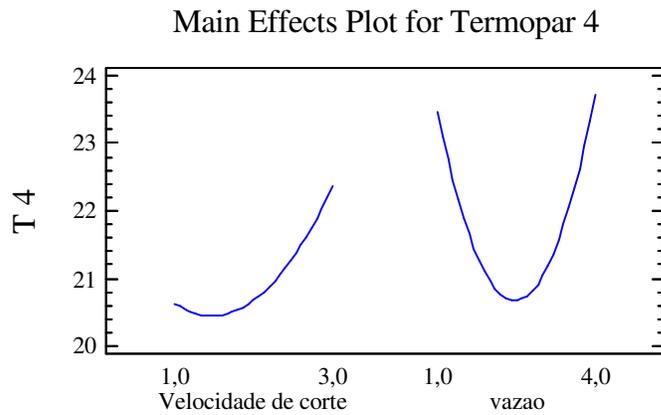


Figura 103 - Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #4.

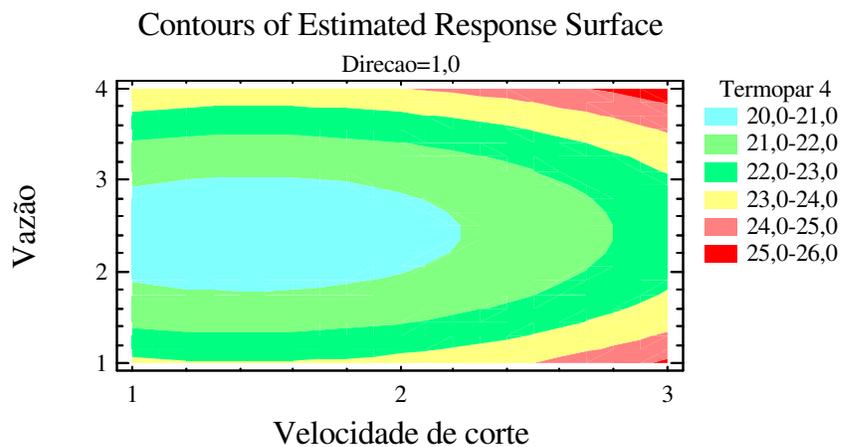


Figura 104 - Distribuição das temperaturas . Termopar #4.

Termopar # 5

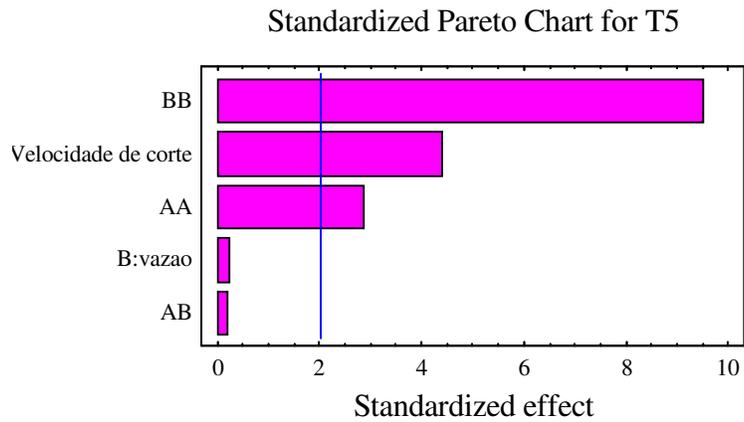


Figura 105 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #5.

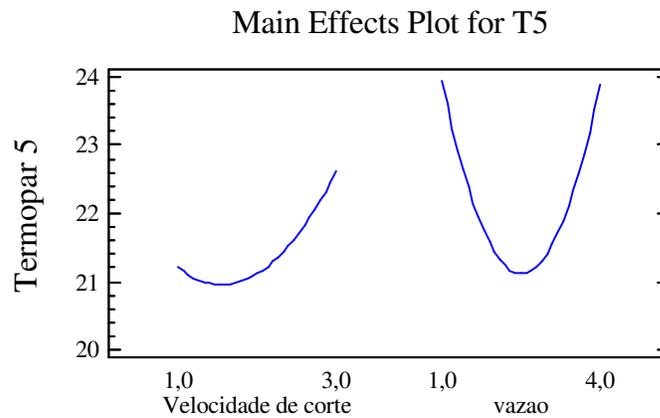


Figura 106 - Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #5.

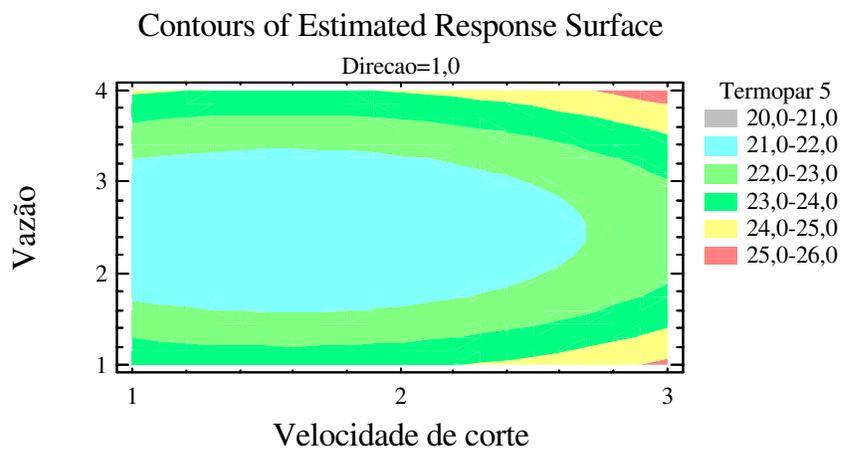


Figura 107 - Distribuição das temperaturas. Termopar #5.

Termopar # 6

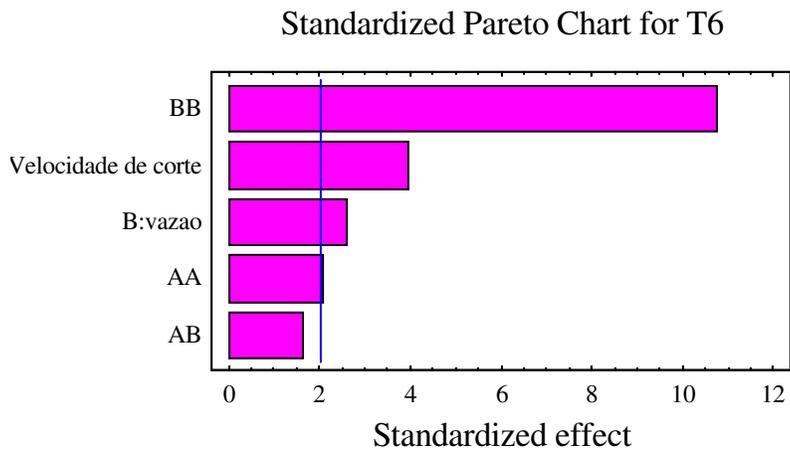


Figura 108 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #6.

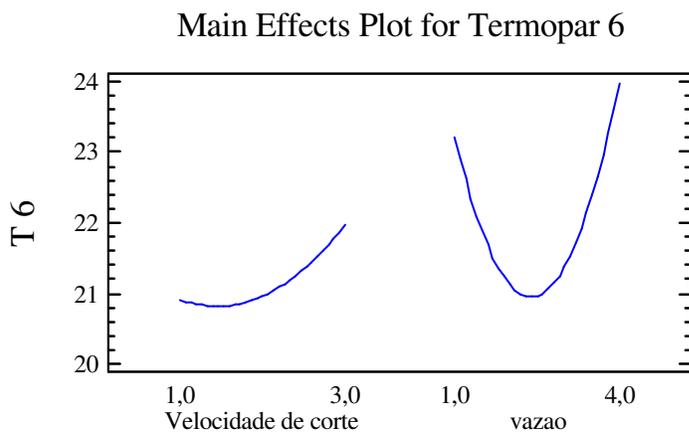


Figura 109 - Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #6.

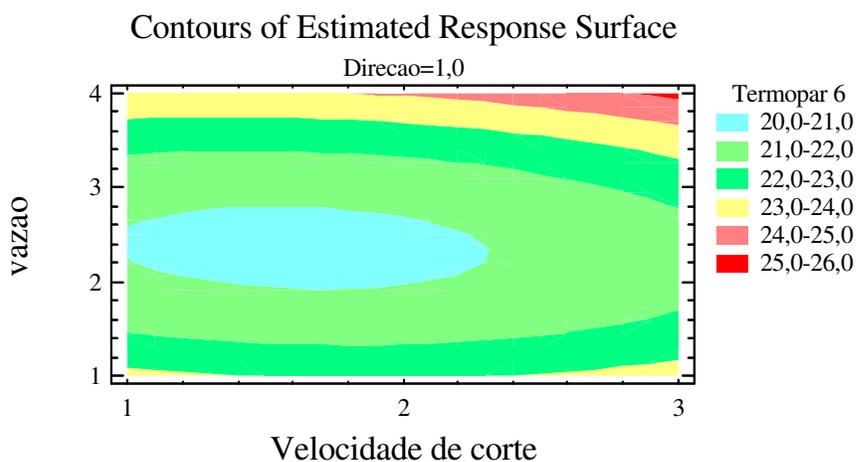


Figura 110 - Distribuição das temperaturas . Termopar #6.

As Figuras 93, 96, 99, 102, 105 e 108 mostram que a vazão é fator significativo para o efeito temperatura de usinagem. O fator direção não foi indicado como significativo por qualquer termopar.

As Figuras 94, 97 100, 103, 106 e 109 mostram como ocorre o comportamento dos fatores velocidade de corte e vazão. Percebe-se nitidamente que quanto maior a vazão tanto menor é o efeito temperatura. Percebe-se ainda que para o nível “4” (sem vazão) do fator vazão há o maior valor para o efeito temperatura, uma vez que esse nível corresponde a nenhuma vazão de CO₂.

As Figuras 95, 98, 101, 104, 107 e 110 mostram a distribuição das temperaturas com a direção de aplicação do fluido de corte ao nível “1” (mesmo sentido de corte), em função das variáveis “vazão” *versus* “velocidade de corte”.

Para cada termopar foi efetuada a regressão relacionada com os fatores vazão e direção. Os resultados são apresentados na Tabela 25.

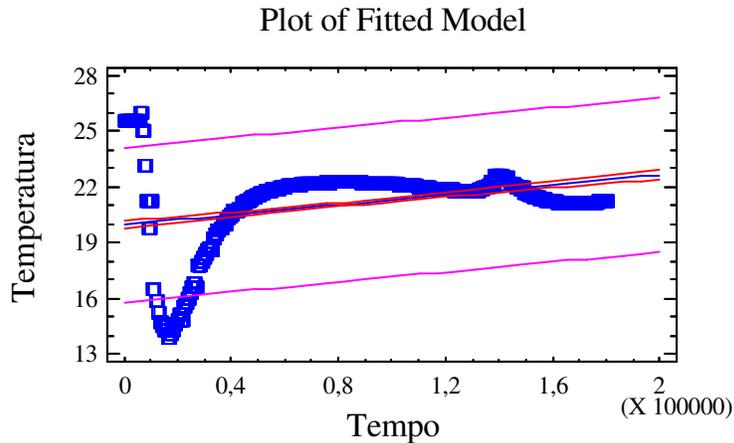
TABELA 25. Equações relacionadas com os termopares e os efeitos vazão e direção do fluido de corte. Eucalipto.

Termopar	Equação	R²
1	$T1 = 31,05 - 1,70xVC - 7,57xQ + 0,55xVC^2 + 0,12xVCxQ + 1,49xQ^2$	80,87%
2	$T2 = 30,60 - 2,09xVC - 7,09xQ + 0,57xVC^2 + 0,30xVCxQ + 1,32xQ^2$	77,96%
3	$T3 = 31,18 - 3,00xVC - 6,94xQ + 0,89xVC^2 + 0,10xVCxQ + 1,36xQ^2$	83,76%
4	$T4 = 29,96 - 2,34xVC - 6,32xQ + 0,82xVC^2 + 0,03xVCxQ + 1,29xQ^2$	83,30%
5	$T5 = 30,81 - 2,50xVC - 6,29xQ + 0,79xVC^2 + 0,02xVCxQ + 1,25xQ^2$	70,85%
6	$T6 = 29,47 - 1,58xVC - 5,98xQ + 0,47xVC^2 + 0,19xVCxQ + 1,16xQ^2$	75,31%
Geral	$Tn = 30,51 - 2,20xVC - 6,70xQ + 0,68xVC^2 + 0,13xVCxQ + 1,31xQ^2$	78,68%

VC = velocidade de corte; Q = vazão

4.2.2.2 Curvas de aquecimento para as condições de menor aquecimento apresentado durante a realização dos ensaios.

4.2.2.2.1. Condição 131.

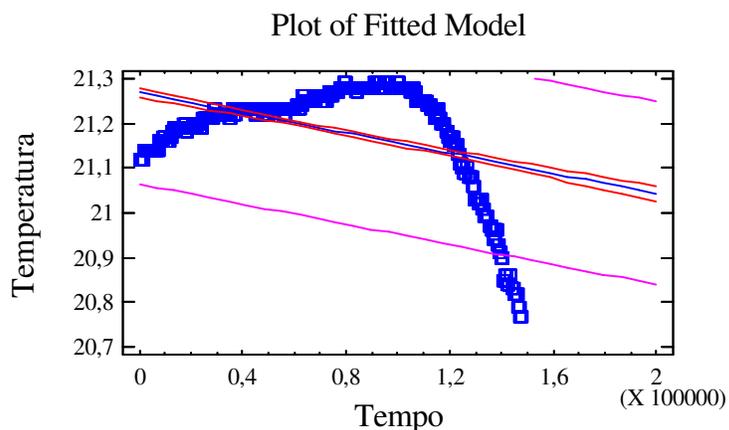


$$\text{Temperatura} = 1/(0,0520531 - 4,618 \times 10^{-8} \times \text{Tempo})$$

Figura 111 - Regressão condição 131 - termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $r = 0,379748$ e o R^2 é igual a 14,42 %. Observa-se que a temperatura durante o processo de usinagem manteve-se estável após os momentos iniciais .

4.2.2.2.2. Condição 231.

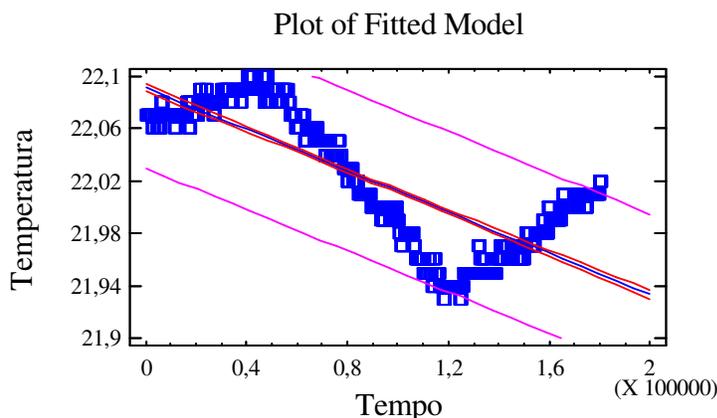


$$\text{Temperatura} = 1/(0,0470159 + 2,546 \times 10^{-9} \times \text{Tempo})$$

Figura 112 - Regressão condição 231- termopar #4.

Observa-se que para esta condição de usinagem a temperatura permaneceu em declínio durante todo o período de realização do ensaio.

4.2.2.2.3. Condição 331.



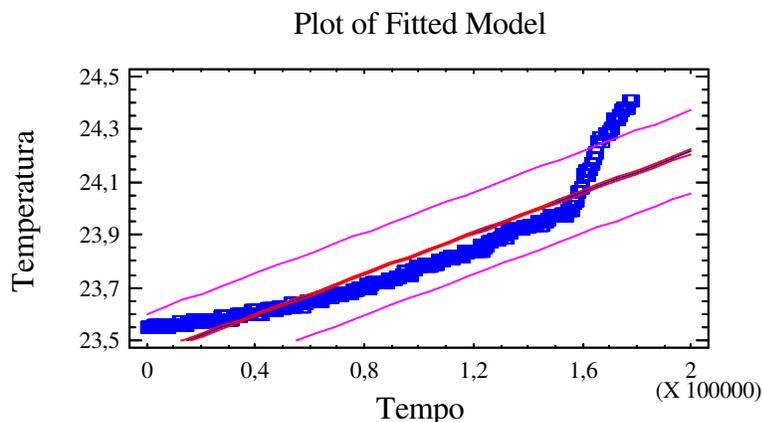
$$\text{Temperatura} = 22,0911 - 7,893 \times 10^{-7} \times \text{Tempo}$$

Figura 113 - Regressão condição 331- termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $-0,796$ e o R^2 é igual a $63,46\%$.

Para essa condição de corte o termopar registrou que entre o instante $t = 60000\text{ms}$ (60s) e $t = 120000\text{ms}$ (120s) a temperatura declinou-se, voltando a aumentar após esse intervalo e mantendo esse comportamento até o final do corte.

4.2.2.2.4. Condição 141.



$$\text{Temperatura} = 23,443 + 3,0 \times 10^{-6} \times \text{Tempo}$$

Figura 114 - Regressão condição 141- termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $r = 0,9284$ e o R^2 é igual a 86,20%.

Nota-se que a ausência do mecanismo de refrigeração implicou em uma curva ascendente relacionada com o aumento da temperatura decorrente do próprio processo de usinagem.

4.2.2.2.5. Condição 241.

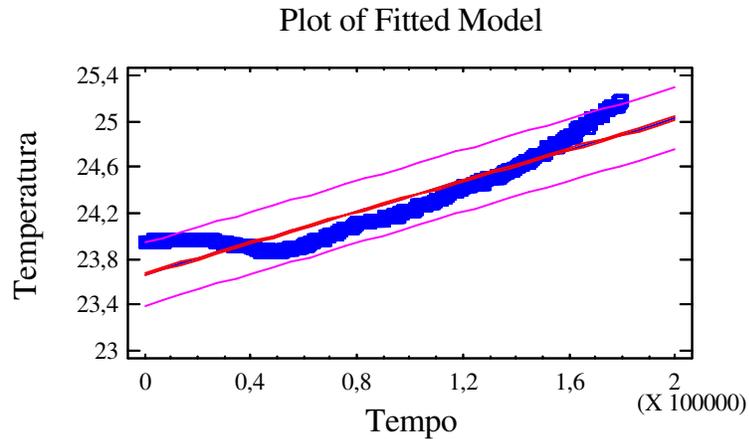
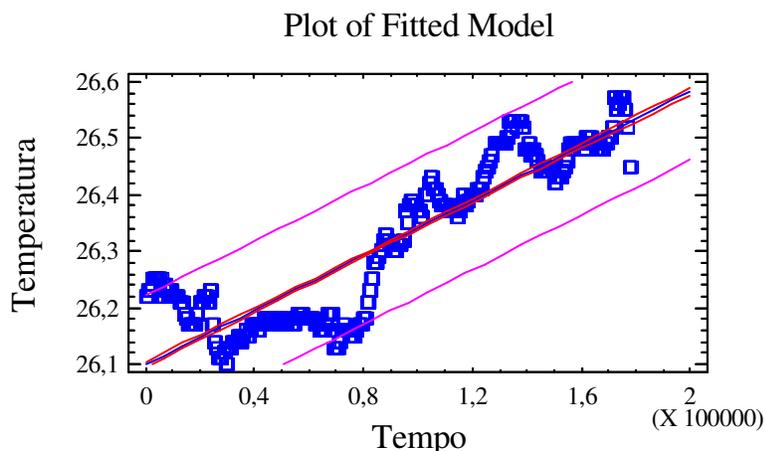


Figura 115 - Regressão condição 241- termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $r = 0,9309$ e o R^2 é igual a 86,66%.

Nota-se que a ausência do mecanismo de refrigeração implicou em uma curva ascendente relacionada com o aumento da temperatura decorrente do próprio processo de usinagem, com comportamento similar ao apresentado no item 4.2.2.5.4

4.2.2.2.6. Condição 341.



$$\text{Temperatura} = 26,0992 + 2,4 \times 10^{-6} \times \text{Tempo}$$

Figura 116 - Regressão condição 341 - termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $r = 0,8941$ e o R^2 é igual a 79,94%.

O comportamento de aquecimento para esta condição de usinagem mostra que o próprio efeito da velocidade de corte (neste caso, no maior nível), atua no sentido de refrigerar a ferramenta de corte. O aumento da temperatura aparenta ser escalonado, entretanto sempre ascendente.

4.2.2.3. Resumo dos resultados apresentados.

A Tabela 26 indica o resumo encontrado para as condições que apresentaram melhores resultados em termos de retirada de calor e compara com a situação onde não foi aplicado o mecanismo de refrigeração.

TABELA 26. Resultados obtidos pelo termopar #4.

Condição	Equação	R ²	Correlação
331	$22,09 - 7,89 \times 10^{-7} \times t$	63,46%	-0,796
231	$1/(0,047 + 2,54 \times 10^{-9} \times t)$	17,23%	-0,568
131	$1/(0,052 - 4,6 \times 10^{-9} \times t)$	14,42%	-0,380
341	$26,69 + 2,4 \times 10^{-6} \times t$	79,94%	0,894
241	$23,66 + 6,7 \times 10^{-6} \times t$	86,66%	0,931
141	$23,44 + 3,8 \times 10^{-6} \times t$	86,20 %	0,928

Os resultados mostram que a adoção do mecanismo de refrigeração utilizando o dióxido de carbono tende a reduzir o crescimento da temperatura decorrente do processo de usinagem, que pode ser observado pelo coeficiente angular da equação da condição 331, por exemplo. No entanto, percebe-se, adicionalmente, que tanto a correlação quanto o valor para R^2 são menores que aqueles relacionados com as equações representantes das condições de corte a seco.

4.2.3. Avaliação do estado superficial dos corpos de prova usinados. Operação de fresamento tangencial com fresa perfilada.

A avaliação do estado superficial dos corpos de prova foi realizada conforme procedimentos adotados no item 4.1.3. A metodologia adotada para efeitos de medição seguiu o disposto no item 3.1.5.6.

4.3.3.1. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ra.

Os resultados das medições da rugosidade Ra estão apresentados na Tabela 27 do Anexo.

Com base nesses resultados foi feita a análise estatística de modo a verificar a influência dos fatores envolvidos na experimentação. Importante é mencionar que para o caso de tomadas de medidas de rugosidade de corpos de prova fabricados em madeira ocorre considerável valor para o coeficiente de variação, deste modo, no propósito de superar essa circunstância, foram tomadas medidas e consideradas para análise somente aquelas que resultaram em coeficiente de variação ao valor máximo de 25%. Para as situações que excedessem esse patamar, o conjunto de medidas era descartado e novas medições eram realizadas.

Para efeitos de avaliação foi analisado o valor médio obtido entre as quatro medições.

As Figuras 117 e 118 mostram a influência dos fatores sobre o parâmetro de rugosidade Ra. Conforme observado, parece haver influência do fluido de corte no estado superficial, mensurado pelo parâmetro Ra.

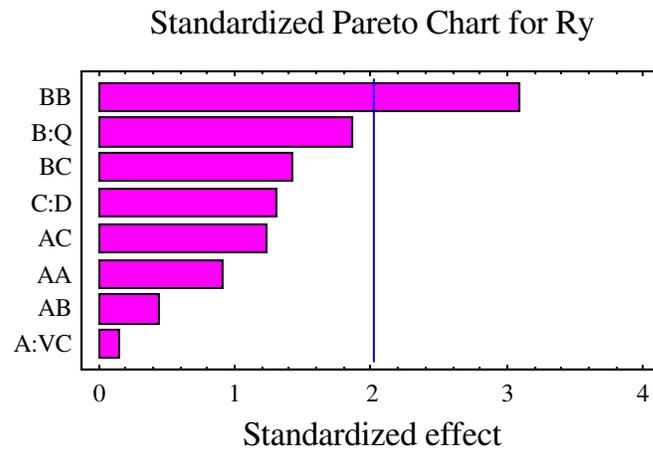


Figura 117 - Gráfico de Pareto -Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

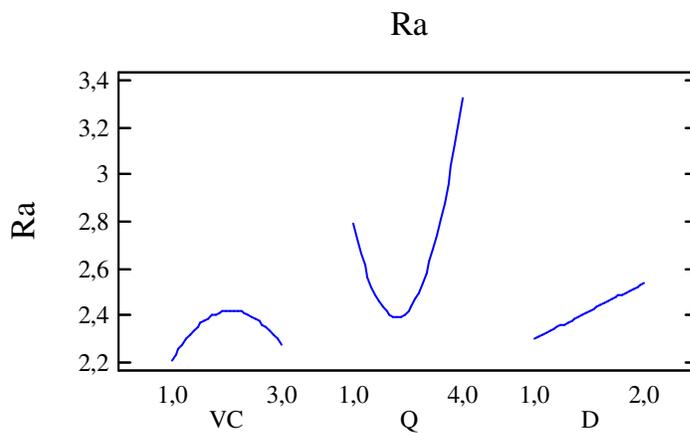


Figura 118 - Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

A Figura 119 mostra o gráfico de contorno cuja evidencia é dada para a direção “1” (mesmo sentido da ferramenta de corte). Observa-se que ao nível “4” do fator vazão (ou seja, sem vazão) ocorre os maiores valores para rugosidade superficial Ra.

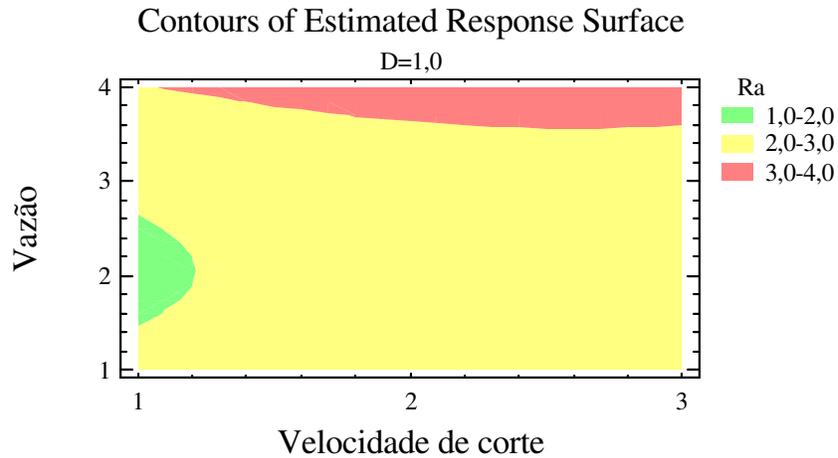


Figura 119 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação ao nível “1”.

A Figura 120 mostra o gráfico de contorno evidenciando a direção “2”. Observa-se que os melhores (menores valores) foram obtidos com o nível “2” e “3” para vazão.

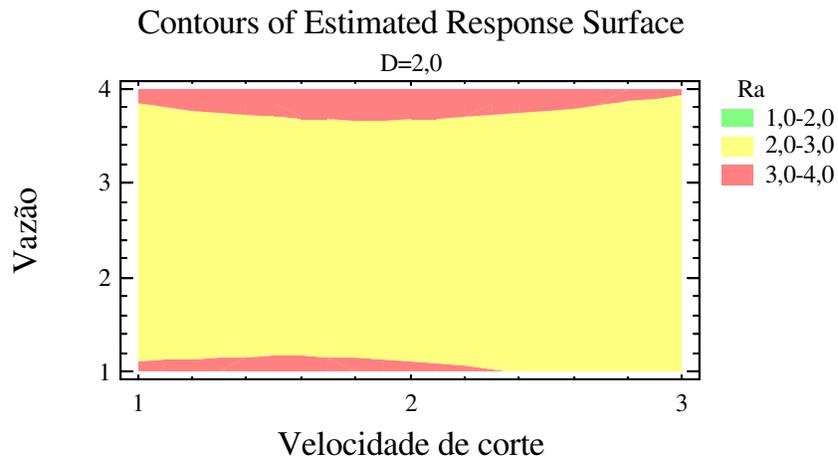


Figura 120 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação ao nível “2”.

A Tabela 28 expõe o resumo estatístico relacionado com o parâmetro de rugosidade Ra encontrado na superfície dos corpos de prova usinados. Na Tabela o fator “A” designa velocidade de corte, o fator “B” designa Vazão e o fator “C” direção.

Tabela 28. Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra apresentada pelos corpos de prova.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
A	0,00981	1	0,00981	0,02	0,8762
B	1,37741	1	1,37741	3,45	0,0710
C	0,67450	1	0,67450	1,69	0,2014
AA	0,33135	1	0,33135	0,83	0,3680
AB	0,07921	1	0,07921	0,20	0,6585
AC	0,60500	1	0,60500	1,52	0,2258
BB	3,81377	1	3,81377	9,55	0,0037
BC	0,81550	1	0,81550	2,04	0,1611
Bloco	0,01655	1	0,01655	0,04	0,8397
Erro total	15,1674	38	0,39914		
Erro total corrigido	23,1754	47			

Assim, com base nas Figuras dos gráficos e na análise estatística executada presume-se que o fator significativo seja a aplicação do fluido de corte (dióxido de carbono), como significativo em segunda ordem.

Nota-se pelas Figuras 119 e 120 que a rugosidade Ra tende a ser maior quando o nível de vazão é nulo (nível “4”). O fator direção parece apontar que os menores valores de rugosidade são obtidos quando a direção estava ao nível “1” (mesmo sentido da direção da ferramenta de corte).

Entretanto, o modelo como apresentado possui baixo ajuste, cujo valor encontrado para R^2 para o experimento foi de 34,55%, e o mesmo valor corrigido foi de 21,13%.

4.2.3.2. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ry.

Os resultados das medições do parâmetro Ry estão apresentados na Tabela 29 no Anexo.

Com base nesses resultados foi feita a análise estatística de modo a verificar a influência dos fatores envolvidos na experimentação.

A Figura 121 mostra a influência dos fatores sobre o parâmetro de rugosidade Ry. Para efeitos de avaliação foi analisado o valor médio obtido entre as quatro medições.

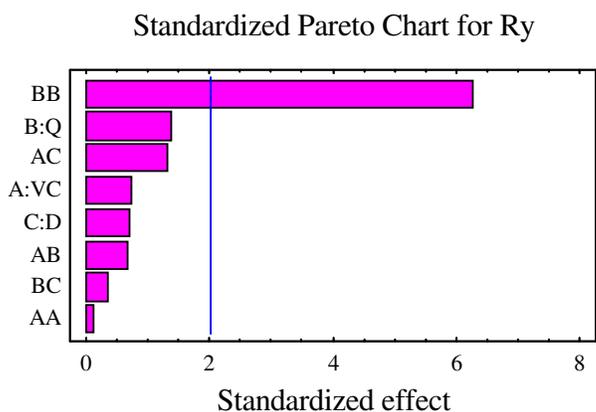


Figura 121 - Gráfico de Pareto -Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

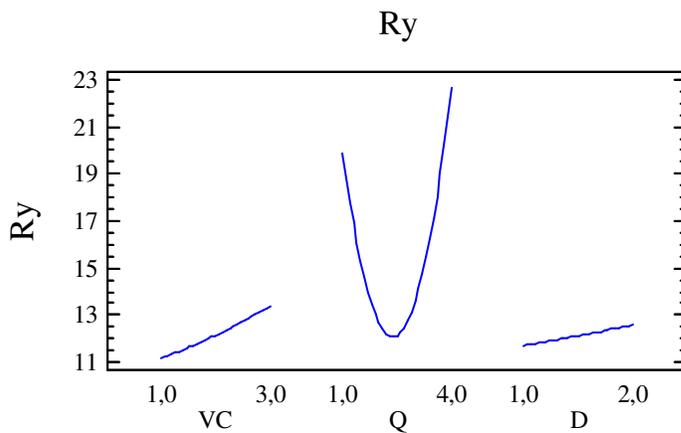


Figura 122 - Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

Conforme observado, parece haver influência da aplicação do fluido de corte no estado superficial, mensurado pelo parâmetro Ry.

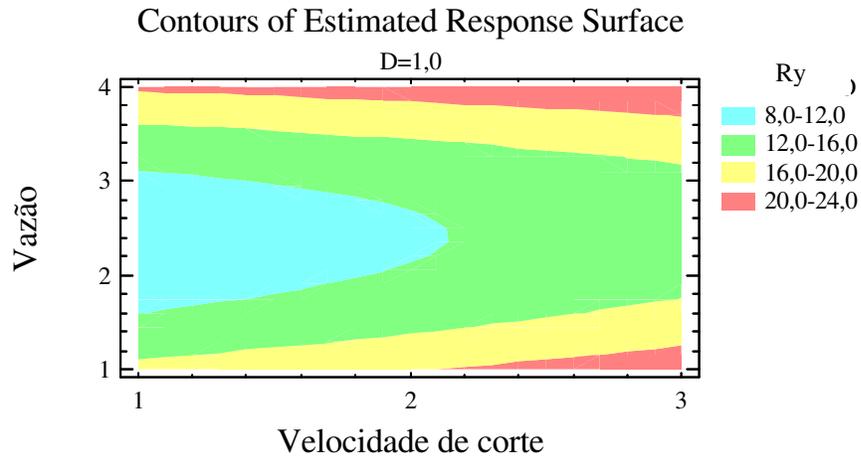


Figura 123 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação ao nível “1”.

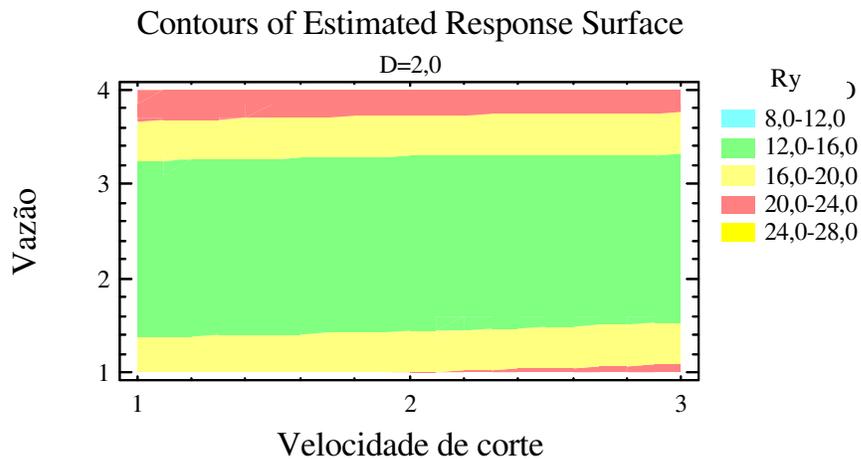


Figura 124 - Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação ao nível “2”.

A Tabela 30 expõe o resumo estatístico relacionado com o parâmetro de rugosidade Ry encontrado na superfície dos corpos de prova usinados. Na Tabela o fator “A” designa velocidade de corte, o fator “B” designa Vazão e o fator “C” direção.

Tabela 30. Influência dos fatores sobre a rugosidade R_y apresentada pelos corpos de prova.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
A	10,4291	1	10,4291	0,52	0,4770
B	36,5092	1	36,5092	1,81	0,1870
C	9,2225	1	9,2225	0,46	0,5035
AA	0,1837	1	0,1837	0,01	0,9245
AB	8,4456	1	8,4456	0,42	0,5219
AC	33,7842	1	33,7842	1,67	0,2039
BB	787,158	1	787,158	38,94	0,0000
BC	2,0906	1	2,0906	0,10	0,7495
Bloco	51,9739	1	51,9739	2,57	0,1171
Erro total	768,24	38	20,2168		
Erro total corrigido	1700,59	47			

Assim, com base nas Figuras dos gráficos e na análise estatística executada presume-se que o fator significativo seja a aplicação do fluido de corte (dióxido de carbono), como significativo em segunda ordem.

Nota-se pelas Figuras 123 e 124 que a rugosidade R_y tende a ser maior quando o nível de vazão é nulo (nível “4”). O fator direção parece apontar que os menores valores de rugosidade são obtidos quando a direção estava ao nível 1 (mesmo sentido da direção da ferramenta de corte).

Entretanto, o modelo apresentado possui médio ajuste, cujo valor encontrado para R^2 para o experimento foi de 54,82%, e o mesmo valor corrigido foi de 45,55%.

4.2.3.3. Avaliação dos defeitos macroscópicos sobre a superfície usinada.

A seguir são apresentadas figuras que mostram a condição superficial de alguns corpos de prova após o processamento.

4.2.3.3.1. Corpo de prova 27, Condição 141.



Figura 124 - Corpo de prova 27, Condição 141.

4.2.3.3.2. Corpo de prova 45, condição 241.



Figura 125 - Corpo de prova 45, Condição 241.

4.2.3.3.3. Corpo de prova 07, condição 341.



Figura 126 - Corpo de prova 07, condição 341.

4.2.3.3.4. Corpo de prova 037, condição 342.



Figura 127 - Corpo de prova 37, condição 342.

4.2.4. Avaliação da vibração no conjunto corpo de prova e máquina operatriz.

Conforme procedimento descrito no item 3.1.5.2, (Figura 34 a 36) foi medida a vibração do conjunto corpo de prova e máquina operatriz.

Percebeu-se que não ocorreu influência significativa na vibração medida durante a execução dos ensaios com a adição do fluido de corte com aqueles que não adotaram esse mecanismo de refrigeração.

De modo a propor essa análise, foram tomados os valores médios de cada conjunto de dados relacionados com cada corpo de prova, assim para a vazão “Q=1”, por exemplo, foram destinados para análise os oito dados relativos aos valores médios de cada ensaio realizado com esse nível de vazão. Cada valor teve origem nos 180 dados obtidos durante a realização de cada ensaio, do total de 48 ensaios realizados.

A Figura 128 mostra o gráfico de comparação das médias para os quatro níveis de vazão propostos aos experimentos, onde “Q1”, “Q2” e “Q3” retratam o uso do fluido de corte e “Q4” representa sua ausência.

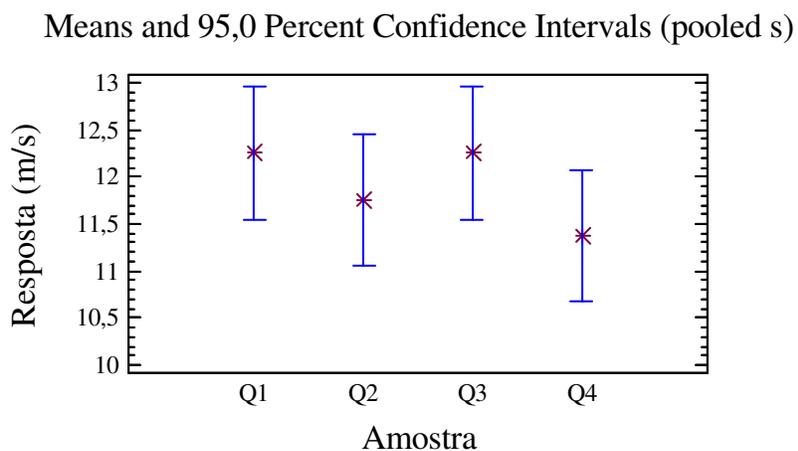


Figura 128 - Gráfico das médias para a análise de vibração resultante do corte dos corpos de prova referente à operação de fresamento tangencial.

A Tabela 31 resume os resultados estatísticos obtidos.

Tabela 31. Influência dos fatores sobre a vibração decorrente do processo de usinagem.

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
Entre os grupos	4,3437	3	1,448	1,54	0,2267
Dentro dos grupos	26,375	28	0,942		
Erro total corrigido	30,718	31			

4.2.5. Avaliação da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem.

O procedimento para a medição da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem foi realizado de acordo com o item 3.2.5.1, conforme Figura 49.

A análise dos dados obtidos foi feita de acordo com o mesmo procedimento do item 4.1.4. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 129 e Tabela 32.

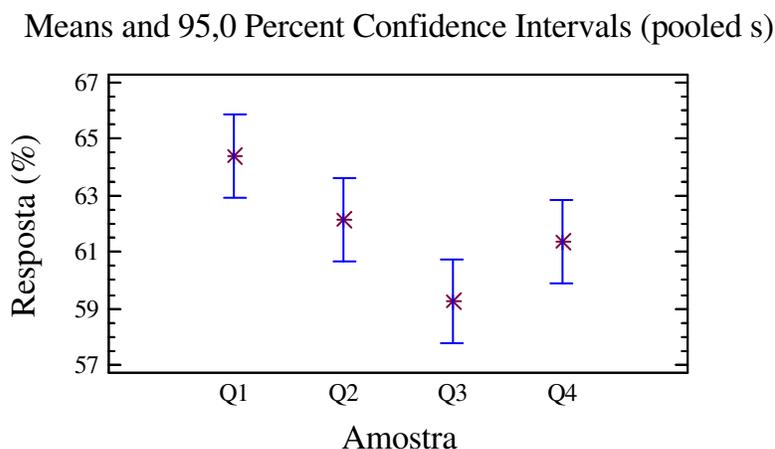


Figura 129 – Gráfico das médias para a análise da umidade relativa próxima a região onde ocorreu o corte referente à operação de fresamento tangencial.

Tabela 32. Influência dos fatores sobre a umidade relativa do ambiente próxima à região em processo de usinagem.

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
Entre os grupos	107,344	3	35,7813	8,48	0,0004
Dentro dos grupos	118,125	28	4,2187		
Erro total corrigido	225,469	31			

Conforme pode ser notado, a umidade relativa teve seu menor valor quando a vazão de dióxido de carbono foi empregada no maior nível (nível “3”). Nos níveis “1” e “2” desse fator a umidade relativa próxima à região em processo de usinagem foi maior que quando não ocorreu o emprego do mecanismo de refrigeração (nível “4”).

Importante mencionar que quanto menor a umidade próxima a região em processo de usinagem, tanto melhor para o material processado, uma vez que minimiza-se a absorção de qualquer condensado oriundo desse fenômeno.

4.2.6. Avaliação temperatura externa próxima à região em processo de usinagem.

O monitoramento da temperatura foi feito de acordo com a Figura 49 descrita no item 3.2.5.1. Verificou-se que a temperatura próxima à região em processo de usinagem manteve-se constantemente abaixo de 0°C em todos os níveis de aplicação do dióxido de carbono como fluido de corte.

4.3. Pinus Elliottii – Operação de serramento circular.

4.3.1. Caracterização dos corpos de prova.

Os resultados apresentados referem-se aos experimentos realizados com a máquina operatriz serra esquadrejadeira com a utilização de serras circulares. Para efeitos deste relatório, Todos os corpos de prova foram ensaiados seguindo-se o planejamento experimental mostrado no item 3.1.4.

A Tabela 33 no ANEXO apresenta os dados de caracterização dos corpos de prova fabricados com Pinus elliottii.

A Figura 130 mostra histograma da densidade aparente dos corpos de prova fabricados em pinus para a realização dos ensaios.

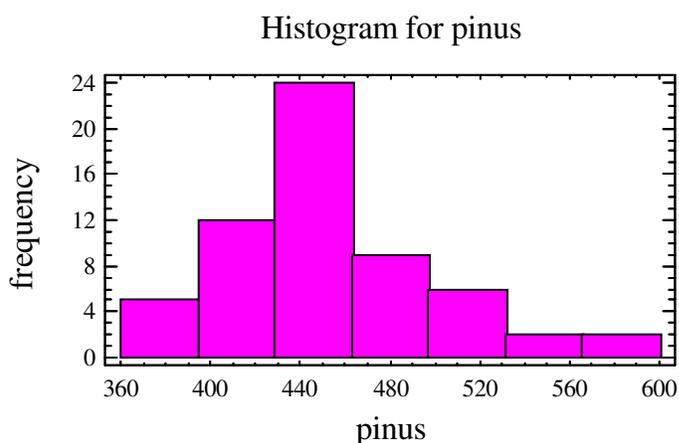


Figura 130. Histograma da densidade aparente dos corpos de prova de pinus.

A Tabela 34 contempla o sumário estatístico referente aos corpos de prova fabricados em pinus relacionado com a densidade aparente dos corpos de prova.

TABELA 34. Sumário estatístico para os corpos de prova de pinus - densidade aparente dos corpos de prova.

Estatístico	Valor
Contagem	60
Variância	2125,57
Mínimo	373,56
Máximo	568,79
Média	450,72
Desvio padrão	46,10
Amplitude	195,23
Curtose padrão	0,24
Alisamento padrão	2,32
Coefficiente de variação	10,23%

Dentre os materiais usinados, os corpos de prova fabricados em pinus apresentaram menor valor para a densidade aparente, cujo valor médio foi de 450,72kg/m³, o coeficiente de variação dos corpos de prova fabricados com essa madeira foi 10,23%.

4.3.2. Resultados pertinentes aos materiais usinados - monitoramento da temperatura.

Foram realizados os mesmos procedimento e análises descritos no item 4.1.3.

A Tabela 35 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada. Os valores anotados em azul indicam a condição que apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de aproximadamente 5,0%.

TABELA 35 – Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	111	112	121	122	131	132	141	142
1	26,75	21,10	22,05	25,75	22,65	18,00	26,01	22,40
2	25,00	20,01	24,00	24,49	21,30	21,00	26,00	22,75
3	25,59	23,05	21,05	23,00	21,51	19,01	25,19	22,10
4	25,01	23,05	24,20	21,84	21,40	21,82	25,02	22,05
5	24,87	23,82	21,40	21,82	21,41	19,40	24,95	21,96
6	25,20	23,01	25,10	21,80	20,60	22,81	25,21	22,01
Coefficiente de variação	3%	7%	7%	7%	3%	9%	2%	1%

A Tabela 36 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada. Os valores anotados em azul indicam a condição que apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de aproximadamente 5,0%.

TABELA 36 - Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	211	212	221	222	231	232	241	242
1	23,85	24,45	24,19	24,01	21,97	26,56	26,75	26,25
2	23,74	24,23	22,90	24,07	21,92	22,79	24,27	24,94
3	24,08	23,76	22,67	22,35	18,17	22,79	26,70	22,70
4	22,61	23,05	22,61	21,04	21,05	21,03	26,22	23,53
5	22,73	22,05	22,32	22,10	19,46	23,31	26,22	23,53
6	23,11	23,59	22,20	22,45	20,76	22,73	23,92	23,60
Coefficiente de variação	3%	4%	3%	5%	7%	8%	5%	5%

A Tabela 37 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada. Os valores anotados em azul indicam a condição que apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em

vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de aproximadamente 4,0%.

TABELA 37 - Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	311	312	321	322	331	332	341	342
1	21,89	24,94	22,75	24,94	18,05	24,41	26,10	26,95
2	21,75	24,59	21,68	24,59	21,26	24,10	26,13	26,42
3	22,58	24,85	24,84	21,58	19,02	23,54	25,80	24,35
4	21,54	24,38	21,88	24,38	21,36	23,65	24,65	25,29
5	21,97	24,24	21,39	23,00	19,38	24,24	24,64	24,12
6	22,01	24,10	22,80	24,10	20,60	23,54	25,17	25,47
Coeficiente de variação	2%	1%	6%	5%	7%	2%	3%	4%

Os resultados apresentados pelas análises dos valores obtidos pelos termopares, relacionados nas Tabelas 35, 36 e 37, levam as seguintes considerações:

- *Para as três velocidades de corte adotadas os menores valores de temperatura foram obtidos com a vazão de 45g/min de dióxido de carbono aplicado no mesmo sentido de corte da ferramenta. (131; 231; 331). Idem aos processos relacionados com o eucalipto.*

- *Quando a vazão do fluido de corte era reduzida para outros níveis, a temperatura registrada também era aumentada.*

- *Fica evidenciado que a adoção do mecanismo de refrigeração reduz o valor de temperatura na região em processo de usinagem. Sempre a usinagem a seco retornou em maior aquecimento da região em processo de usinagem. (141; 241; 341 e 142; 242; 342)*

4.3.2.1. Avaliação dos fatores e níveis relacionados com a temperatura de usinagem.

Com base no planejamento experimental citado no item 3.1.4, foram feitas as análises de significância dos fatores velocidade de corte, vazão e direção de aplicação do fluido de corte. A análise foi feita para todos os termopares, cada qual apresentada individualmente.

Termopar #1.

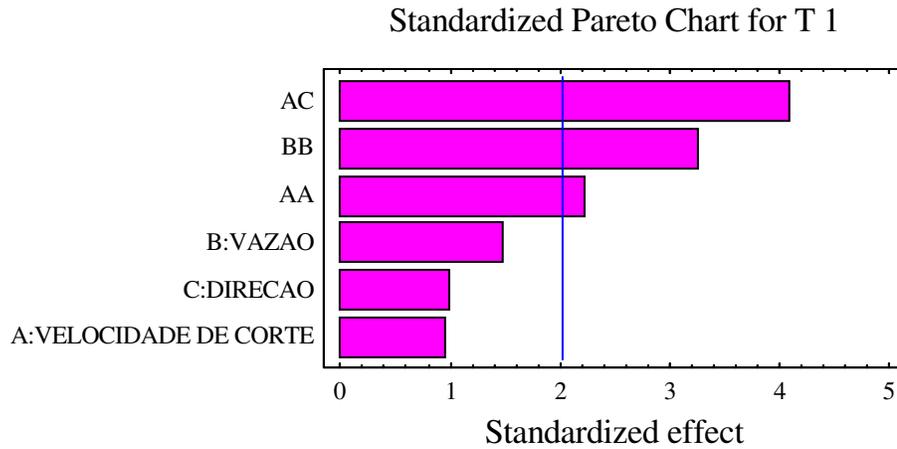


Figura 131 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #1.

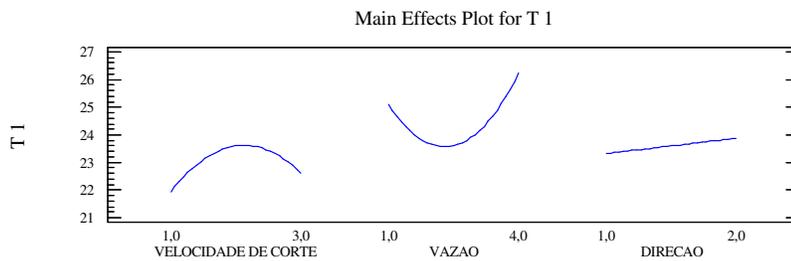


Figura 132 - Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #1.

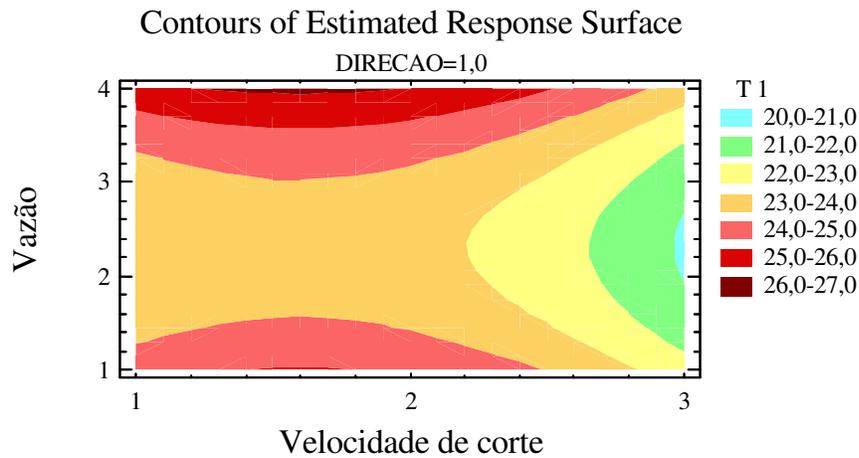


Figura 133 - Distribuição das temperaturas. Termopar #1.

Termopar #2.

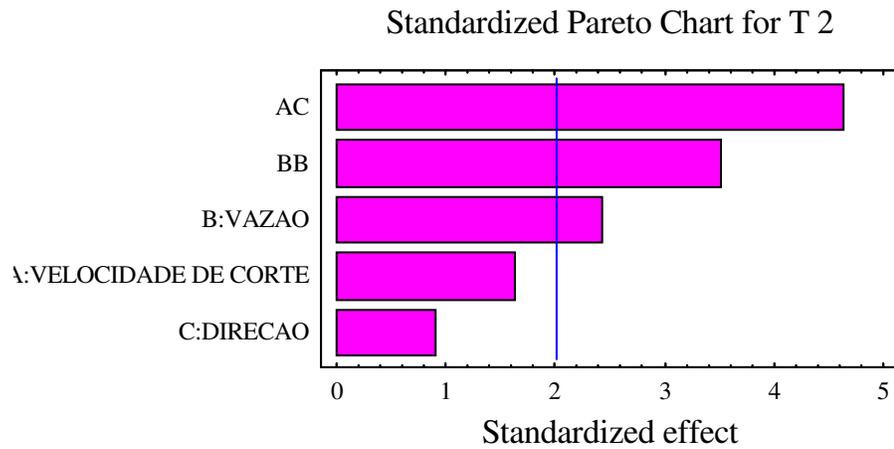


Figura 134 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #2.

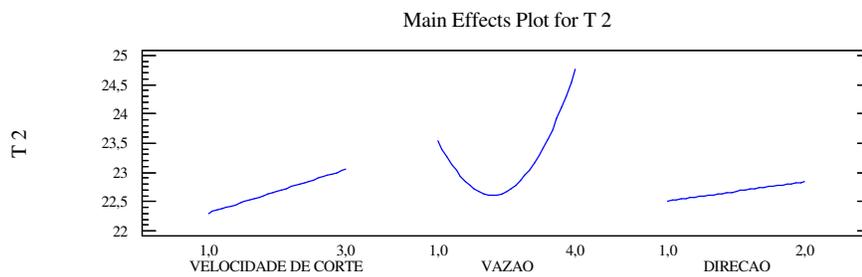


Figura 135 - Comportamento dos efeitos principais relacionados com o termopar #2.

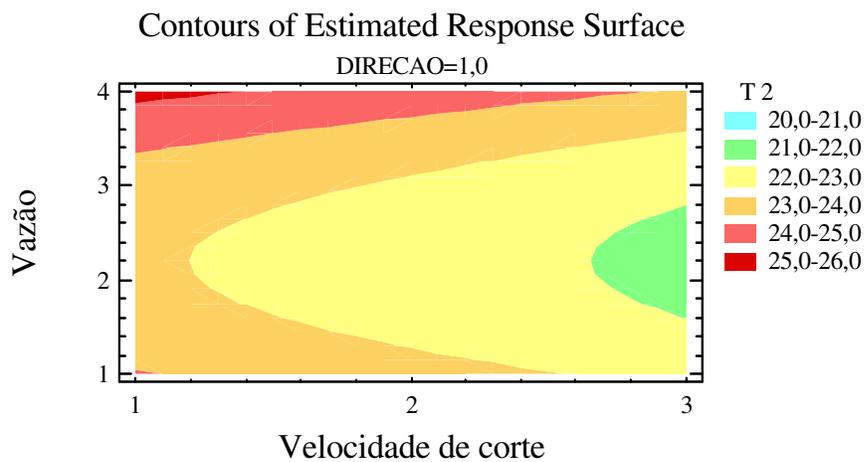


Figura 136 - Distribuição das temperaturas. Termopar #2.

Termopar #3.

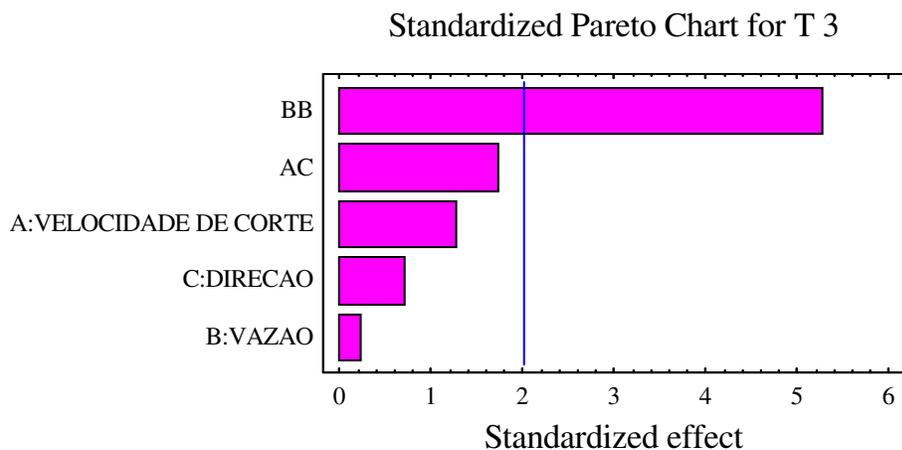


Figura 137 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #3

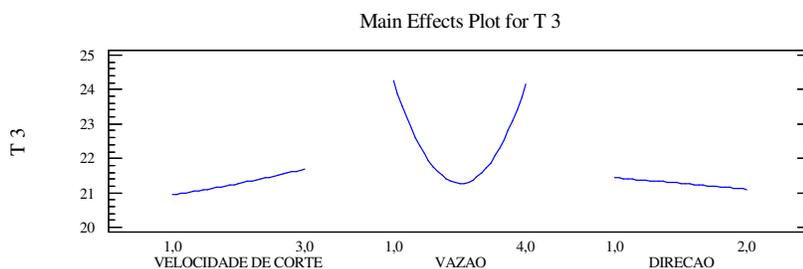


Figura 138 - Comportamento dos efeitos principais relacionados com o termopar #3.

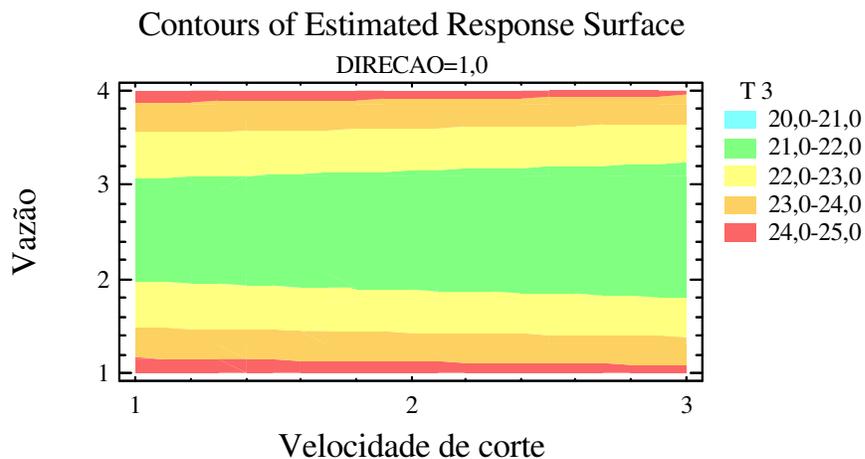


Figura 139 - Distribuição das temperaturas. Termopar #3.

Termopar #4.

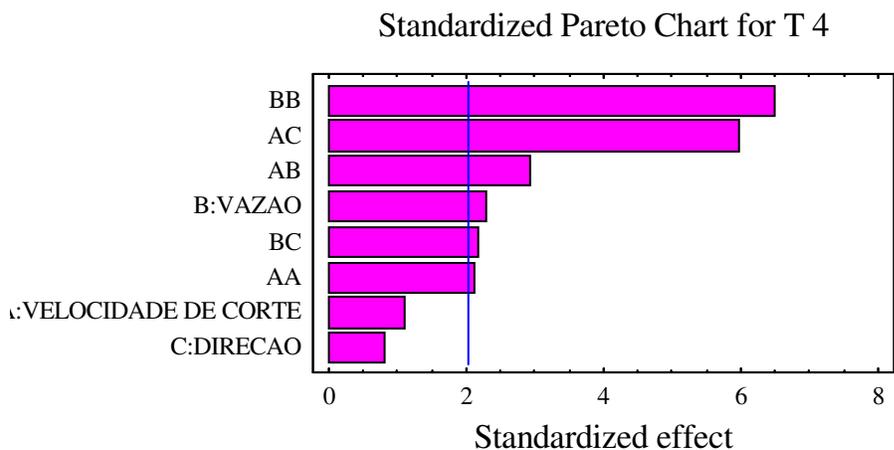


Figura 140 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #4.

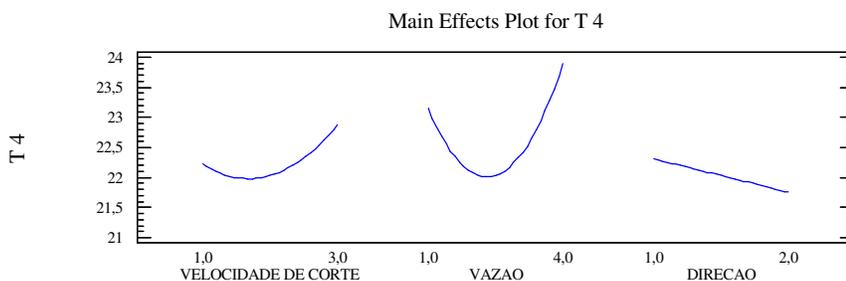


Figura 141 - Comportamento dos efeitos principais relacionados com o termopar #4.

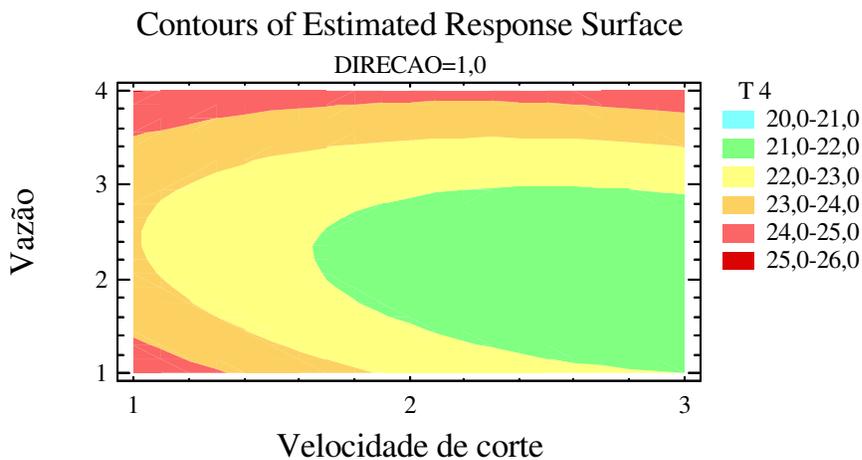


Figura 142 - Distribuição das temperaturas. Termopar #4.

Termopar #5.

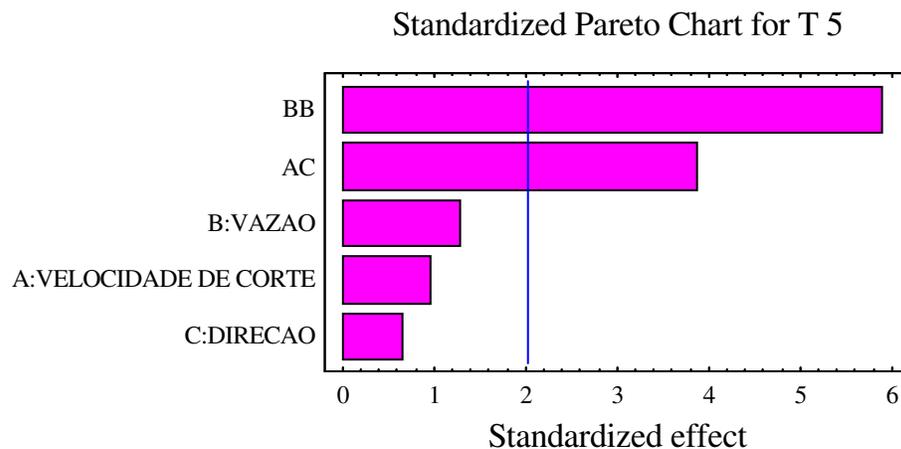


Figura 143 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #5.

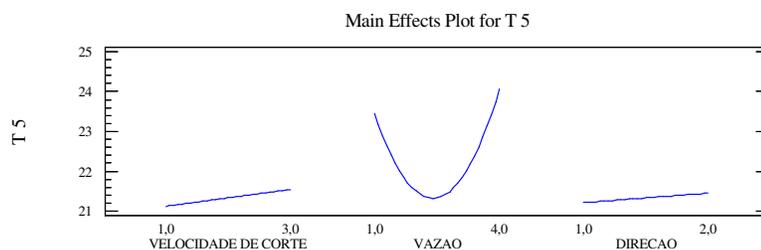


Figura 144 - Comportamento dos efeitos principais relacionados com o termopar #5.

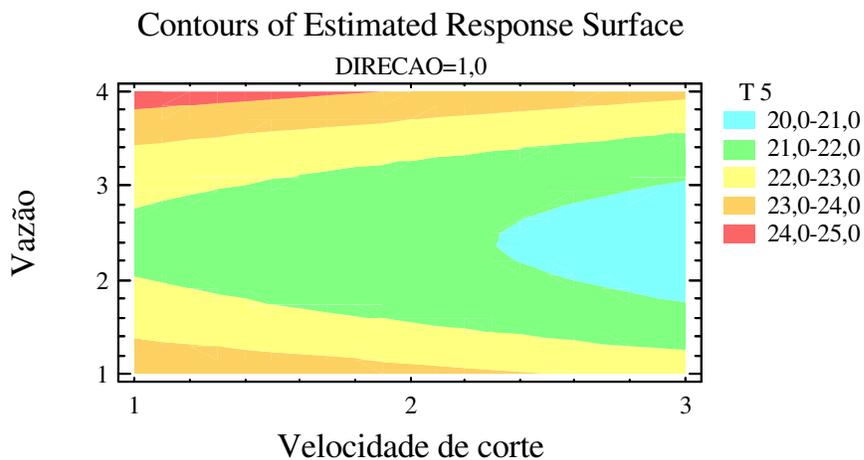


Figura 145 - Distribuição das temperaturas. Termopar #5.

Termopar #6.

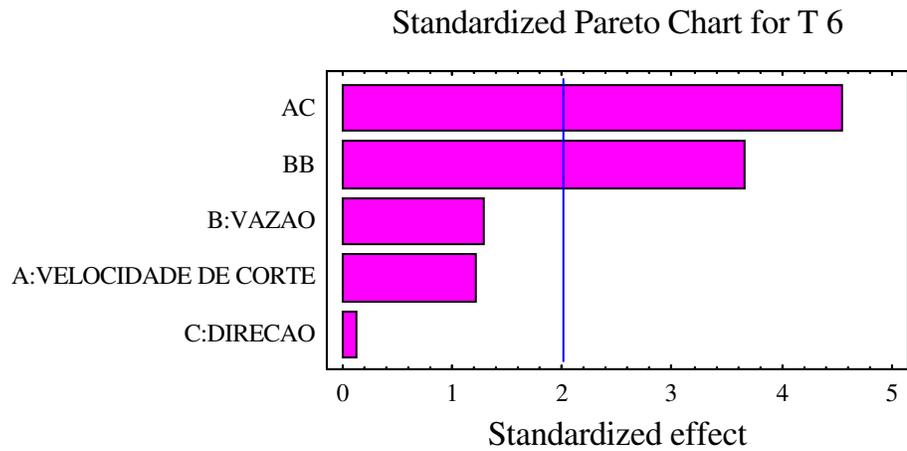


Figura 146 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #6.

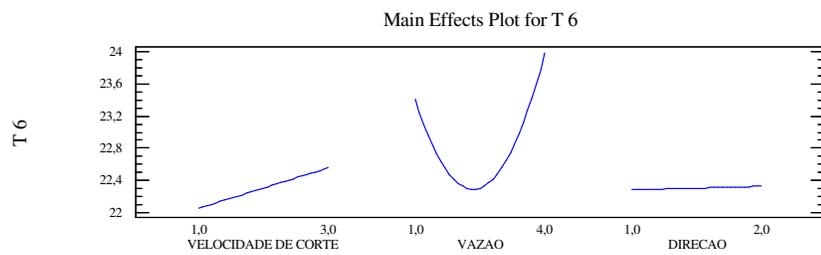


Figura 147 - Comportamento dos efeitos principais relacionados com o termopar #6.

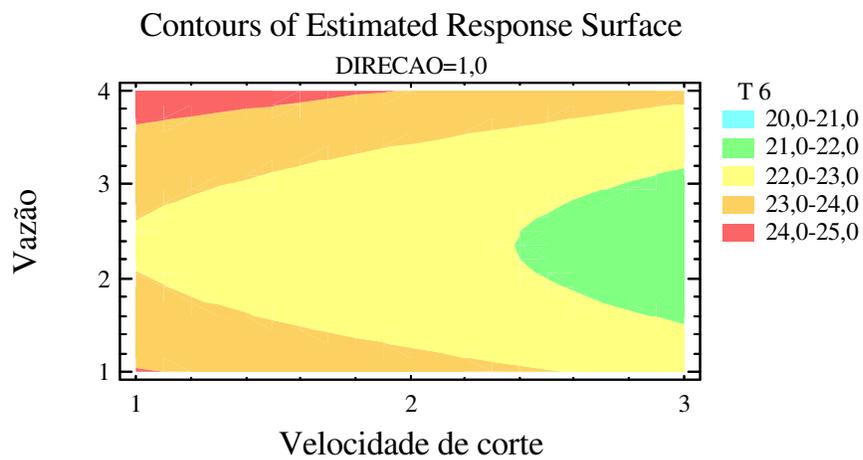


Figura 148 - Distribuição das temperaturas. Termopar #6.

As Figuras, 131, 134, 137, 140, 143 e 146 mostram que a vazão é fator significativa para o efeito temperatura de usinagem. O fator direção não foi indicado como significativa por qualquer termopar.

As Figuras 132, 135, 138, 141, 144 e 147 mostram como ocorre o comportamento dos fatores velocidade de corte, vazão e direção. Percebe-se nitidamente que quanto maior a vazão tanto menor é o efeito temperatura. Percebe-se ainda que para o nível 4 (sem vazão) do fator vazão há o maior valor para o efeito temperatura, uma vez que esse nível corresponde a nenhuma vazão de CO₂. O comportamento do fator direção mostra que as menores temperaturas foram obtidas quando o fluido de corte é adicionado no sentido de corte da ferramenta (nível 1); apenas os termopares #3 e #4 indicam que há favorecimento quando o fluido de corte é adicionado no sentido contrário (nível 2) ao corte do material, esse fenômeno foi igualmente detectado durante a usinagem dos corpos de prova de eucalipto.

As Figuras 133, 136, 139, 142, 145 e 148 mostram a distribuição das temperaturas com a direção de aplicação do fluido de corte ao nível “1” (mesmo sentido de corte), em função das variáveis “vazão” *versus* “velocidade de corte”.

Para cada termopar foi efetuada a regressão relacionada com os fatores vazão e direção. Os resultados são apresentados na Tabela 38.

TABELA 38. Equações relacionadas com os termopares e os efeitos vazão e direção do fluido de corte. Pinus.

Termopar	Equação	R ²
1	$T_1 = [30,08 + (1,41 \times Vc) - (4,23 \times Q) - (5,10 \times D) - (1,33 \times Vc^2) + (2,832 \times Vc \times D) + (0,921 \times Q^2)]$	39,23%
2	$T_2 = [30,86 - (2,80 \times Vc) - (2,87 \times Q) - (3,89 \times D) + (2,11 \times Vc \times D) + (0,655 \times Vc^2)]$	45,60%
3	$T_3 = [32,39 - (1,17 \times Vc) - (6,54 \times Q) - (2,40 \times D) + (1,03 \times Vc \times D) + (1,300 \times Q^2)]$	37,60%
4	$T_4 = [34,34 - (6,01 \times Vc) - (4,01 \times Q) - (2,74 \times D) + (0,57 \times Vc^2) + (0,415 \times Vc \times Q) + (1,89 \times Vc \times D) + (0,84 \times Q^2) - (0,50 \times Q \times D)]$	67,10%
5	$T_5 = [31,97 - (2,39 \times Vc) - (5,18 \times Q) - (3,22 \times D) + (1,73 \times Vc \times D) + (0,077 \times Q^2)]$	50,76%
6	$T_6 = [30,79 - (2,58 \times Vc) - (2,91 \times Q) - (3,73 \times D) + (1,88 \times Vc \times D) + (0,621 \times Q^2)]$	41,30%
Geral	$T_n = [31,74 - (2,25 \times Vc) - (4,31 \times Q) - (3,51 \times D) + (0,52 \times Vc \times D) - (0,02 \times Vc^2) + (0,07 \times Vc \times Q) + (1,39 \times Vc \times D) + (0,69 \times Q^2) - (0,08 \times Q \times D)]$	46,90%

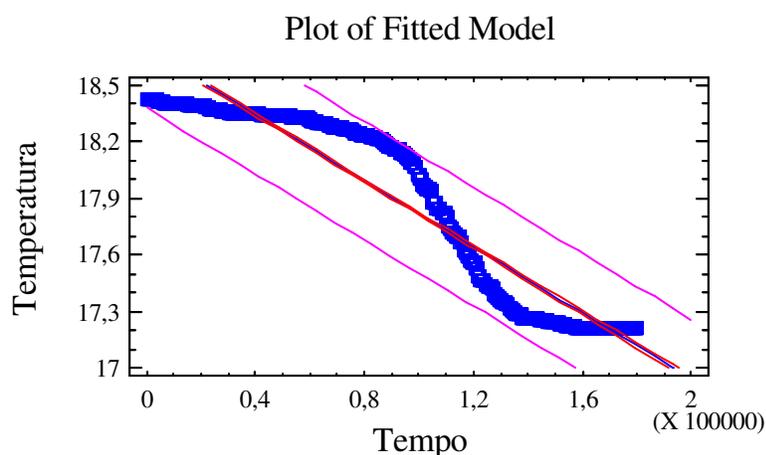
Q = vazão; D = direção; Vc = velocidade de corte

As regressões que apresentaram melhores ajustes são, em ordem crescente, aquelas relacionadas com os termopares #4, #5 e #2, todas com valores maiores que 45% para R². O ajuste com menor R² está relacionado com o termopar #3. A regressão apresentada em azul é a combinação das regressões dos seis termopares. Para sua obtenção foram somados os coeficientes de cada equação e dividido proporcionalmente pelos seis termopares.

4.3.2.2. Curvas de aquecimento para as condições de menor aquecimento apresentado durante a realização dos ensaios.

Para efeitos de comparação, foram elaboradas as curvas de aquecimento para as condições 132, 231 e 331. Essas condições apresentaram menor aquecimento registrado pelo sistema de medição de temperatura. Foram analisados os resultados obtidos a partir do termopar #4 e #1. Também foram elaboradas as curvas de aquecimento das condições 141, 241 e 341, pois foram às condições que apresentaram maiores temperaturas registradas durante o processo de usinagem dos corpos de prova.

4.3.2.2.1. Condição 132.



$$\text{Temperatura} = 18,6231 - 7,6 \times 10^{-6} \times \text{Tempo}.$$

Figura 149 - Regressão condição 132 - termopar #1.

A temperatura decorrente do processo de usinagem mostrou-se em declínio, com tendência de estabilização após o intervalo $t = 2,5\text{min}$. O coeficiente de correlação para a função foi 0,9431 e o R² foi igual a 88,95%. A taxa de declínio da temperatura é de 1°C para cada 2,16min.

4.3.2.2.2. Condição 231.

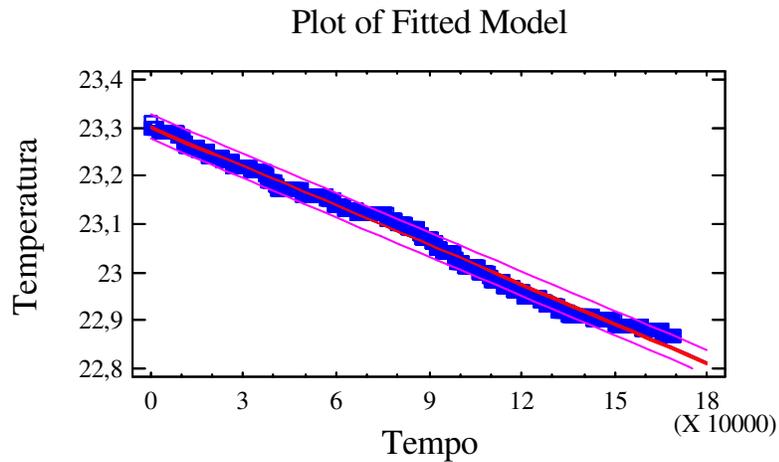


Figura 150 - Regressão condição 231 - termopar #4.

O declínio da temperatura foi de 1°C para cada seis minutos, o coeficiente de correlação obtido foi de -0,990 e o R² foi de 99,09%. Percebe-se que o comportamento do decréscimo da temperatura é tipicamente linear.

4.3.2.2.3. Condição 331.

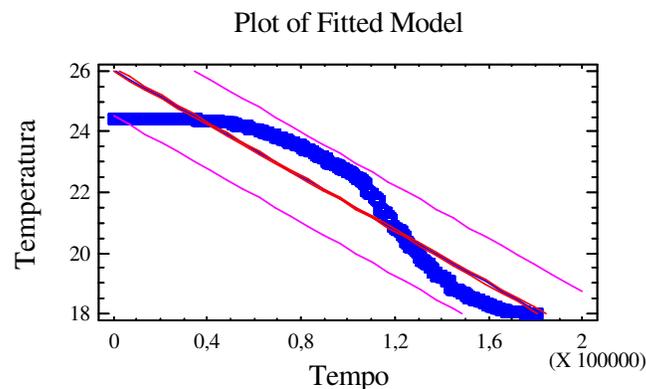
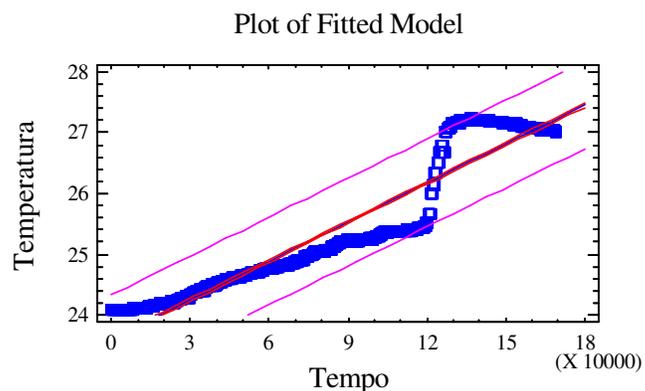


Figura 151 - Regressão condição 331 - Termopar #4.

O modelo apresenta declínio no registro da temperatura feita pelo termopar #4. Até o instante $t = 1\text{min}$ a temperatura manteve-se estável, com sequencial redução até o final do corte. O modelo apresenta o coeficiente de correlação igual a 0,949 e R² igual a 90,14%. A taxa de declínio da temperatura foi de 3°C para cada minuto.

4.3.2.2.4. Condição 141.

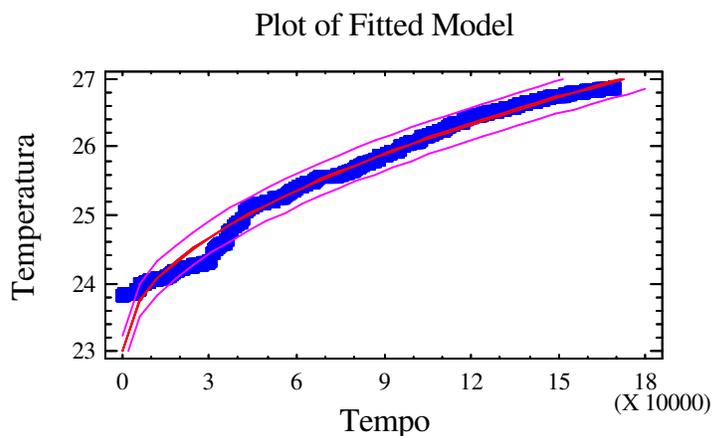


$$\text{Temperatura} = 23,612 + 2,1 \times 10^{-5} \times \text{Tempo}$$

Figura 152 - Regressão condição 141. Termopar #4.

O modelo indica que o aumento da temperatura registrada pelo termopar foi acentuado a partir o instante $t = 1,8\text{min}$. O coeficiente de correlação foi $-0,929$ e o R^2 foi igual a $86,48\%$.

4.3.2.2.5. Condição 241.

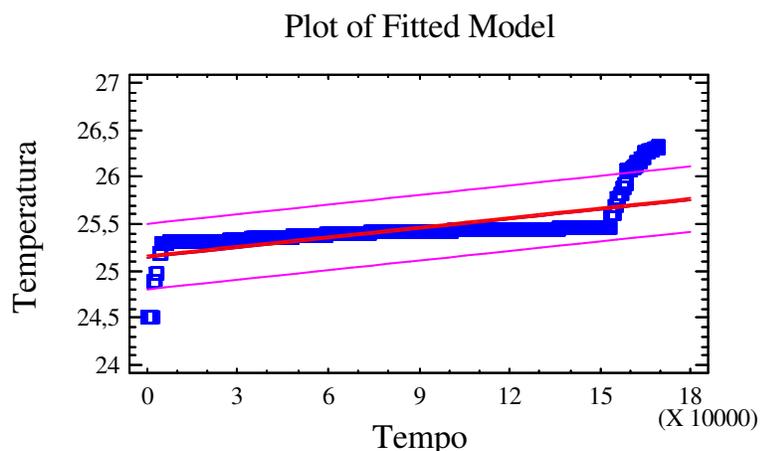


$$T = 22,993 + 0,01 \times \sqrt{t}$$

Figura 153 - Regressão condição 241. Termopar #4.

O aumento de temperatura foi constante. Seguindo um modelo exponencial, o coeficiente de correlação obtido foi igual a $0,9914$ e o R^2 igual a $98,28\%$.

4.3.2.2.6. Condição 341.



$$T = 1/(0,04 - 5,206 \times 10^{-9} \times t)$$

Figura 154 - Regressão condição 341 - Termopar #4.

A temperatura se manteve estável até o instante entre o instante $t = 15s$ até o instante $t = 2,5min$, a partir do qual ocorreu aumento da temperatura até o final do corte. O modelo apresentado possui coeficiente de correlação igual $-0,685\%$ e R^2 igual a $46,90\%$.

4.3.2.3. Resumo dos resultados apresentados.

A Tabela 39 indica o resumo encontrado para as condições que apresentaram melhores resultados em termos de retirada de calor e compara com a situação onde não foi aplicado o mecanismo de refrigeração.

TABELA 39. Resultados obtidos pelo termopar #4.

Condição	Equação	R^2	Correlação	Taxa de aquecimento
331	$T = 26,0395 - 4,4 \times 10^{-5} \times t$	90,14%	-0,949	-300%
231	$T = 16,6046 + 1,7 \times 10^{-5} \times t$	99,09%	-0,990	-17%
131	$T = 18,6231 - 7,7 \times 10^{-6} \times t$	88,95%	-0,9431	-50%
341	$T = 1/(0,0397538 - 5,20 \times 10^{-9} \times t)$	46,90%	-0,684	25%
241	$T = 22,9926 + 0,01 \times \text{raiz}(t)$	98,28%	0,991	100%
141	$T = 23,6126 + 2,1 \times 10^{-5} \times t$	88,98%	0,943	150%

Para as condições que adotaram o mecanismo de refrigeração os modelos matemáticos para as equações de regressão tendem a ser lineares, com elevado valor de

correlação e R^2 , A taxa de aquecimento, expressa em porcentagem, reflete em quantos graus Celsius por minuto é elevada ou reduzida a temperatura durante o processo de usinagem. A condição com o uso do mecanismo de refrigeração com maior taxa de decréscimo foi a 331.

Para as condições que não adotaram o mecanismo de refrigeração, os modelos matemáticos para as equações de regressão tendem a ser não lineares, com valores razoáveis de correlação e R^2 . A condição que apresenta maior taxa de aquecimento sem a adoção do mecanismo de refrigeração foi a 141, que retrata a velocidade de corte 5945,50m/min. Nota-se que a falta do mecanismo de refrigeração implica em menores valores de correlação e ajuste da função que denota o aquecimento. Pode-se afirmar que a não adoção do mecanismo de refrigeração não permite o efetivo controle do efeito temperatura durante o processo de usinagem de materiais, para o caso apresentado, o pinus.

4.3.3. Avaliação do estado superficial dos corpos de prova usinados. Operação de serramento circular com serra circular.

A avaliação do estado superficial dos corpos de prova foi realizada por dois métodos, a avaliação de defeitos macroscópicos e a avaliação da rugosidade superficial da região usinada. Com referência a avaliação da rugosidade superficial, avaliou-se os parâmetros R_a e R_y . A metodologia adotada para efeitos de medição seguiu o disposto no item 3.1.5.6.

4.3.3.1. Avaliação do parâmetro de rugosidade R_a .

Os resultados obtidos para o parâmetro R_a são apresentados na Tabela 40 do ANEXO.

Com base nesses resultados foi feita a análise estatística de modo a verificar a influência dos fatores envolvidos na experimentação. É importante mencionar que para o caso de tomadas de medidas de rugosidade de corpos de prova fabricados com esse material ocorre valor considerável para o coeficiente de variação, deste modo, no propósito de superar essa circunstância, foram tomadas medidas e consideradas para análise somente aquelas que resultaram em coeficiente de variação ao valor máximo de 25%. Para as situações que excedessem esse patamar, o conjunto de medidas era descartado e novas medições eram realizadas.

Para efeitos de avaliação foi analisado o valor médio obtido entre as quatro medições.

As Figuras 155 e 156 mostram a influência dos fatores sobre o parâmetro de rugosidade Ra. Conforme observado, parece haver influência da direção de aplicação do fluido de corte no estado superficial, mensurado pelo parâmetro Ra.

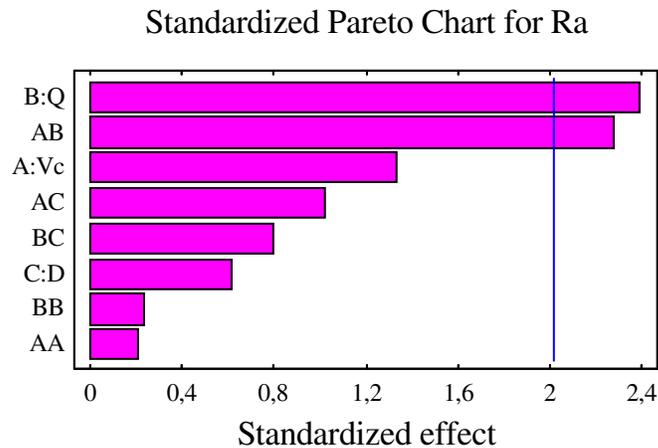


Figura 155 – Gráfico de Pareto -Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

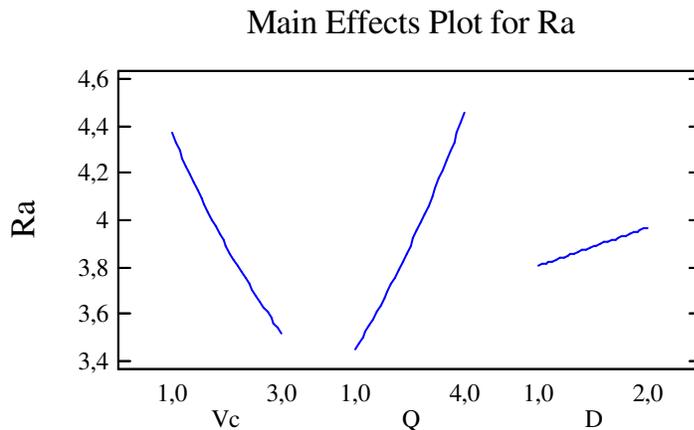


Figura 156 - Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

A Figura 157 mostra o gráfico de contorno cuja evidencia é dada para a direção “1” (mesmo sentido da ferramenta de corte). Observa-se que ao nível “4” do fator vazão (ou seja, sem vazão) ocorre os maiores valores para rugosidade superficial Ra.

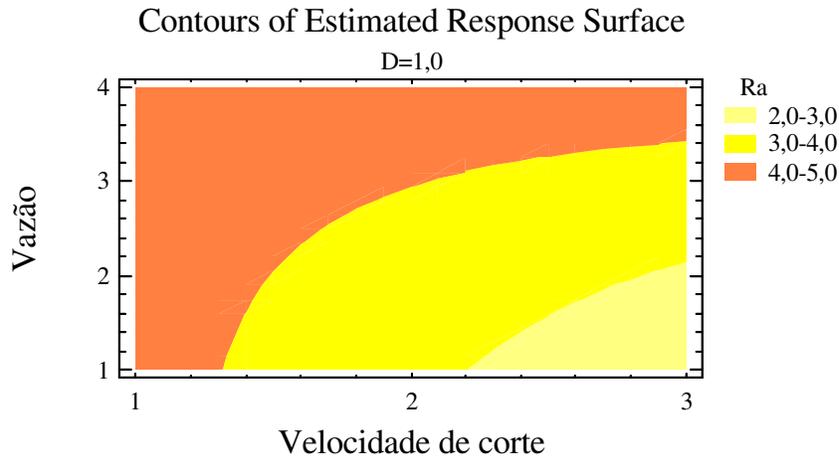


Figura 157 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação “1”

A Figura 158 mostra o gráfico de contorno evidenciando a direção “2”. Observa-se que os melhores (menores valores) foram obtidos com o nível “2” e “3” para vazão, combinado com a velocidade de corte ao nível “3”.

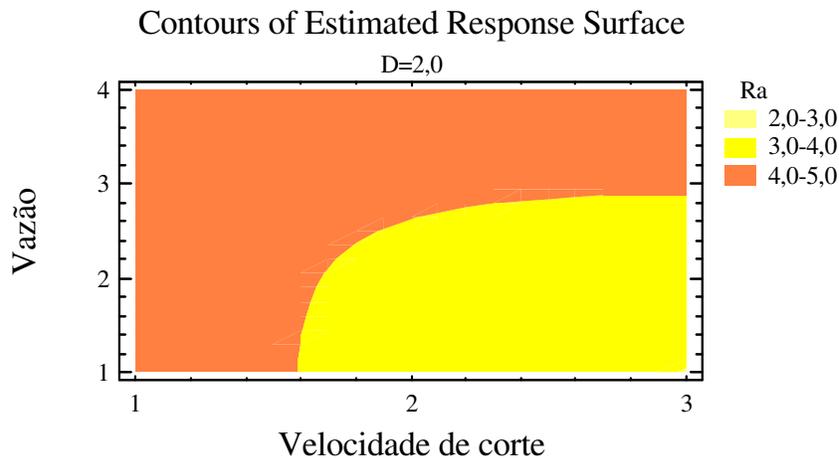


Figura 158 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação 1.

A Tabela 41 expõe o resumo estatístico relacionado com o parâmetro de rugosidade Ra encontrado na superfície dos corpos de prova usinados. Na Tabela o fator “A” designa velocidade de corte, o fator “B” designa Vazão e o fator “C” direção.

Tabela 41 - Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra apresentada pelos corpos de prova.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
A	1,53543	1	1,53543	1,78	0,1900
B	4,94460	1	4,94460	5,74	0,0217
C	0,32340	1	0,32340	0,38	0,5429
AA	0,03526	1	0,03526	0,04	0,8408
AB	4,48900	1	4,48900	5,21	0,0282
AC	0,90451	1	0,90451	1,05	0,3122
BB	0,04441	1	0,04441	0,05	0,8217
BC	0,54912	1	0,54912	0,64	0,4298
Bloco	0,00582	1	0,00582	0,01	0,9349
Erro total	32,7586	38	0,86207		
Erro total corrigido	51,2299	47			

Com base nas Figuras dos gráficos e na análise estatística executada presume-se que o fator significativo seja a aplicação do fluido de corte (dióxido de carbono), como significativo em segunda ordem.

Nota-se pela Figura 157 que a rugosidade Ra tende a ser maior quando o nível de vazão é nulo (nível “4”) e quando a velocidade de corte está ao nível “2” (a intermediária especificada para essa experimentação). O fator direção parece apontar que os menores valores de rugosidade são obtidos quando a direção estava ao nível “1” (mesmo sentido da direção da ferramenta de corte), conforme Figura 203

Entretanto, o modelo como apresentado possui baixo ajuste, cujo valor encontrado para R^2 para o experimento foi de 32,05%, e o mesmo valor corrigido foi de 22,96%.

4.3.3.2. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ry.

Os resultados encontrados para o parâmetro Ry estão dispostos na Tabela 42 no ANEXO.

Com base nesses resultados foi feita a análise estatística de modo a verificar a influência dos fatores envolvidos na experimentação.

Da mesma forma que descrito para a tomada de medidas para avaliação da rugosidade Ra, para o parâmetro Ry foram selecionados os conjuntos de medidas que

retornassem ao coeficiente de variação de até 25%. Para efeitos de avaliação foi analisado o valor médio obtido entre as quatro medições.

A Figura 159 mostra a influência dos fatores sobre o parâmetro de rugosidade R_y . Conforme observado, parece haver influência do fluido de corte no estado superficial, mensurado pelo parâmetro R_y .

A Figura 160 mostra os principais efeitos dos fatores e com relação ao parâmetro de rugosidade R_y . Nota-se que para esse parâmetro, a direção de aplicação do fluido de corte não mostrou qualquer influência.

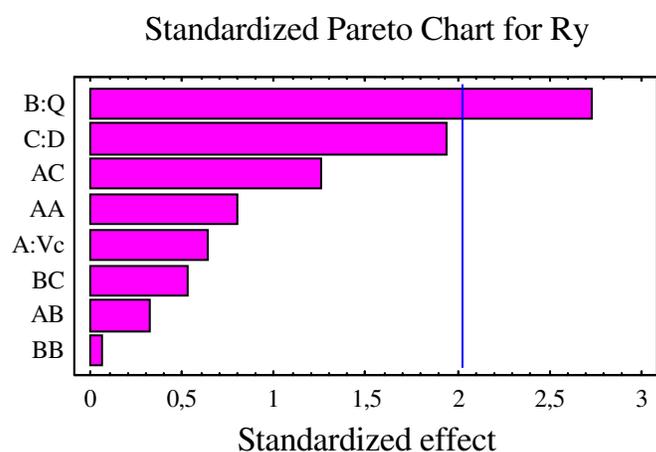


Figura 159 – Gráfico de Pareto - Influência dos fatores sobre a rugosidade R_y dos corpos de prova.

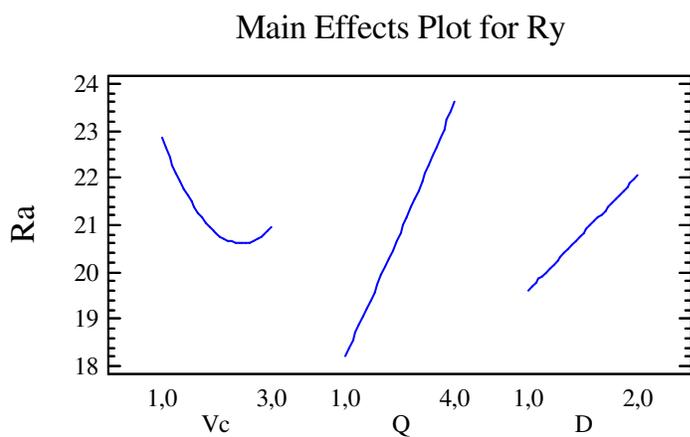


Figura 160 – Influência dos fatores sobre a rugosidade R_y dos corpos de prova.

Na seqüência, a Figura 161 mostra o gráfico de contorno cuja evidencia é dada para a direção “1” (mesmo sentido da ferramenta de corte). Observa-se que os melhores resultados são encontrados com a vazão aos níveis “2” e “3” combinados com a velocidade de corte aos níveis “1” e “2”. Nota-se que para o nível “4” (sem vazão), há os resultados menos satisfatórios.

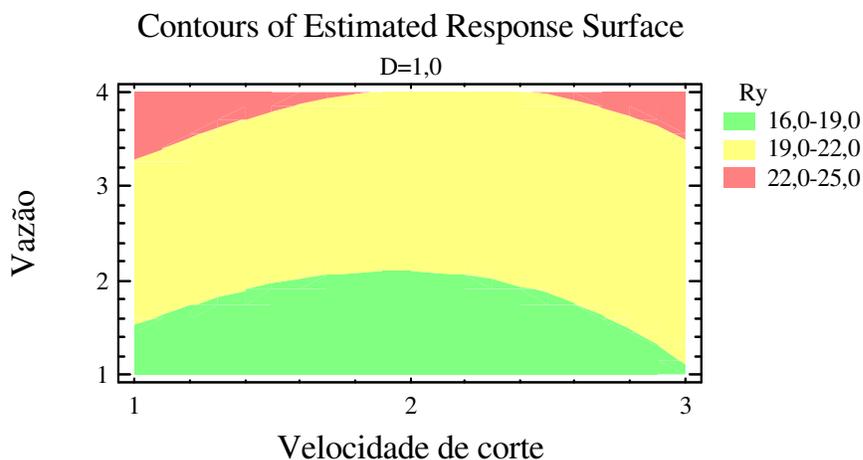


Figura 161- Influência dos fatores sobre a rugosidade R_y dos corpos de prova.

A Figura 162 mostra o gráfico de contorno evidenciando a direção “2”. Pode ser observado o mesmo comportamento descrito para a Figura 207.

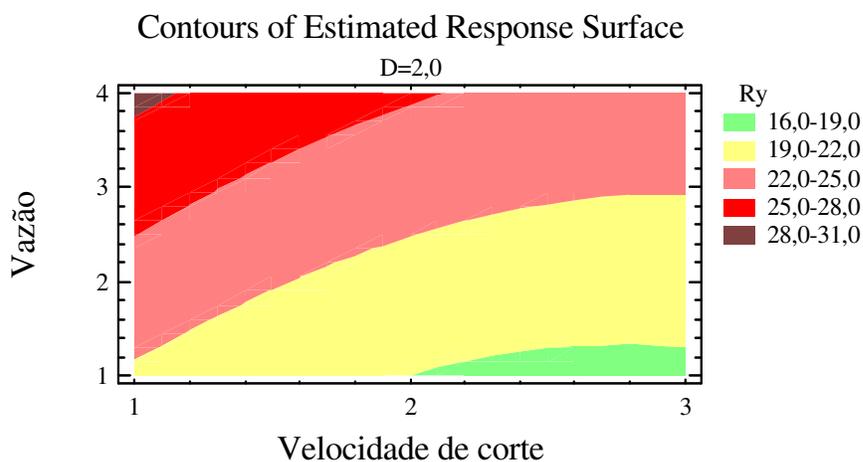


Figura 162 - Influência dos fatores sobre a rugosidade R_y dos corpos de prova.

A Tabela 43 expõe o resumo estatístico relacionado com o parâmetro de rugosidade Ra encontrado na superfície dos corpos de prova usinados. Na Tabela o fator “A” designa velocidade de corte, o fator “B” designa vazão e o fator “C” direção.

Tabela 43 - Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra apresentada pelos corpos de prova.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
A	7,75803	1	7,75803	0,41	0,5280
B	142,614	1	142,614	7,46	0,0095
C	72,0055	1	72,0055	3,77	0,0598
AA	12,2623	1	12,2623	0,64	0,4282
AB	2,01826	1	2,01826	0,11	0,7470
AC	30,2448	1	30,2448	1,58	0,2162
BB	0,06825	1	0,06825	0,00	0,9527
BC	5,42703	1	5,42703	0,28	0,5973
Bloco	10,4027	1	10,4027	0,54	0,4653
Erro total	726,563	38	19,1201		
Erro total corrigido	1117,57	47			

Assim, com base nas Figuras dos gráficos e na análise estatística executada presume-se que o fator significativo foi a aplicação do fluido de corte (dióxido de carbono). Pode-se afirmar que a direção não influenciou nos resultados e que a vazão que retornou em melhores resultados (menor valor de rugosidade) foi ao nível “1” e “2”.

Para o modelo apresentado o ajuste encontrado para R^2 foi 34,98%, e o mesmo valor corrigido foi de 21,65%, indicando que o mesmo não está suficientemente ajustado.

As mesmas considerações finais definidas para os itens 4.1.3.1 e 4.1.3.2 são aplicadas a essa avaliação. A obtenção de resultados de medição cujos coeficientes de variação sejam menores que 25% é extremamente difícil, uma vez que a própria anatomia do material impede obter tais resultados satisfatoriamente. No sentido de minimizar ao máximo tal circunstância, os *cut-offs* (espaço de amostragem por onde o sensor do rugosímetro efetua a varredura) foram estabelecidos em 0,8mm. Percebeu-se que com *cut-offs* maiores os resultados tendiam a serem menos coesos, aumentando assim o coeficiente de variação entre as tomadas das medidas.

4.3.3.3. Avaliação dos defeitos macroscópicos sobre a superfície usinada.

São apresentadas na seqüência as fotos dos corpos de prova usinados que apresentaram evidencias de combustão na superfície usinada

4.3.3.3.1. Corpo de prova 34, condição 141.



Figura 163 - Corpo de prova 16 condição 141

4.3.3.3.2. Corpo de prova 43 condição 241.



Figura 164 - Corpo de prova 22 condição 241

4.3.3.3. Corpo de prova 36 condição 341.



Figura 165- Corpo de prova 14 condição 341.

Conforme pode ser observado, para as condições de usinagem sem a adoção do dióxido de carbono como fluido de corte, ocorreu combustão da superfície por onde a ferramenta de corte realizou o corte, percebe-se acentuado dano na superfície cortada dos corpos de prova. Percebe-se, entretanto que essa combustão é muito menor que aquela ocorrida para os corpos de prova fabricados com eucalipto.

4.3.4. Avaliação da vibração no conjunto corpo de prova e máquina operatriz.

Conforme procedimento descrito no item 3.1.5.2, (Figura 34 a 36) foi medida a vibração do conjunto corpo de prova e máquina operatriz.

Percebeu-se que não ocorreu influência significativa na vibração medida durante a execução dos ensaios com a adição do fluido de corte com aqueles que não adotaram esse mecanismo de refrigeração.

De modo a propor essa análise, foram tomados os valores médios de cada conjunto de dados relacionados com cada corpo de prova, assim para a vazão $Q=1$, por exemplo, foram destinados para análise os oito dados relativos aos valores médios de cada ensaio realizado com esse nível de vazão. Cada valor teve origem nos 180 dados obtidos durante a realização de cada ensaio.

A Figura 167 mostra o gráfico de comparação das médias para os quatro níveis de vazão propostos aos experimentos, onde “Q1”, “Q2” e “Q3” retratam o uso do fluido de corte e “Q4” representa sua ausência.

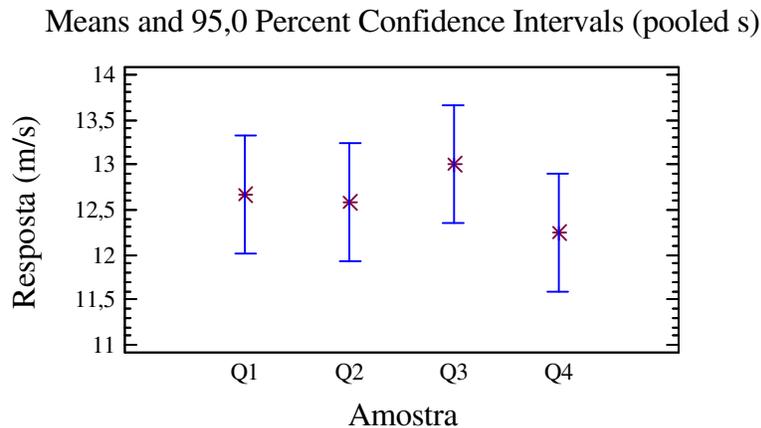


Figura 167 – Gráfico das médias para a análise de vibração resultante do corte dos corpos de prova referente à operação de serramento circular com serra circular.

A Tabela 45 resume os resultados estatísticos obtidos.

Tabela 45. Influência dos fatores sobre a vibração decorrente do processo de usinagem.

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
Entre os grupos	3,41667	3	1,1388	0,90	0,4501
Dentro dos grupos	55,8333	44	1,1689		
Erro total corrigido	59,25	47			

4.3.5. Avaliação da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem.

O procedimento para a medição da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem foi realizado de acordo com o item 3.1.5.3, conforme Figura 37.

A análise dos dados obtidos foi feita de acordo com o mesmo procedimento do item 4.1.4. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 168 e Tabela 46.

Means and 95,0 Percent Confidence Intervals (pooled s)

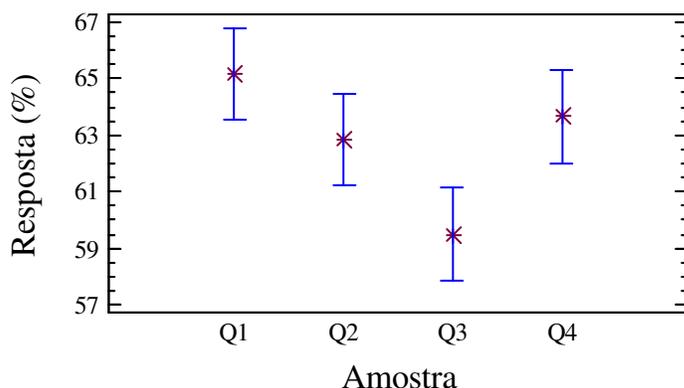


Figura 168 – Gráfico das médias para a análise da umidade relativa próxima a região onde ocorreu o corte referente à operação de serramento circular com serra circular.

Tabela 46 Influência dos fatores sobre a umidade relativa do ambiente próxima à região em processo de usinagem.

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
Entre os grupos	206,917	3	68,972	8,70	0,0001
Dentro dos grupos	349,0	44	7,9318		
Erro total corrigido	555,917	47			

Percebe-se pela análise que há influência significativa do fator vazão do dióxido de carbono. Pela análise das médias de cada ensaio é possível verificar que ao nível de 45g/min de vazão de dióxido de carbono (nível “3”) ocorre queda da umidade relativa do ar ao redor do processo de usinagem, uma explicação para esse fenômeno vem no sentido de que a temperaturas muito abaixo de 0°C, toda a umidade presente próxima da região onde ocorre a usinagem do material condensa-se e posteriormente congela-se. O mesmo, em menor escala, acontece aos níveis 1 e 2 de vazão de fluido de corte. A temperatura medida entre o difusor e a superfície material em processo de usinagem situou-se entre -15°C a -30°C.

A menor umidade relativa próxima à região em processo de usinagem é fator favorável ao processo em si, uma vez que a ausência de umidade implica em corte realizado a seco sem provável absorção desta pela madeira em processamento.

4.3.6. Avaliação temperatura externa próxima à região em processo de usinagem.

O monitoramento da temperatura foi feito de acordo com a Figura 38, descrita no item 3.1.5.4. Verificou-se que a temperatura próxima à região em processo de usinagem manteve-se constantemente abaixo de 0°C em todos os níveis de aplicação do dióxido de carbono como fluido de corte.

4.4. Pinus Elliottii – Operação de fresamento tangencial.

Os resultados apresentados referem-se aos experimentos realizados com a máquina operatriz tupia e com a utilização de fresas. Para efeitos deste relatório, Todos os corpos de prova foram ensaiados seguindo-se o planejamento experimental mostrado no item 3.2.4.

A Tabela 47 do ANEXO apresenta os dados de caracterização dos corpos de prova fabricados com pinus elliottii.

4.4.1. Caracterização dos corpos de prova.

Caracterização dos corpos de prova fabricados com Pinus elliottii.

A Figura 167 mostra histograma da densidade aparente dos corpos de prova fabricados em pinus para a realização dos ensaios.

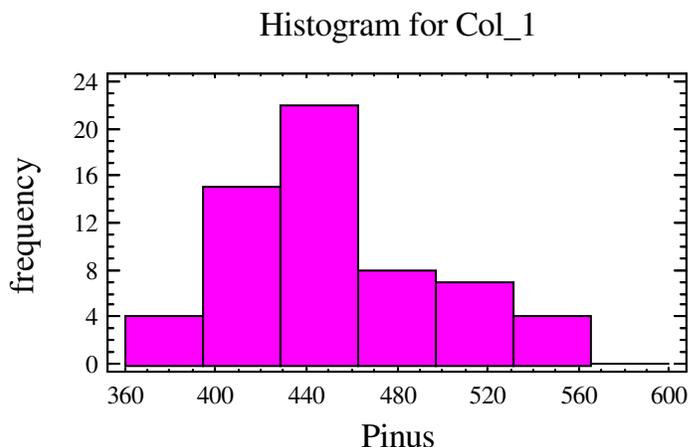


Figura 167 - Histograma da densidade aparente dos corpos de prova de pinus

A Tabela 48 contempla o sumário estatístico referente aos corpos de prova fabricados em pinus relacionado com a densidade aparente dos corpos de prova.

TABELA 48. Sumário estatístico para os corpos de prova de pinus - densidade aparente dos corpos de prova.

Estatístico	Valor
Contagem	60
Variância	2045,51
Mínimo	378,23
Amplitude	187,00
Curtose padrão	0,07
Média	450,69
Desvio padrão	45,22
Máximo	565,23
Alisamento padrão	2,25
Coefficiente de variação	10,0%

Dentre os materiais usinados, os corpos de prova fabricados em eucalipto apresentaram maior valor para a densidade aparente, cujo valor médio foi de 450,694kg/m³, o coeficiente de variação dos corpos de prova fabricados com essa madeira foi 10,0%.

4.4.2. Resultados pertinentes aos materiais usinados - monitoramento da temperatura.

A Tabela 49 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada. Os valores anotados em azul indicam a condição que apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de 5,8%.

TABELA 49 – Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	111	112	121	122	131	132	141	142
1	22,30	21,60	22,40	22,80	20,01	18,05	24,50	24,05
2	22,10	21,55	22,35	21,65	20,05	19,05	24,80	24,83
3	22,13	19,60	21,20	21,60	20,05	19,20	25,70	24,01
4	22,35	20,00	19,05	20,85	18,85	20,05	25,80	25,50
5	22,31	21,02	20,10	20,08	20,08	20,80	26,80	26,70
6	22,30	21,01	20,05	20,05	20,01	19,95	26,03	26,83
Coefficiente de variação	0,5%	4,0%	6,5%	5,0%	2,5%	4,9%	3,3%	8,2%

A Tabela 50 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada. Os valores anotados em azul indicam a condição que apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de aproximadamente 2,2%.

TABELA 50 – Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	211	212	221	222	231	232	241	242
1	23,40	24,12	22,61	24,20	22,05	21,90	24,40	24,50
2	22,90	23,40	23,00	22,80	22,00	22,05	24,60	24,55
3	22,85	23,59	22,40	22,28	21,80	21,40	24,00	24,05
4	22,90	23,05	22,60	22,80	21,75	21,40	24,60	24,00
5	22,82	23,05	22,21	22,65	21,50	21,25	24,10	24,20
6	22,95	23,03	22,24	22,18	21,50	21,30	23,60	23,65
Coefficiente de variação	0,9%	1,8%	1,3%	3,2%	1,1%	1,6%	1,6%	1,4%

A Tabela 51 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada. Os valores anotados em azul indicam a condição que apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de

usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de aproximadamente 3,7%.

TABELA 51 – Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	311	312	321	322	331	332	341	342
1	22,00	22,80	22,85	23,00	20,40	20,20	25,41	25,40
2	20,00	22,40	21,40	21,45	20,60	20,40	25,62	25,60
3	22,00	21,48	21,40	21,43	20,00	20,50	25,25	25,20
4	23,95	22,95	22,05	22,08	20,60	21,00	25,00	24,80
5	22,85	22,05	20,85	22,06	20,40	20,50	24,40	24,61
6	23,98	21,58	20,80	22,05	20,95	20,98	25,20	25,00
Coeficiente de variação	6,6%	2,8%	3,6%	2,6%	1,5%	1,6%	1,8%	1,5%

Os resultados apresentados pelas análises dos valores obtidos pelos termopares, relacionados nas Tabelas 49, 50 e 51, levam as seguintes considerações:

- *Para as três velocidades de corte adotadas os menores valores de temperatura foram obtidos com a vazão de 45g/min de dióxido de carbono aplicado no mesmo sentido de corte da ferramenta. (131; 231; 331).*

- *Quando a vazão do fluido de corte era reduzida para outros níveis, a temperatura registrada também era aumentada.*

- *Fica evidenciado que a adoção do mecanismo de refrigeração reduz o valor de temperatura na região em processo de usinagem. Sempre a usinagem a seco retornou em maior aquecimento da região em processo de usinagem. (141; 241; 341 e 142; 242;342)*

4.4.2.1. Avaliação dos fatores e níveis relacionados com a temperatura de usinagem.

Com base no planejamento experimental citado no item 3.2.4, foram feitas as análises de significância dos fatores velocidade de corte, vazão e direção de aplicação do fluido de corte. A análise foi feita para todos os termopares, cada qual apresentada individualmente.

Termopar # 1

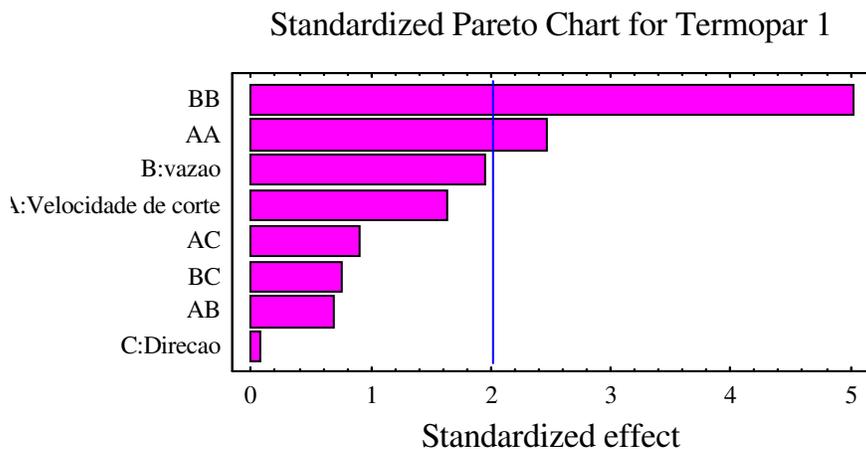


Figura 168 – Efeitos padrões relacionados com o termopar #1.

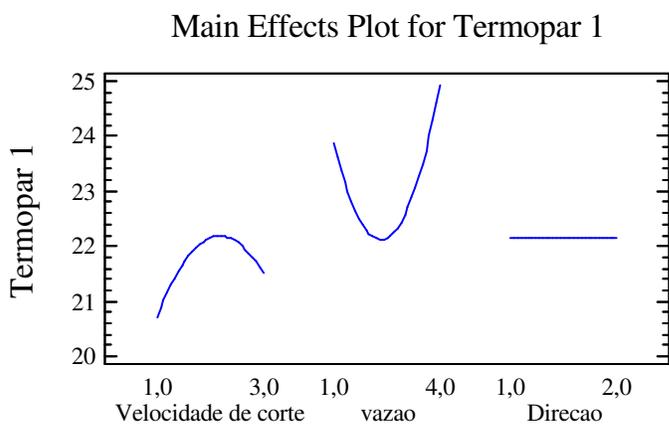


Figura 169 – Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #1.

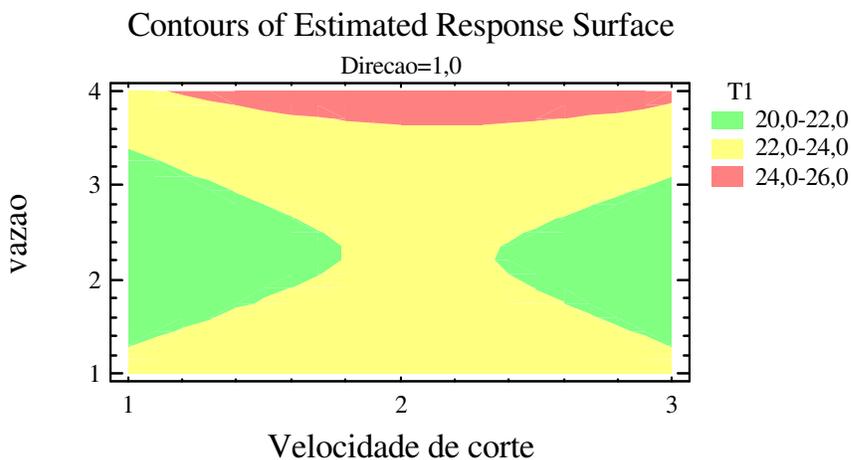


Figura 170 – Distribuição das temperaturas. Termopar #1.

Termopar # 2

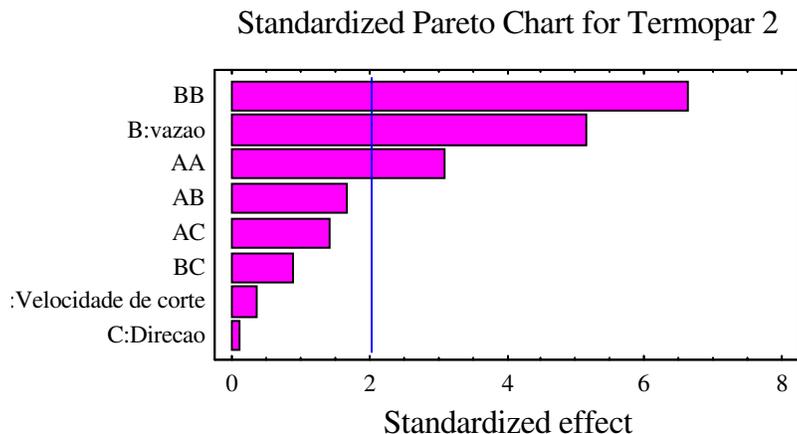


Figura 171 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #2.

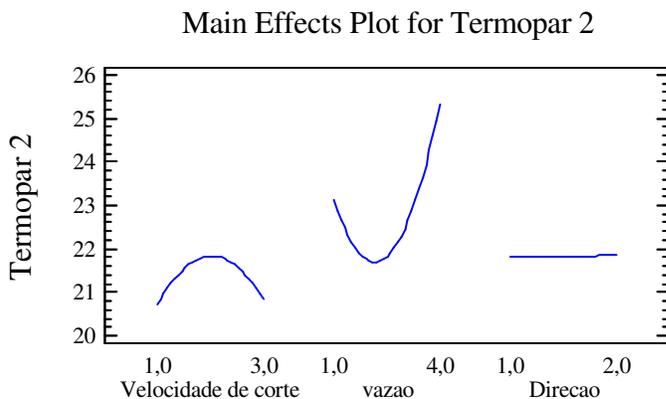


Figura 172 - Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #2.

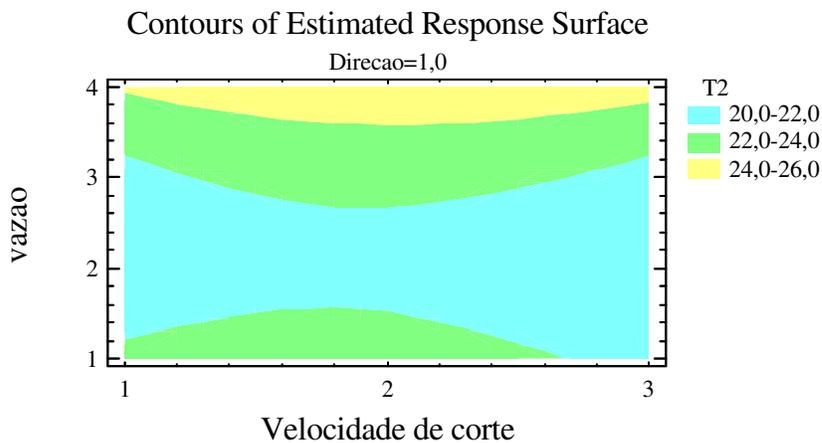


Figura 173 - Distribuição das temperaturas. Termopar #2.

Termopar # 3

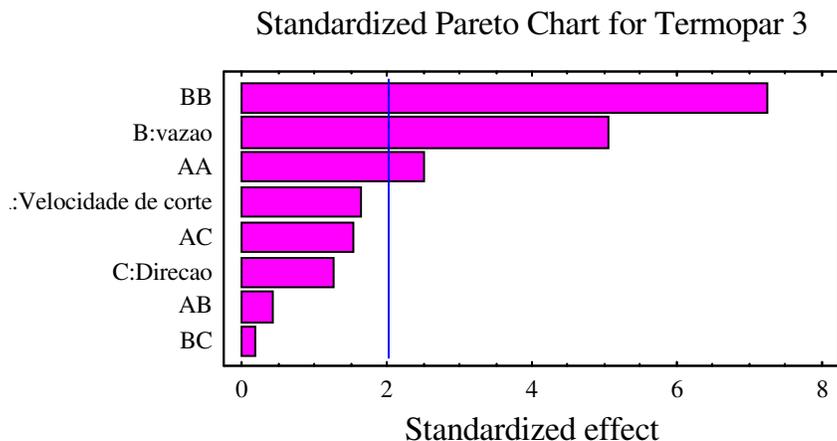


Figura 174 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #3.

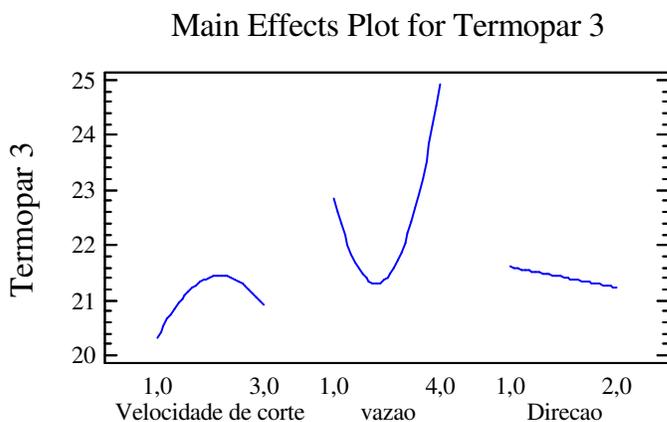


Figura 175 - Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #3.

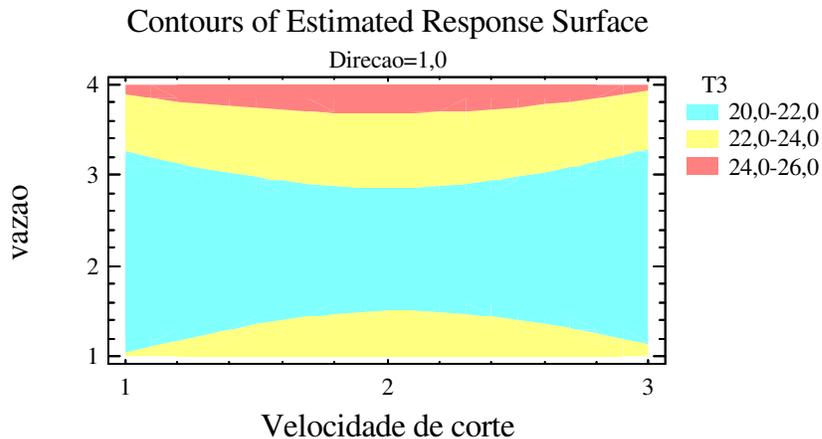


Figura 176 - Distribuição das temperaturas. Termopar #3.

Termopar # 4

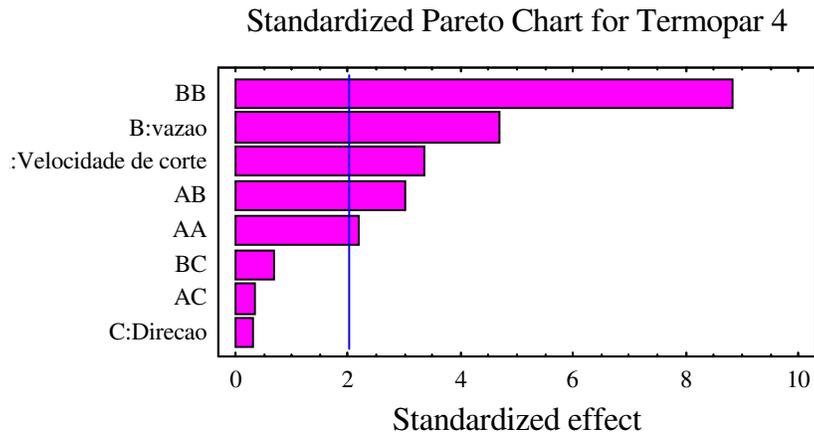


Figura 177 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #4.

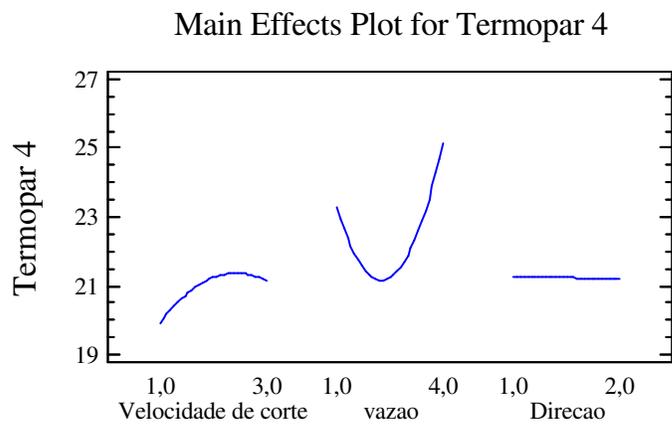


Figura 178 - Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #4.

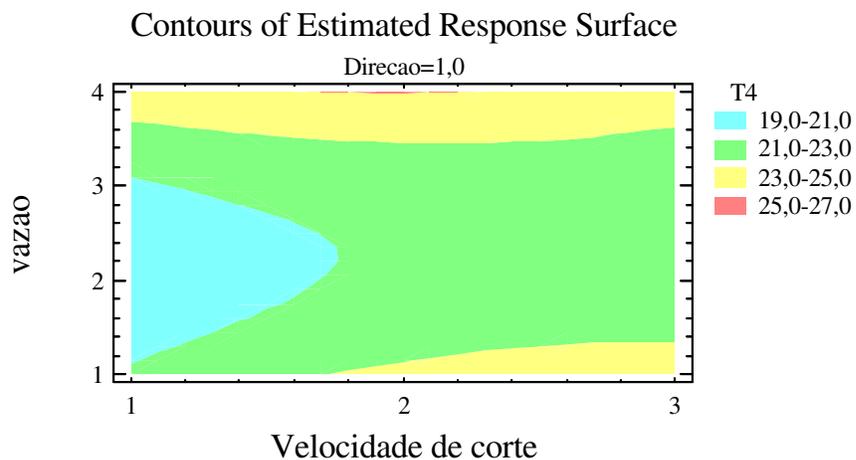


Figura 179 - Distribuição das temperaturas. Termopar #4.

Termopar # 5

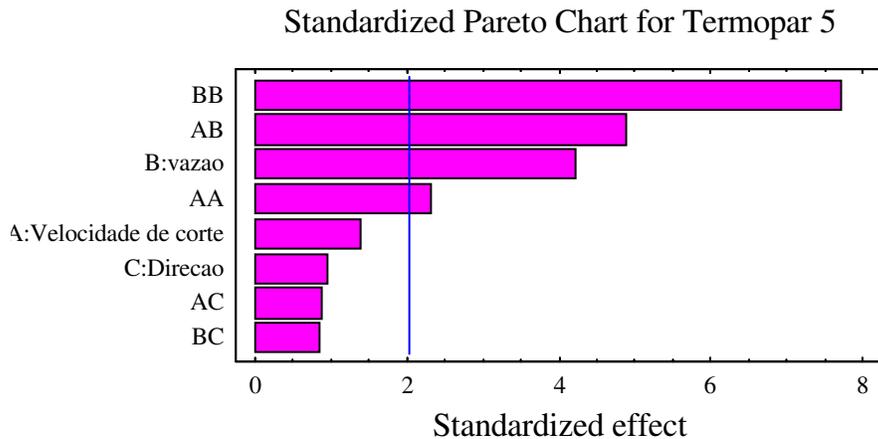


Figura 180 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #5.

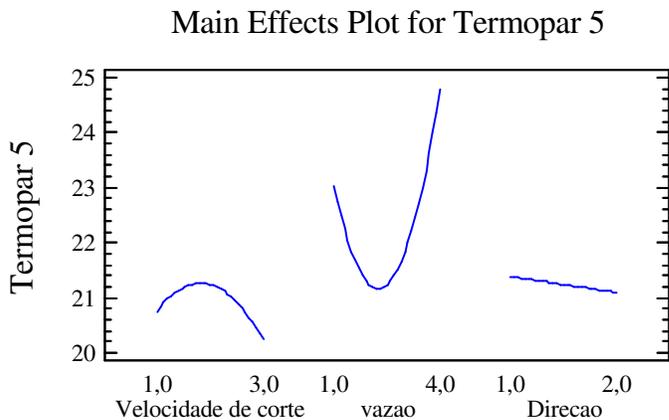


Figura 181 - Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #5.

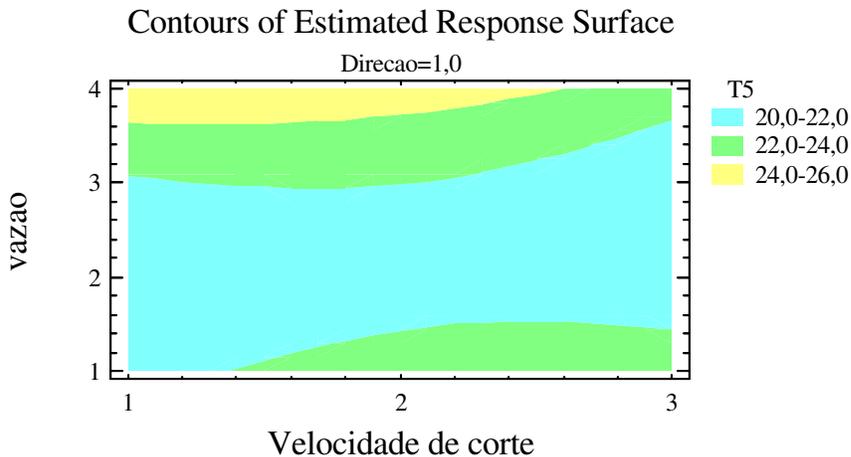


Figura 182 - Distribuição das temperaturas. Termopar #5.

Termopar # 6

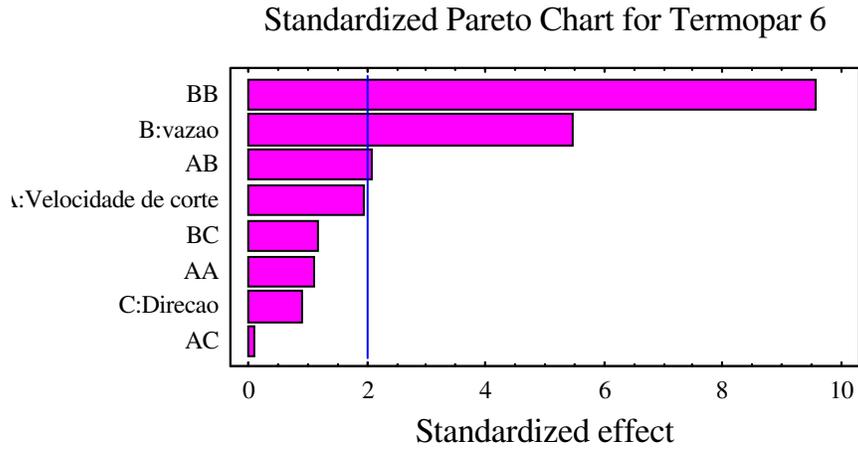


Figura 183 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #6.

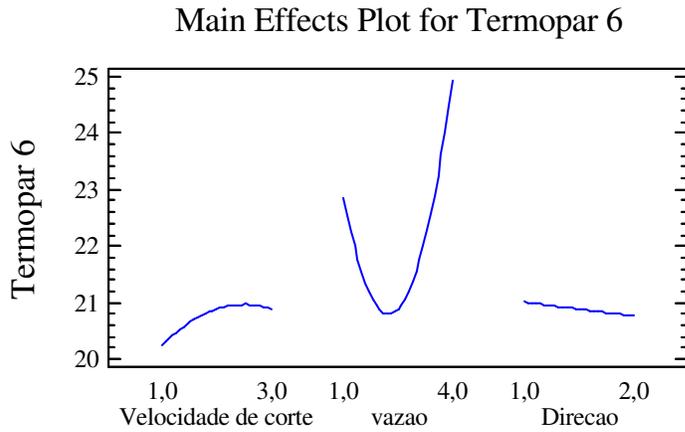


Figura 184 - Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #6.

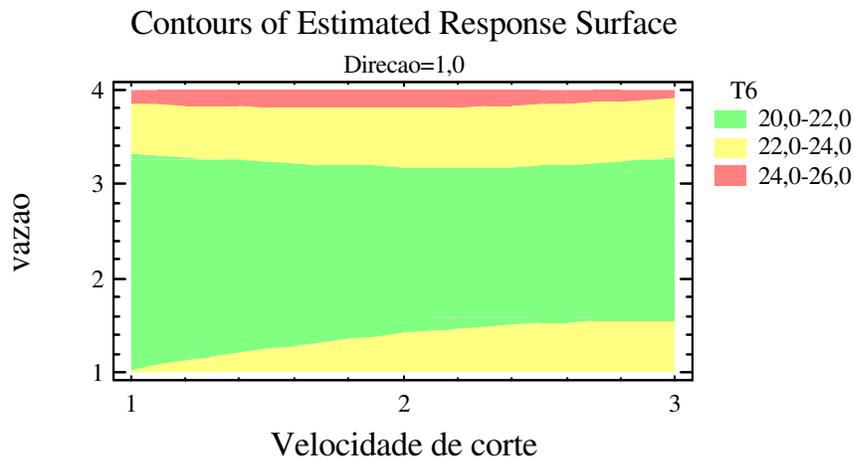


Figura 185 - Distribuição das temperaturas. Termopar #6.

As Figuras 168, 171, 174, 177, 180 e 183 mostram que a vazão é fator significativo para o efeito temperatura de usinagem. O fator direção não foi indicado como significativo por qualquer termopar.

As Figuras 169, 172, 175, 178, 181 e 184 mostram como ocorre o comportamento dos fatores velocidade de corte, vazão e direção. Percebe-se nitidamente que quanto maior a vazão tanto menor é o efeito sobre a temperatura. Percebe-se ainda que para o nível “4” (sem vazão) do fator vazão há o maior valor para o efeito temperatura, uma vez que esse nível corresponde a nenhuma vazão de CO₂.

As Figuras 170, 173, 176, 179, 182 e 185 mostram a distribuição das temperaturas com a direção de aplicação do fluido de corte ao nível “1” (mesmo sentido de corte), em função das variáveis “vazão” *versus* “velocidade de corte”.

Para cada termopar foi efetuada a regressão relacionada com os fatores vazão e direção. Os resultados são apresentados na Tabela 52.

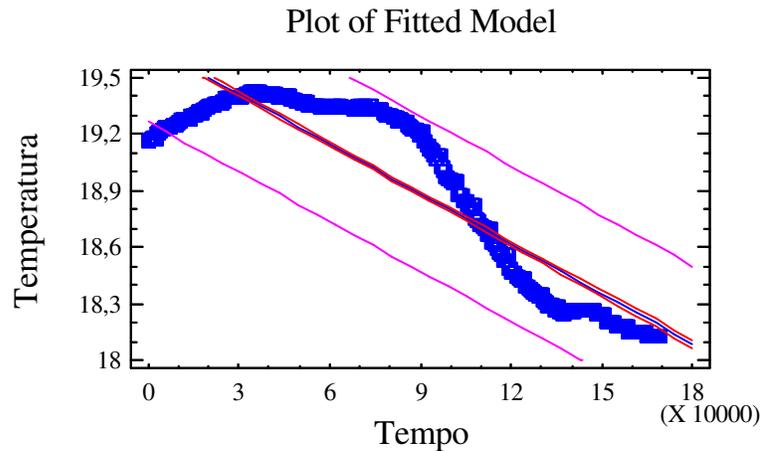
TABELA 52. Equações relacionadas com os termopares e os efeitos vazão e direção do fluido de corte. Pinus.

Termopar	Equação	R²
1	$T1 = 26,78 + (0,02 \times Vc) - (4,94 \times Q) + (0,15 \times Vc \times Q) + (1,00 \times Q^2)$	35,80%
2	$T2 = 27,24 - (0,65 \times Vc) - (5,16 \times Q) + (0,29 \times Vc \times Q) + (1,06 \times Q^2)$	55,40%
3	$T3 = 25,10 + (0,47 \times Vc) - (4,69 \times Q) - (0,06 \times Vc \times Q) + (1,10 \times Q^2)$	59,09%
4	$T4 = 23,74 + (1,85 \times Vc) - (4,99 \times Q) - (0,49 \times Vc \times Q) + (1,32 \times Q^2)$	70,94%
5	$T5 = 23,11 + (1,79 \times Vc) - (3,70 \times Q) - (0,82 \times Vc \times Q) + (1,18 \times Q^2)$	66,36%
6	$T6 = 25,08 + (1,11 \times Vc) - (5,36 \times Q) - (0,31 \times Vc \times Q) + (1,33 \times Q^2)$	73,48%
Geral	$Tn = 25,18 + (0,77 \times Vc) - (4,80 \times Q) - (0,20 \times Vc \times Q) + (1,18 \times Q^2)$	60,18%

Vc = Velocidade de corte ; Q = vazão

4.4.2.2. Curvas de aquecimento para as condições de menor aquecimento apresentado durante a realização dos ensaios.

4.4.2.2.1. Condição 131.

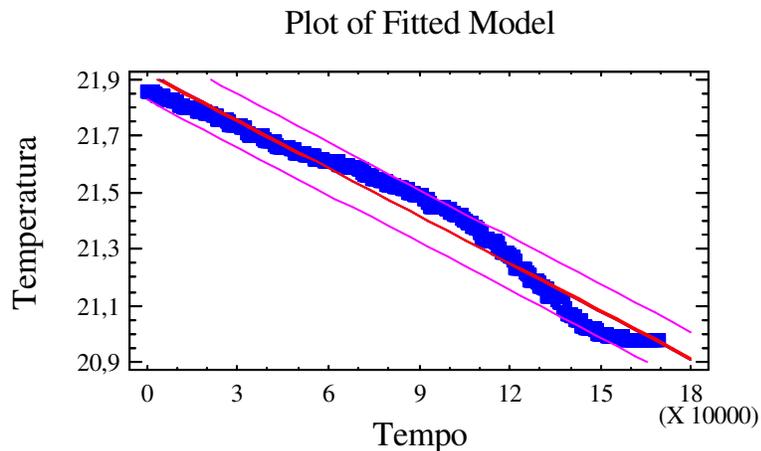


$$\text{Temperatura} = 19,6784 - 8,8 \times 10^{-7} \times t$$

Figura 186 – Regressão condição 131 – termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $-0,889$ e o R^2 é igual a $80,88\%$.

4.4.2.2.2. Condição 231.

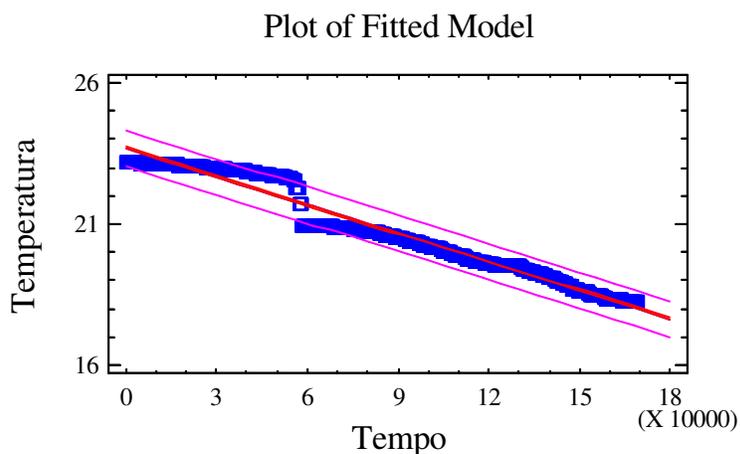


$$\text{Temperatura} = 21,925 - 5,6 \times 10^{-6} \times t$$

Figura 187 - Regressão condição 231 – termopar #4.

Observa-se que para esta condição de usinagem a temperatura permaneceu em declínio durante todo o período de realização do ensaio. O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $-0,981$ e o R^2 é igual a $97,05\%$.

4.4.2.2.3. Condição 331.

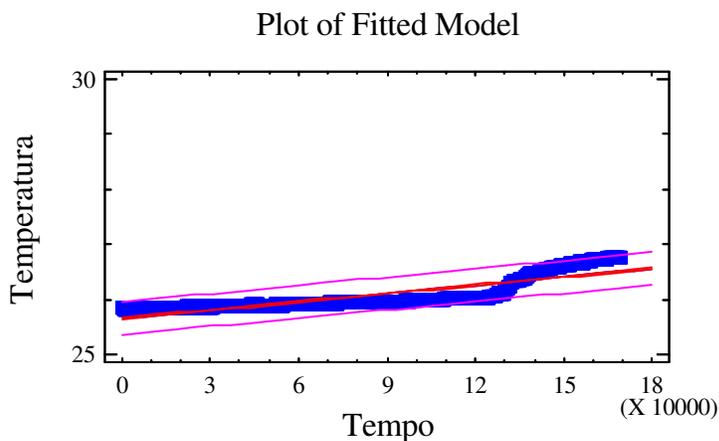


$$\text{Temperatura} = 23,679 - 3,3 \times 10^{-5} \times t$$

Figura 188 - Regressão condição 331 – termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $-0,982$ e o R^2 é igual a $96,14\%$.

4.4.2.2.4. Condição 141.

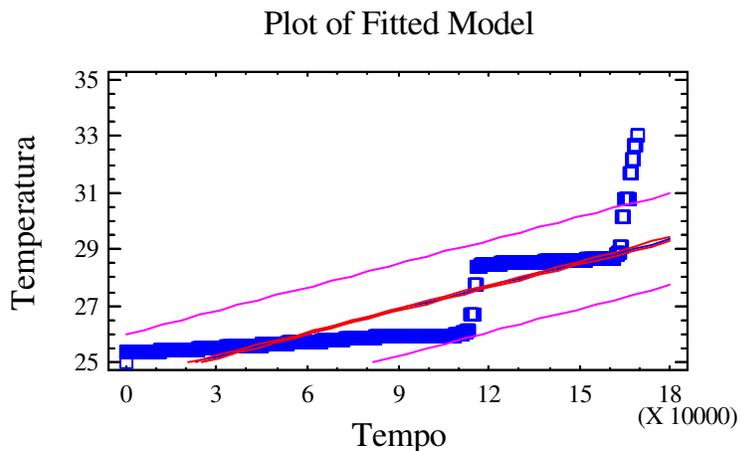


$$\text{Temperatura} = 1/(3,8 \times 10^{-2} - 7,32 \times 10^{-9} \times t)$$

Figura 189 - Regressão condição 141 – termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $-0,852$ e o R^2 é igual a $73,13\%$.

4.4.2.2.5. Condição 241.

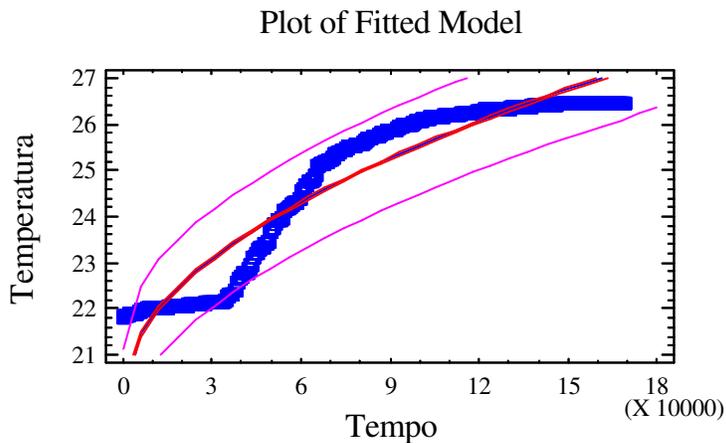


$$\text{Temperatura} = 1/(4,0 \times 10^{-2} - 3,72 \times 10^{-8} \times T)$$

Figura 190 - Regressão condição 241 – termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $-0,871$ e o R^2 é igual a $75,99\%$.

4.4.2.2.6. Condição 341.



$$\text{Temperatura} = 20,09 + 1,7 \times 10^{-2} \times \sqrt{T}$$

Figura 191 - Regressão condição 341 – termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $r = 0,9520$ e o R^2 é igual a 90,60%.

4.4.2.3. Resumo dos resultados apresentados.

A Tabela 53 indica o resumo encontrado para as condições que apresentaram melhores resultados em termos de retirada de calor e compara com a situação onde não foi aplicado o mecanismo de refrigeração.

TABELA 53. Resultados obtidos pelo T #4.

Condição	Equação	R ²	Correlação
331	$T = 23,679 - 3,3 \times 10^{-5} \times t$	96,14%	-0,982
231	$T = 21,925 - 5,6 \times 10^{-6} \times t$	97,05%	-0,981
131	$T = 19,678 - 8,8 \times 10^{-7} \times t$	80,88%	-0,889
341	$T = 20,09 + 1,7 \times 10^{-2} \times \sqrt{T}$	90,60%	0,952
241	$T = 1/(4,0 \times 10^{-2} - 3,72 \times 10^{-8} \times t)$	75,99%	-0,871
141	$T = 1/(3,8 \times 10^{-2} - 7,32 \times 10^{-9} \times t)$	73,13%	-0,856

Os resultados mostram que o mecanismo de refrigeração favorece a redução do calor gerado durante o processo de usinagem. Para todos os termopares observa-se satisfatório valor de R^2 e correlação, todos os valores foram superiores a 70%. Observa-se pela Tabela 53 que o aquecimento quando o mecanismo de refrigeração era utilizado, ocorria de modo linear com retas com baixo coeficiente angular. Para os cortes realizados a seco (nível 4 de vazão), as regressões seguiram modelos não lineares.

Se comparado com as regressões obtidas para o eucalipto (Tabela 26), as apresentadas pelo resultado da usinagem dos corpos de prova em pinus são mais representativas.

4.4.3. Avaliação do estado superficial dos corpos de prova usinados. Operação de fresamento tangencial com fresa perfilada.

A avaliação do estado superficial dos corpos de prova foi realizada conforme procedimentos adotados no item 4.1.3. A metodologia adotada para efeitos de medição seguiu o disposto no item 3.1.5.6.

4.4.3.1. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ra.

Os resultados obtidos para o parâmetro Ra são apresentados na Tabela 54 no ANEXO.

Para efeitos de avaliação foi analisado o valor médio obtido entre as quatro medições.

As Figuras 192 e 193 mostram a influência dos fatores sobre o parâmetro de rugosidade Ra. Conforme observado, parece haver influência do fluido de corte no estado superficial, mensurado pelo parâmetro Ra.

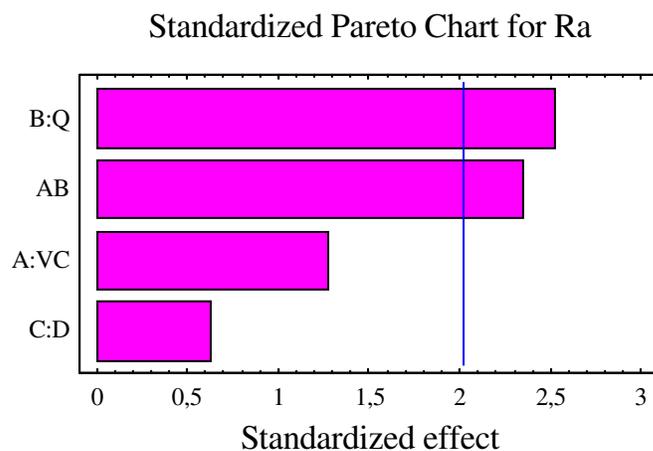


Figura 192 - Gráfico de Pareto -Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

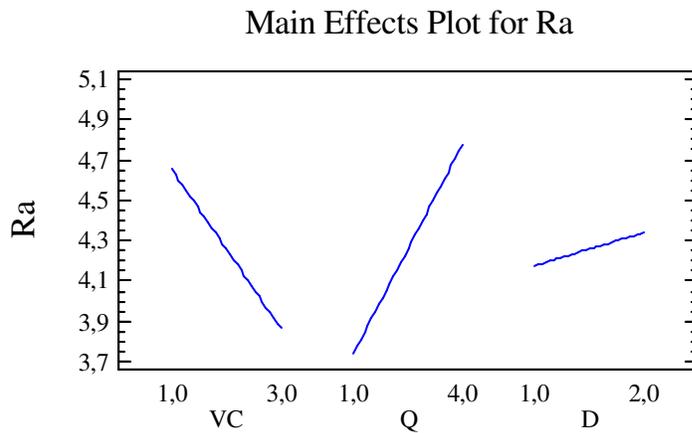


Figura 193 - Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

A Figura 194 mostra o gráfico de contorno cuja evidência é dada para a direção “1” (mesmo sentido da ferramenta de corte). Observa-se que ao nível 4 do fator vazão (ou seja, sem vazão) ocorre os maiores valores para rugosidade superficial Ra.

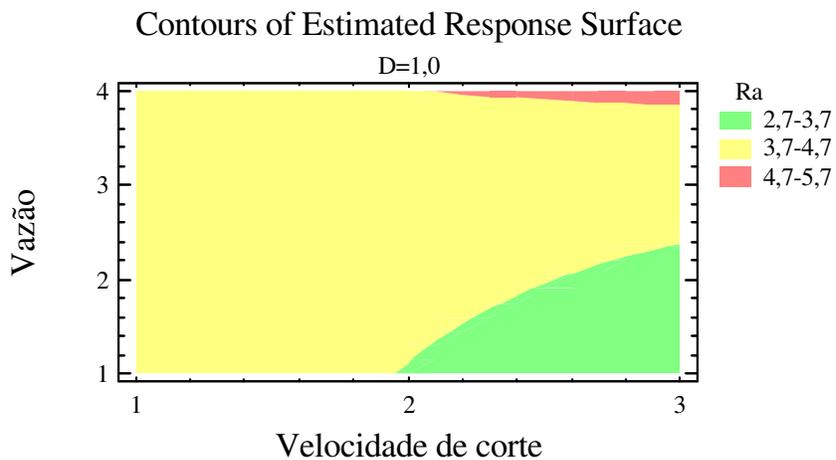


Figura 194 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação “1”.

A Figura 195 mostra o gráfico de contorno evidenciando a direção “2”. Observa-se que os melhores (menores valores) foram obtidos com o nível “2” e “3” para vazão.

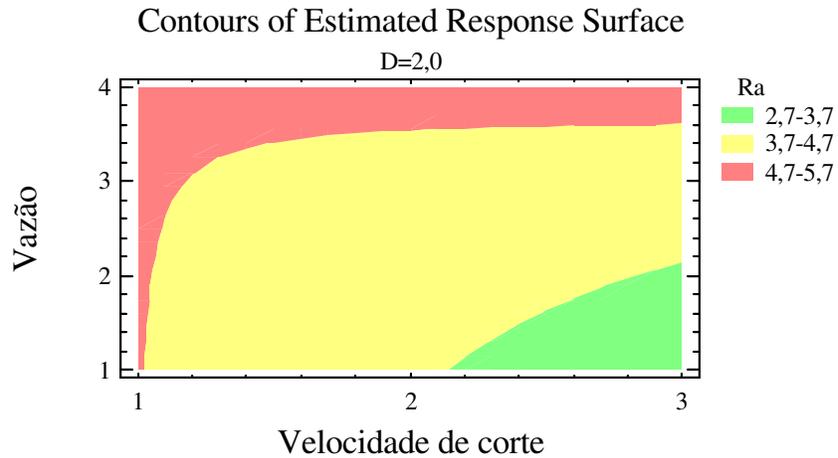


Figura 195 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação “2”.

A Tabela 55 expõe o resumo estatístico relacionado com o parâmetro de rugosidade Ra encontrado na superfície dos corpos de prova usinados. Na Tabela o fator “A” designa Velocidade de Corte, o fator “B” designa Vazão e o fator “C” direção.

Tabela 55. Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra apresentada pelos corpos de prova.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
A	1,3341	1	1,3341	1,63	0,2084
B	5,2233	1	5,2233	6,39	0,0153
C	0,3267	1	0,3267	0,40	0,5307
AB	4,4890	1	4,4890	5,49	0,0239
Bloco	0,0038	1	0,0038	0,00	0,9461
Erro total	34,3260	42	0,8173		
Erro total corrigido	50,9975	47			

Assim, com base nas Figuras dos gráficos e na análise estatística executada presume-se que o fator significativo seja a aplicação do fluido de corte (dióxido de carbono), como significativo em segunda ordem.

Nota-se pelas Figuras 194 e 195 que a rugosidade Ra tende a ser maior quando o nível de vazão é nulo (nível “4”). O fator direção parece apontar para que os menores

valores de rugosidade são obtidos quando a direção estava ao nível 1 (mesmo sentido da direção da ferramenta de corte).

Entretanto, o modelo como apresentado possui baixo ajuste, cujo valor encontrado para R^2 para o experimento foi de 32,69%, e o mesmo valor corrigido foi de 26,42%.

4.4.3.2. Avaliação do parâmetro de rugosidade R_y .

Os resultados obtidos para o parâmetro R_y são apresentados na Tabela 56 do ANEXO. Com base nesses resultados foi feita a análise estatística de modo a verificar a influência dos fatores envolvidos na experimentação.

A Figura 196 mostra a influência dos fatores sobre o parâmetro de rugosidade R_y . Para efeitos de avaliação foi analisado o valor médio obtido entre as quatro medições.

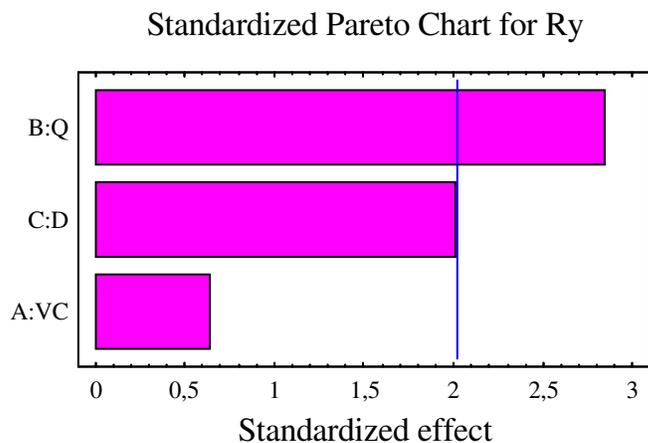


Figura 196 - Gráfico de Pareto -Influência dos fatores sobre a rugosidade R_a dos corpos de prova.

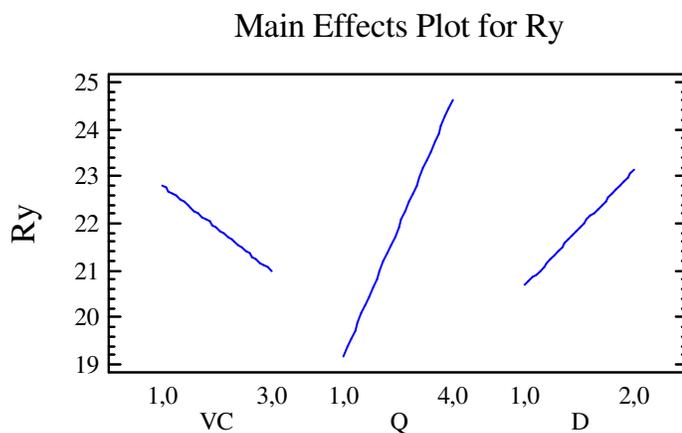


Figura 197 - Influência dos fatores sobre a rugosidade R_a dos corpos de prova.

Conforme observado, parece haver influência da aplicação do fluido de corte no estado superficial, mensurado pelo parâmetro Ry.

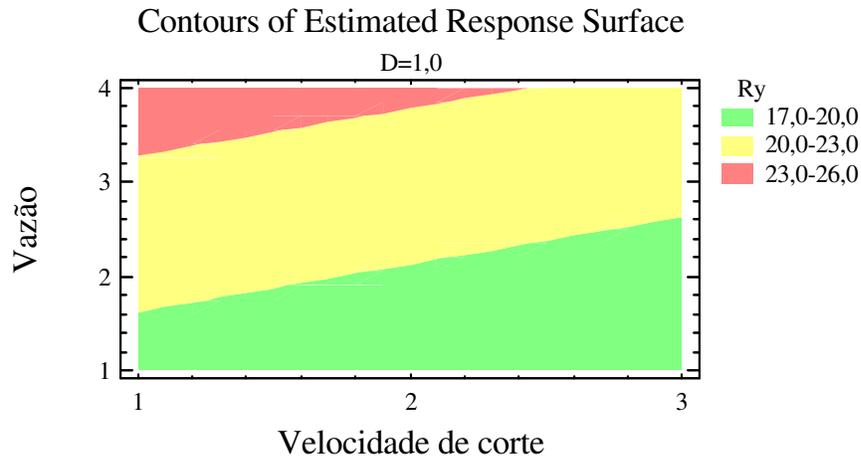


Figura 198 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação ao nível “1”.

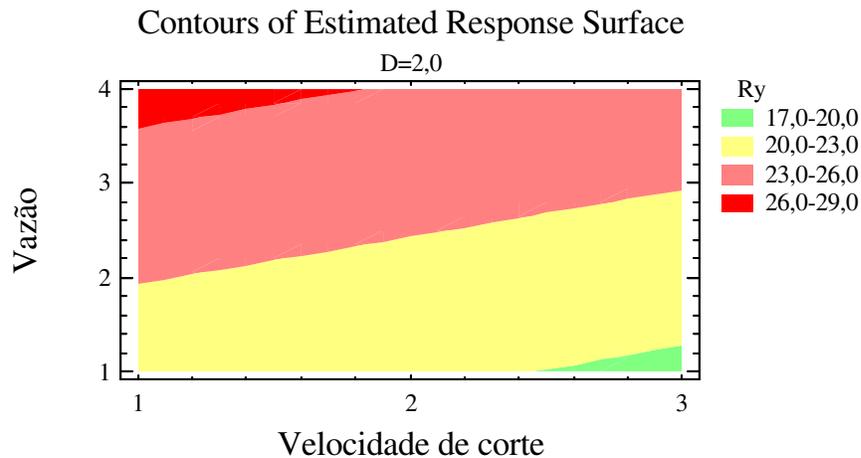


Figura 199 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação ao nível “2”.

A Tabela 57 expõe o resumo estatístico relacionado com o parâmetro de rugosidade Ry encontrado na superfície dos corpos de prova usinados. Na Tabela o fator “A” designa Velocidade de Corte”, o fator “B” designa Vazão e o fator “C” direção.

Tabela 57. Influência dos fatores sobre a rugosidade Ry apresentada pelos corpos de prova.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
A	7,1144	1	7,1144	0,39	0,5337
B	144,547	1	144,547	8,00	0,0071
C	72,1771	1	72,1771	3,99	0,0520
Bloco	10,5476	1	10,5476	0,58	0,4490
Erro total	777,007	47	18,0699		
Erro total corrigido	1116,21				

Assim, com base nas Figuras dos gráficos e na análise estatística executada presume-se que o fator significativo foi a aplicação do fluido de corte (dióxido de carbono), cujo valor de “P” retornou em 0,0071.. Nota-se pelas Figuras 260 e261 que a rugosidade Ry tende a ser maior quando o nível de vazão é nulo (nível “4”). O fator direção parece apontar que os menores valores de rugosidade são obtidos quando a direção estava ao nível 1 (mesmo sentido da direção da ferramenta de corte).

Entretanto, o modelo apresentado possui médio ajuste, cujo valor encontrado para R^2 para o experimento foi de 30,38%, e o mesmo valor corrigido foi de 25,64%.

4.4.3.3. Avaliação dos defeitos macroscópicos sobre a superfície usinada.

4.4.3.3.1. Condição 141.



Figura 200. Corpo de prova 14. Condição 141

4.4.3.3.2. Condição 241.



Figura 201. Corpo de prova 15. Condição 241

4.4.3.3.3. Condição 341.



Figura 202. Corpo de prova 12. Condição 341

4.4.4. Avaliação da vibração no conjunto corpo de prova e máquina operatriz.

Conforme procedimento descrito no item 3.1.5.2, (Figura 34 a 36) foi medida a vibração do conjunto corpo de prova e máquina operatriz.

Do mesmo modo que para outras avaliações, percebeu-se que não ocorreu influência significativa na vibração medida durante a execução dos ensaios com a adição do fluido de corte com aqueles que não adotaram esse mecanismo de refrigeração.

De modo a propor essa análise, foram tomados os valores médios de cada conjunto de dados relacionados com cada corpo de prova, assim para a vazão “ $Q=1$ ”, por exemplo, foram destinados para análise os doze dados relativos aos valores médios de cada ensaio realizado com esse nível de vazão. Cada valor teve origem nos 180 dados obtidos durante a realização de cada ensaio, do total de 48 ensaios realizados.

A Figura 203 mostra o gráfico de comparação das médias para os quatro níveis de vazão propostos aos experimentos, onde “Q1”, “Q2” e “Q3” retratam o uso do fluido de corte e “Q4” representa sua ausência.

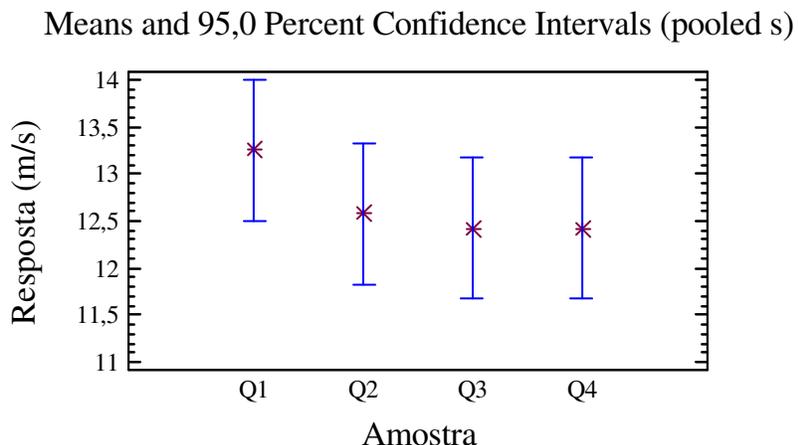


Figura 203. Gráfico das médias para a análise de vibração resultante do corte dos corpos de prova referente à operação de fresamento tangencial.

Tabela 58. Influência dos fatores sobre a vibração decorrente do processo de usinagem.

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
Entre os grupos	5,6666	3	1,8888	1,14	0,3440
Dentro dos grupos	73,000	44	1,6590		
Erro total corrigido	78,666	47			

4.4.5. Avaliação da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem.

O procedimento para a medição da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem foi realizado de acordo com o item 3.2.5.1, conforme Figura 49.

A análise dos dados obtidos foi feita de acordo com o mesmo procedimento do item 4.1.4. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 204 e Tabela 59.

Means and 95,0 Percent Confidence Intervals (pooled s)

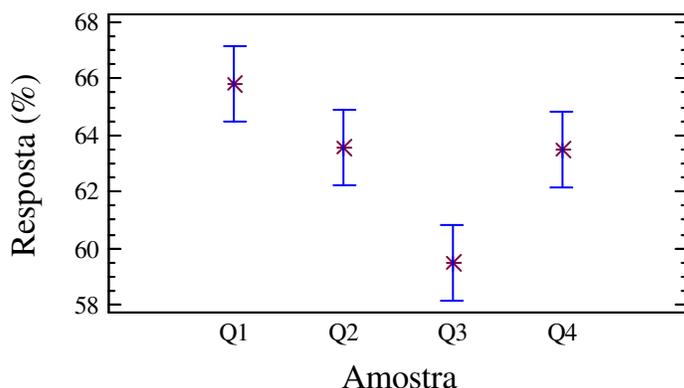


Figura 204 – Gráfico das médias para a análise da umidade relativa próxima a região onde ocorreu o corte referente à operação de fresamento tangencial.

Tabela 59. Influência dos fatores sobre a umidade relativa do ambiente próxima à região em processo de usinagem.

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
Entre os grupos	249,896	3	83,2986	15,90	0,000
Dentro dos grupos	230,583	44	5,24053		
Erro total corrigido	225,469	47			

Conforme pode ser notado, foi obtido o menor valor para a umidade relativa teve quando a vazão de dióxido de carbono foi empregada no maior nível (nível 3). Ao nível 1 a umidade foi maior que sem a aplicação do fluido

4.4.6. Avaliação temperatura externa próxima à região em processo de usinagem.

O monitoramento da temperatura foi feito de acordo com a Figura 49 descrita no item 3.2.5.1. Verificou-se que a temperatura próxima à região em processo de usinagem manteve-se constantemente abaixo de 0°C em todos os níveis de aplicação do dióxido de carbono como fluido de corte.

4.5. MDF – Operação de serramento circular.

4.5.1. Caracterização dos corpos de prova.

Os resultados apresentados referem-se aos experimentos realizados com a máquina operatriz serra esquadrejadeira com a utilização de serras circulares. Para efeitos deste relatório, todos os corpos de prova foram ensaiados seguindo-se o planejamento experimental mostrado no item 3.1.4.

A Tabela 60 do ANEXO apresenta os dados de caracterização dos corpos de prova fabricados com MDF.

A Figura 205 mostra histograma dos corpos de prova fabricados em MDF para a realização dos ensaios.

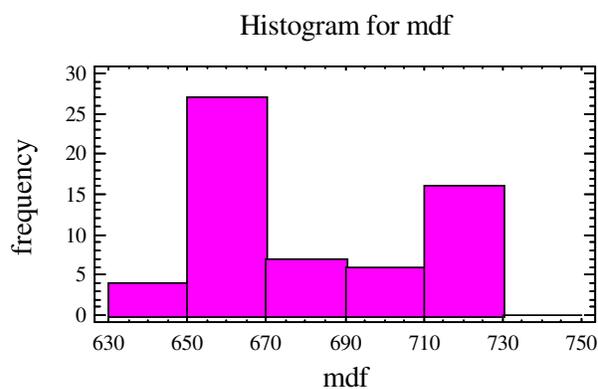


Figura 205 - Histograma da densidade aparente dos corpos de prova de pinus.

A Tabela 61 contempla o sumário estatístico referente aos corpos de prova fabricados em MDF.

TABELA 61. Sumário estatístico para os corpos de prova de MDF - densidade aparente dos corpos de prova.

Estatístico	Valor
Contagem	60
Variância	728,33
Mínimo	639,29
Máximo	726,58
Média	680,73
Desvio padrão	26,98
Amplitude	87,29
Curtose padrão	-2,34
Alisamento padrão	1,30
Coefficiente de variação	3,96%

Dentre os materiais usinados, os corpos de prova fabricados em MDF apresentaram menor coeficiente de variação, cujo valor foi de 3,96%. Menor dispersão entre os valores da densidade aparente do material em avaliação significa menor influência do próprio material sobre os resultados obtidos durante o processamento.

4.5.2. Resultados pertinentes aos materiais usinados - monitoramento da temperatura.

Foram realizados os mesmos procedimento e análises descritos no item 4.1.3.

A Tabela 63 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada. Os valores anotados em azul indicam a condição que apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de aproximadamente 6,0%.

TABELA 63 – Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	111	112	121	122	131	132	141	142
1	22,47	21,17	22,20	25,54	22,74	18,05	25,99	26,71
2	22,47	24,72	24,04	21,26	20,02	21,68	25,91	24,94
3	24,72	23,09	21,15	21,58	21,25	19,02	25,42	24,84
4	24,96	22,10	24,16	21,84	21,36	21,88	24,47	23,09
5	22,90	21,91	21,41	21,85	19,38	21,39	24,92	24,70
6	25,21	22,80	23,04	22,73	20,59	21,95	24,98	25,11
Coefficiente de variação	5%	5%	6%	7%	6%	8%	2%	5%

A Tabela 64 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada. Os valores anotados em azul indicam a condição que apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de 4,0%.

TABELA 64 - Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	211	212	221	222	231	232	241	242
1	23,65	24,45	24,19	22,75	21,97	22,45	26,35	26,24
2	23,68	24,07	22,90	21,91	19,02	22,78	24,27	24,94
3	22,67	23,36	20,68	22,35	18,17	22,69	26,68	25,32
4	22,61	23,95	23,41	22,19	21,04	22,05	25,71	22,65
5	22,73	23,31	22,31	22,10	19,46	22,05	26,22	26,41
6	23,31	23,59	22,45	22,20	19,02	21,85	22,20	23,92
Coefficiente de variação	2%	2%	5%	1%	7%	2%	7%	6%

A Tabela 65 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada. Os valores anotados em azul indicam a condição que apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em

vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de aproximadamente 5%.

TABELA 65 - Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	311	312	321	322	331	332	341	342
1	21,89	24,44	22,74	22,45	18,05	21,57	25,86	26,95
2	22,75	23,30	22,31	22,10	19,46	24,05	26,22	24,94
3	23,53	23,00	21,54	24,38	21,36	21,89	24,38	25,29
4	21,00	24,71	22,05	24,73	21,20	23,65	24,81	25,20
5	21,98	24,23	21,39	23,00	18,17	19,38	24,64	24,12
6	24,01	22,80	24,10	24,10	20,60	23,54	26,22	25,47
Coeficiente de variação	5%	3%	4%	5%	7%	8%	3%	4%

Os resultados apresentados pelas análises dos valores obtidos pelos termopares, relacionados nas Tabelas 63, 64 e 65, levam as mesmas considerações referentes aos materiais anteriormente analisados, conforme itens 4.1.2, 4.2.2, 4.3.2 e 4.4.2.

4.5.2.1. Avaliação dos fatores e níveis relacionados com a temperatura de usinagem.

Com base no planejamento experimental citado no item 3.1.4, foram feitas as análises de significância dos fatores velocidade de corte, vazão e direção de aplicação do fluido de corte. A análise foi feita para todos os termopares, cada qual apresentada individualmente.

Termopar #1.

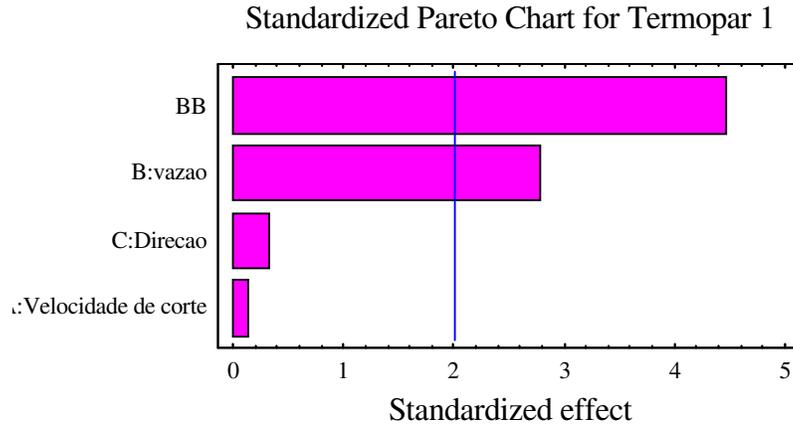


Figura 206 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #1.

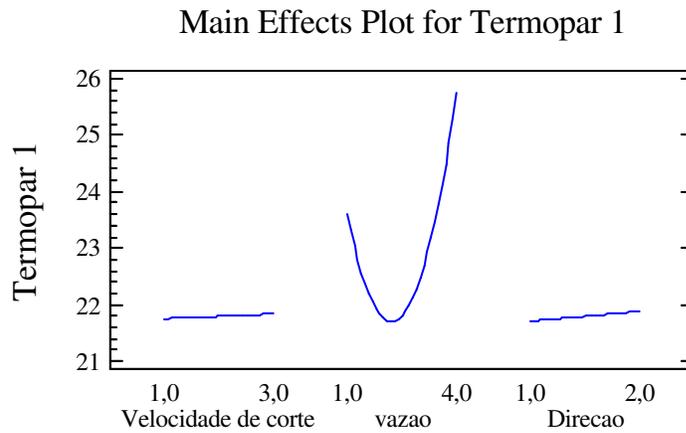


Figura 207 - Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #1.

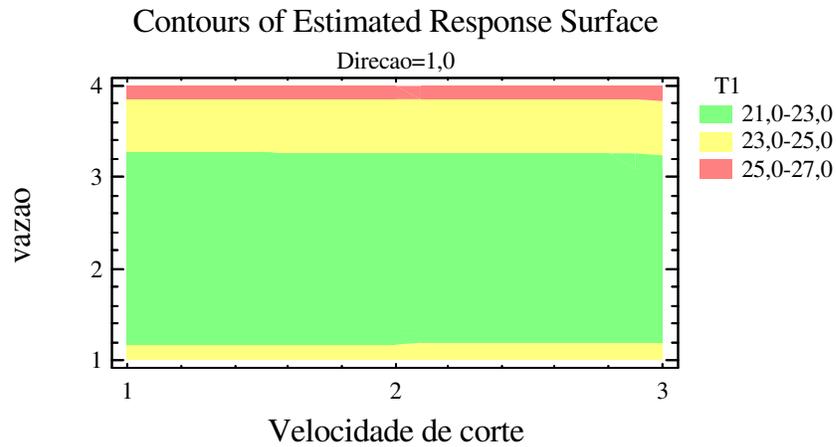


Figura 208 - Distribuição das temperaturas. Termopar #1.

Termopar #2.

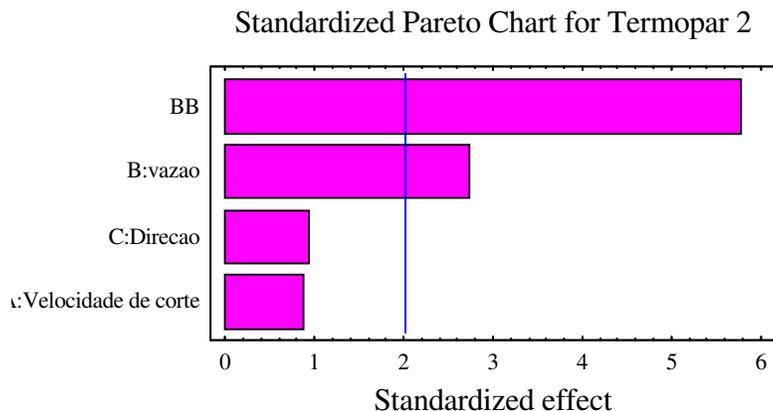


Figura 209 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #2.

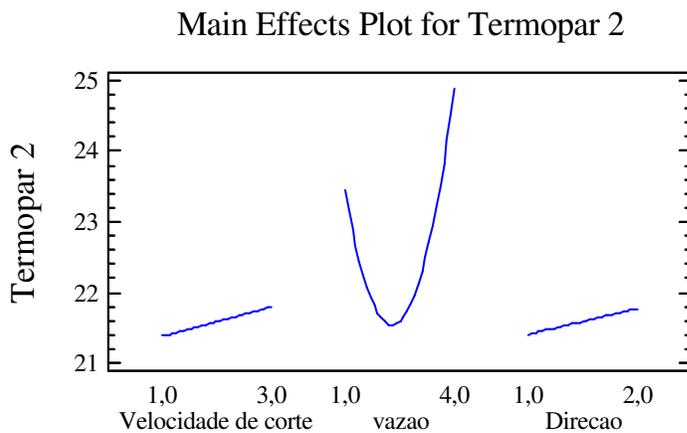


Figura 210 - Comportamento dos efeitos principais relacionados com o termopar #2.

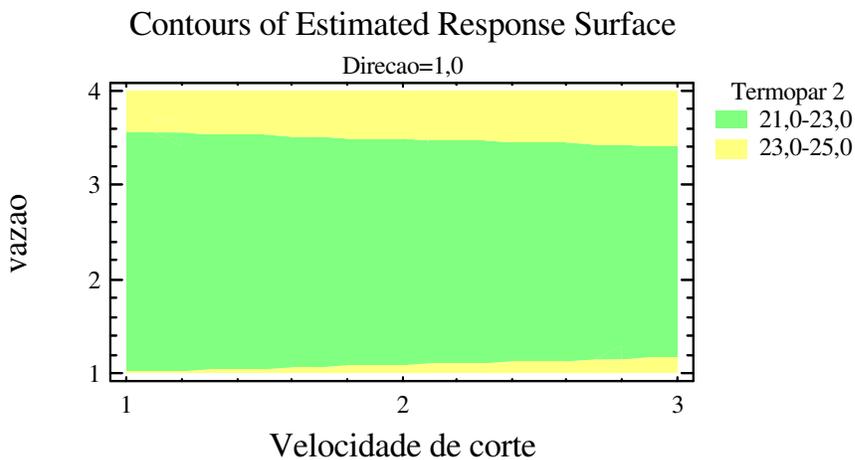


Figura 211- Distribuição das temperaturas. Termopar #2.

Termopar #3.

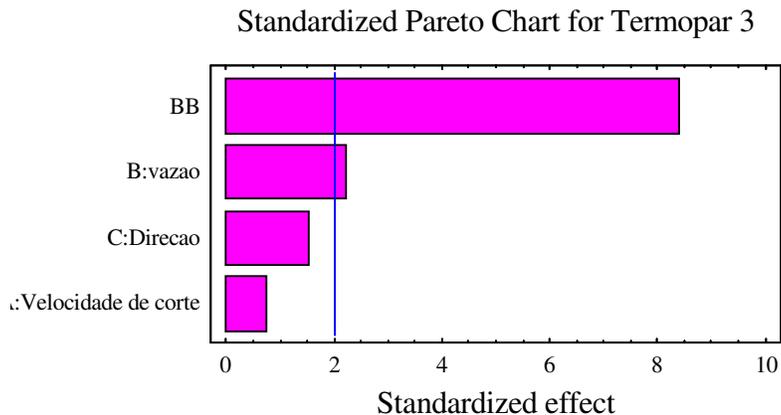


Figura 212 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #3

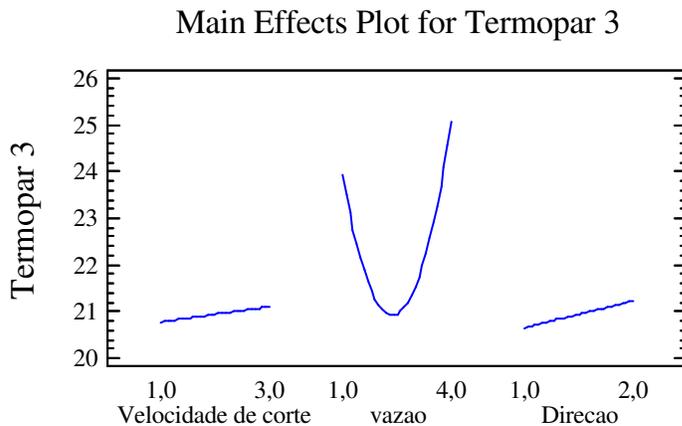


Figura 213 - Comportamento dos efeitos principais relacionados com o termopar #3.

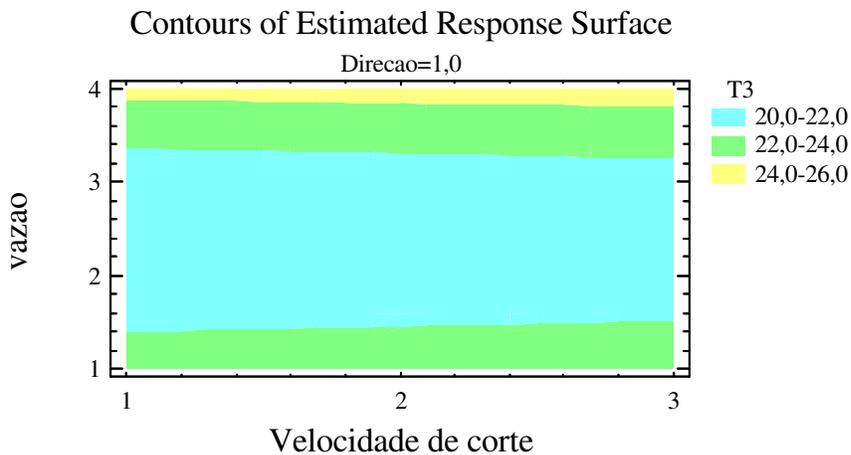


Figura 214 - Distribuição das temperaturas. Termopar #3.

Termopar #4.

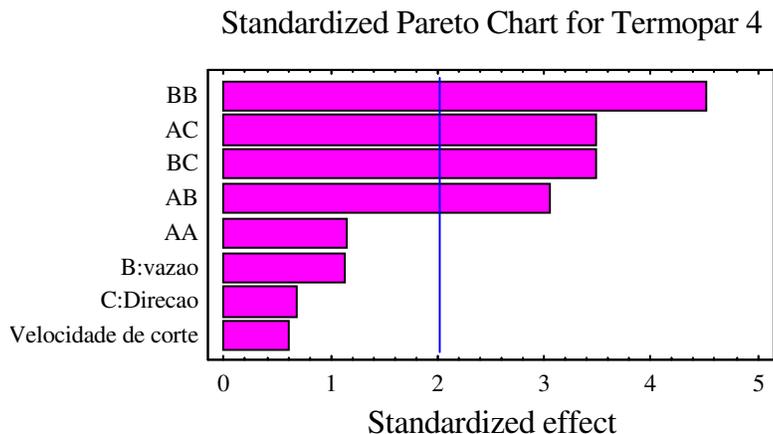


Figura 215 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #4.

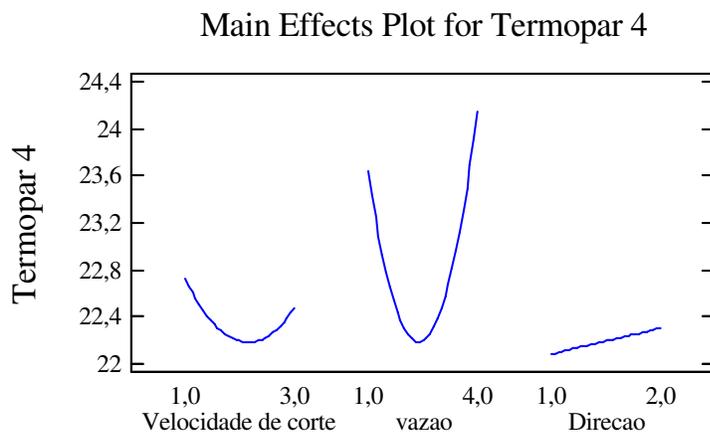


Figura 216 - Comportamento dos efeitos principais relacionados com o termopar #4.

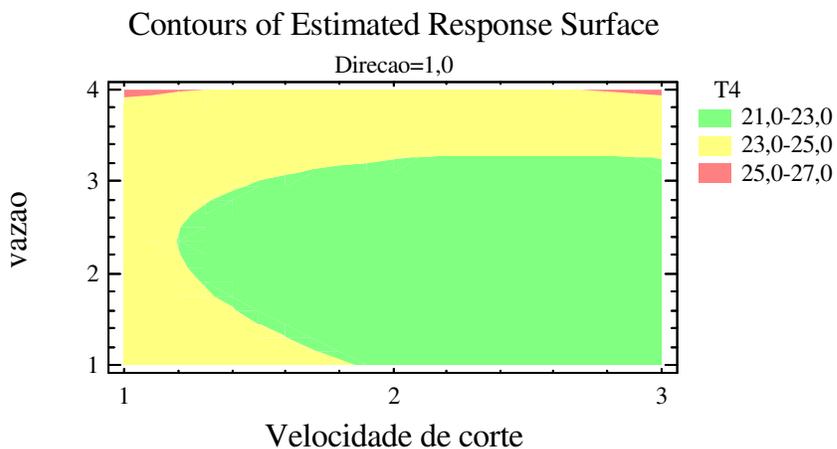


Figura 217 - Distribuição das temperaturas. Termopar #4.

Termopar #5.

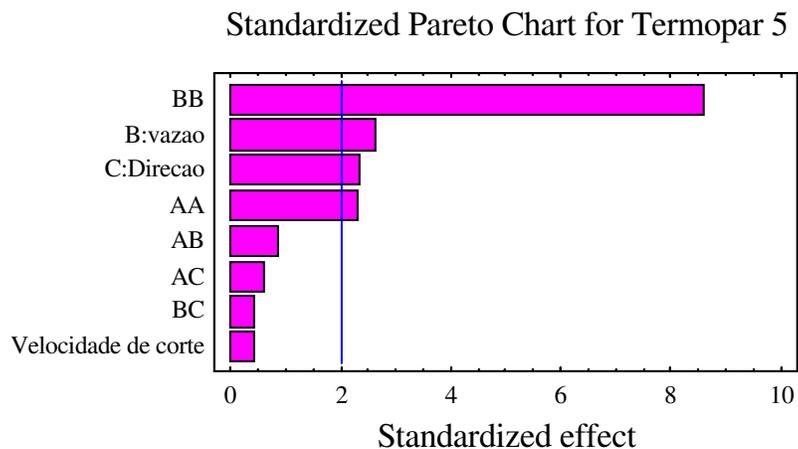


Figura 218 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #5.

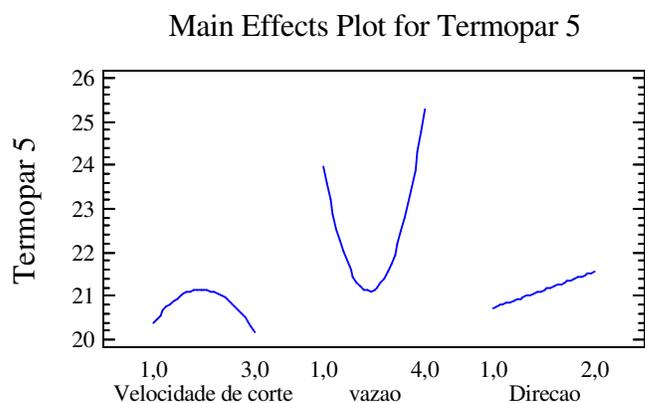


Figura 219 - Comportamento dos efeitos principais relacionados com o termopar #5.

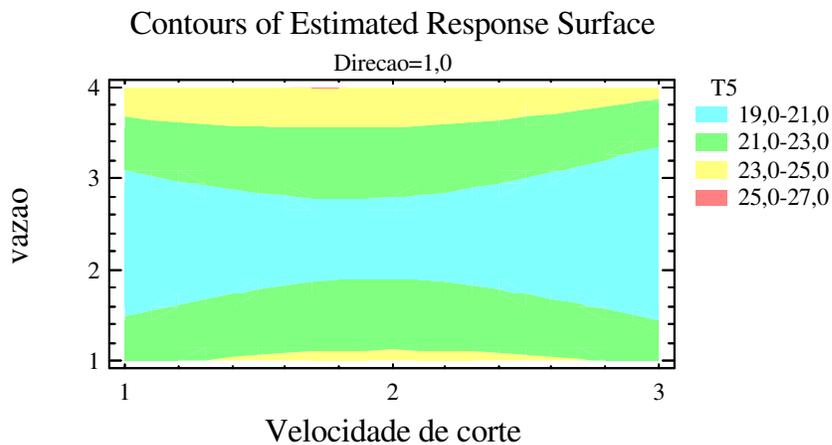


Figura 220 - Distribuição das temperaturas. Termopar #5.

Termopar #6.

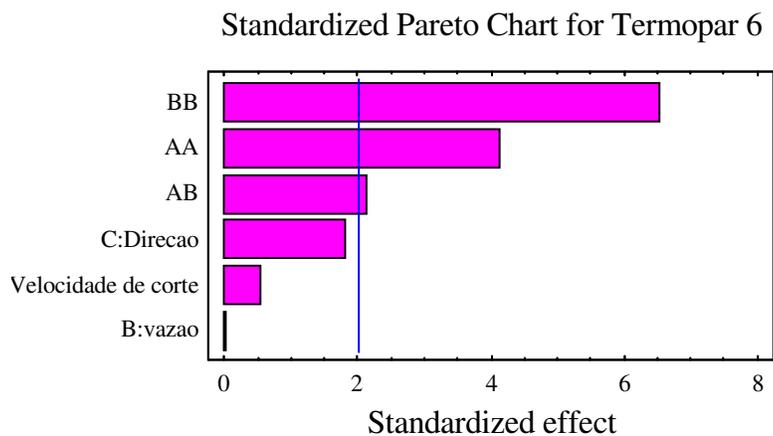


Figura 221 - Efeitos padrões relacionados com o termopar #6.

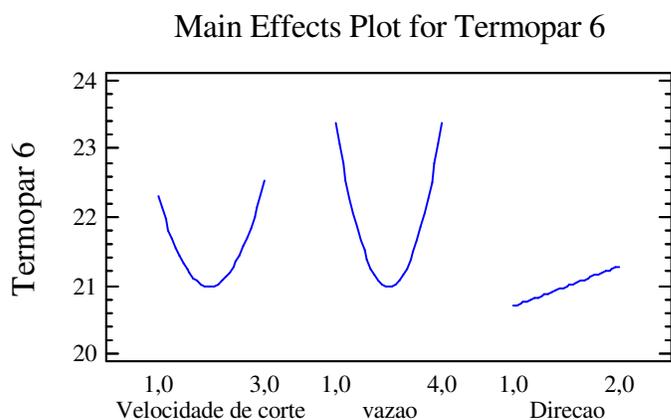


Figura 222 – Comportamento dos efeitos principais relacionados com o termopar #6.

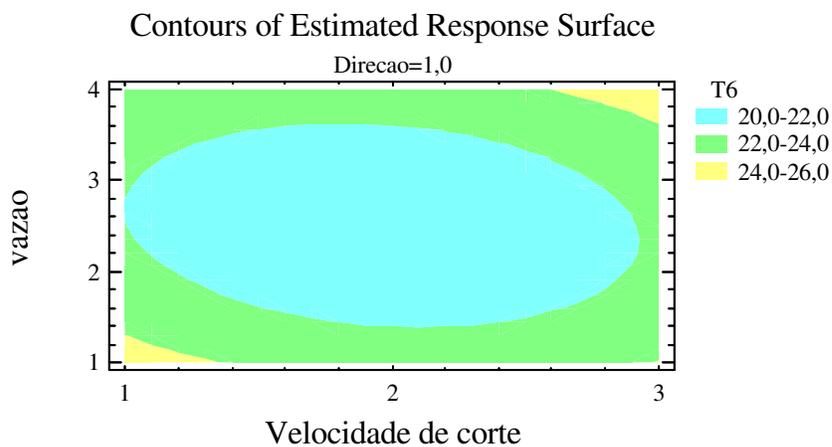


Figura 223- Distribuição das temperaturas. Termopar #6.

As Figuras, 206, 209, 212, 215, 218 e 221 mostram que a vazão é fator significativo para o efeito temperatura de usinagem. O fator direção foi indicado como significativo pelo termopar #5.

As Figuras 207, 210, 213, 216, 219 e 222 mostram como ocorre o comportamento dos fatores velocidade de corte, vazão e direção. Percebe-se nitidamente que quanto maior a vazão tanto menor é o efeito temperatura. Percebe-se ainda que para o nível “4” do fator vazão há o maior valor para o efeito temperatura, uma vez que esse nível corresponde a nenhuma vazão de CO₂. O comportamento do fator direção mostra que as menores temperaturas foram obtidas quando o fluido de corte é adicionado no sentido de corte da ferramenta (nível “1”).

As Figuras 208, 211, 214, 217, 220 e 223 mostram a distribuição das temperaturas com a direção de aplicação do fluido de corte ao nível “1” (mesmo sentido de corte), em função das variáveis “vazão” *versus* “velocidade de corte”.

TABELA 66. Equações relacionadas com os termopares e os efeitos vazão e direção do fluido de corte. MDF.

Termopar	Equação	R ²
1	$T1 = 27,66 + (0,04 \times Vc) - (5,67 \times Q) + (0,17 \times D) + (1,27 \times Q^2)$	33,38%
2	$T2 = 26,56 + (0,20 \times Vc) - (5,23 \times Q) + (0,36 \times D) + (1,14 \times Q^2)$	44,83%
3	$T3 = 28,67 + (0,16 \times Vc) - (7,51 \times Q) + (0,57 \times D) + (1,57 \times Q^2)$	61,07%
4	$T4 = 31,16 - (5,25 \times Vc) - (3,15 \times Q) - (0,03 \times D) + (0,40 \times Vc^2) + (0,55 \times Vc \times Q) + (1,42 \times Vc \times D) + (0,75 \times Q^2) - (1,03 \times Q \times D)$	51,07%
5	$T5 = 24,61 + (3,43 \times Vc) - (6,76 \times Q) + (0,64 \times D) - (0,87 \times Vc^2) - (0,16 \times Vc \times Q) + (0,26 \times Vc \times D) + (1,54 \times Q^2) - (0,13 \times Q \times D)$	64,46%
6	$T6 = 34,16 - (6,56 \times Vc) - (6,08 \times Q) + (0,58 \times D) + (1,43 \times Vc^2) + (0,37 \times V) \times (Q + 1,06 \times Q^2)$	56,83%

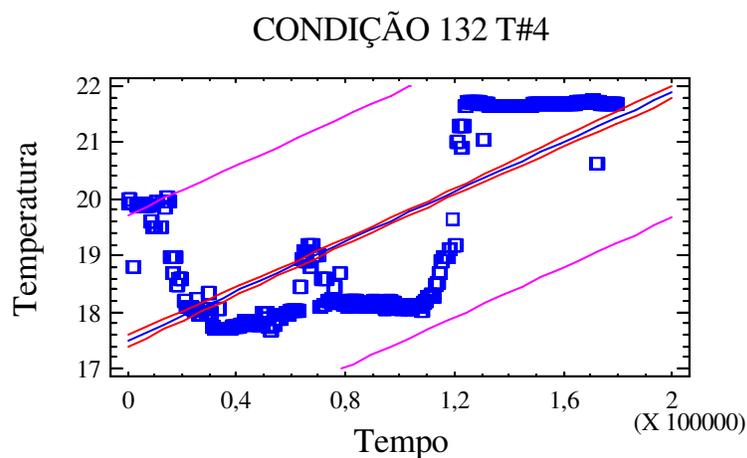
Q = vazão; D= direção; Vc = Velocidade de corte

As regressões que apresentaram melhores ajustes são, em ordem crescente, aquelas relacionadas com os termopares #3 e #5, todas com valores maiores que 60% para R². O ajuste com menor R² está relacionado com o termopar #1.

4.5.2.2. Curvas de aquecimento para as condições de menor aquecimento apresentado durante a realização dos ensaios.

Para efeitos de comparação, foram elaboradas as curvas de aquecimento para as condições 132, 231 e 331. Essas condições apresentaram menor aquecimento registrado pelo sistema de medição de temperatura. Foram analisados os resultados obtidos a partir do termopar #4. Também foram elaboradas as curvas de aquecimento das condições 141, 241 e 341, pois foram às condições que apresentaram maiores temperaturas registradas durante o processo de usinagem dos corpos de prova.

4.5.2.2.1. Condição 132.

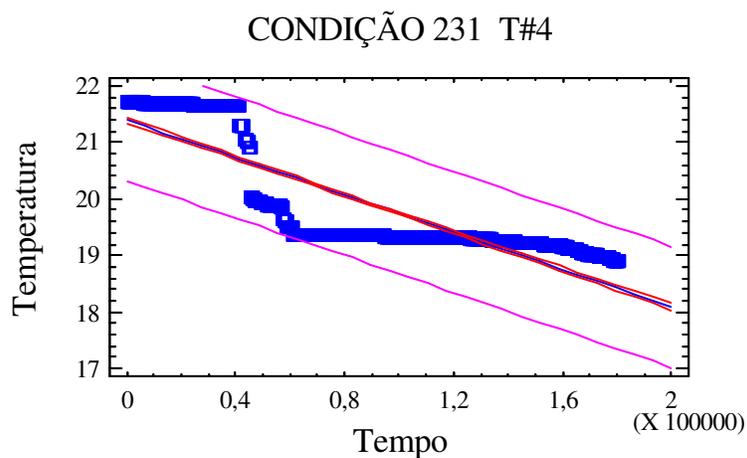


$$\text{Temperatura} = 17,487 + 2,20 \times 10^{-5} \times \text{Tempo}$$

Figura 224 - Regressão condição 131 - termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores óbitos é igual a 0,710463 e o R2 é igual a 50,47%. Percebeu-se que a temperatura tendeu a queda no início do processo, estabilizando-se até $t = 2\text{min}$ e a partir desse momento elevando-se e finalmente estabilizando-se.

4.5.2.2.2. Condição 231.

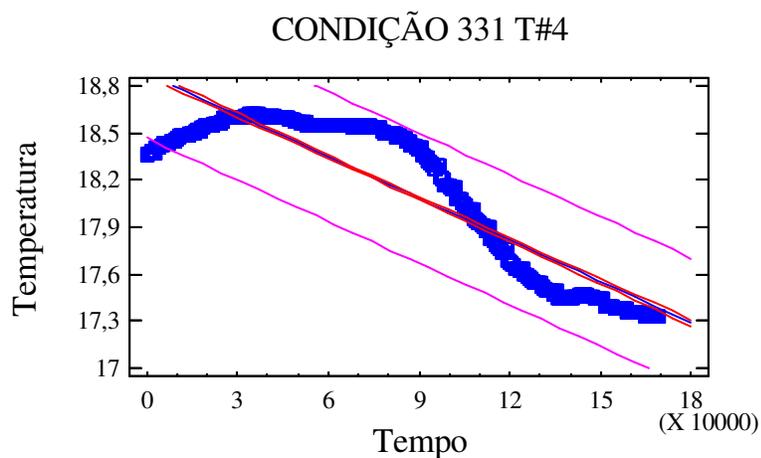


$$\text{Temperatura} = 22,476 - 9,08 \times 10^{-3} \times \sqrt{\text{Tempo}}$$

Figura 225 - Regressão condição 231. Termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a -0,8942 e o R^2 é igual a 79,97%.

4.5.2.2.3. Condição 331.

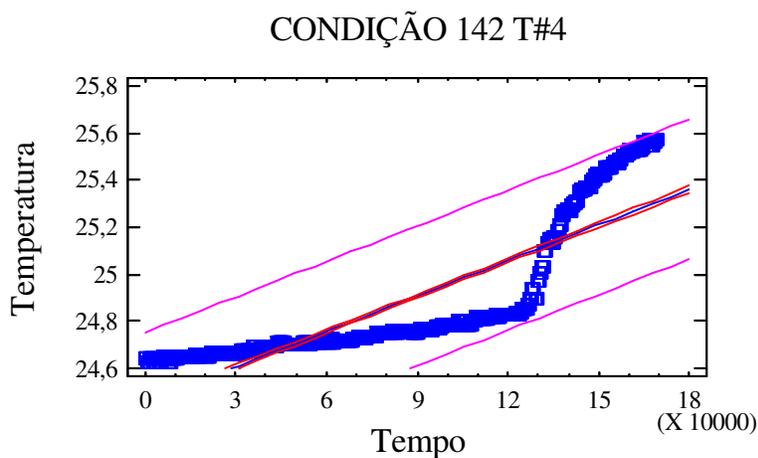


$$\text{Temperatura} = 18,878 - 8,8 \times 10^{-6} \times \text{Tempo}$$

Figura 226 - Regressão condição 331. Termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a -0,8993 e o R^2 é igual a 80,88%.

4.5.2.2.4. Condição 142.

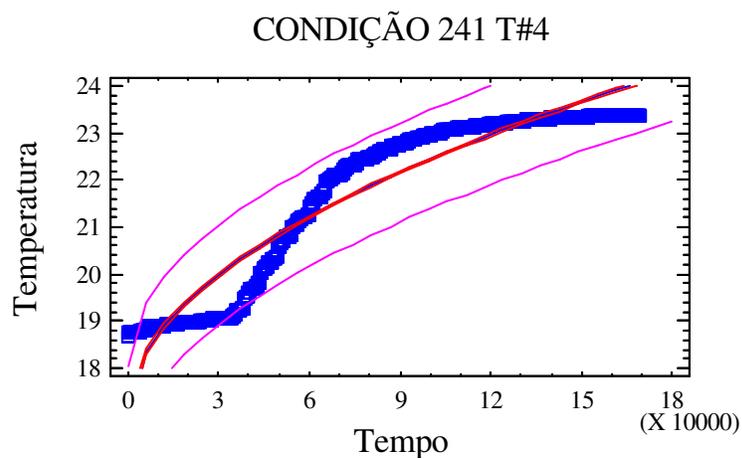


$$\text{Temperatura} = 1/(4,08 \times 10^{-2} - 8,03 \times 10^{-9} \times \text{Tempo})$$

Figura 227 - Regressão condição 142. Termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $-0,8553$ e o R^2 é igual a $73,16\%$.

4.5.2.2.5. Condição 241.

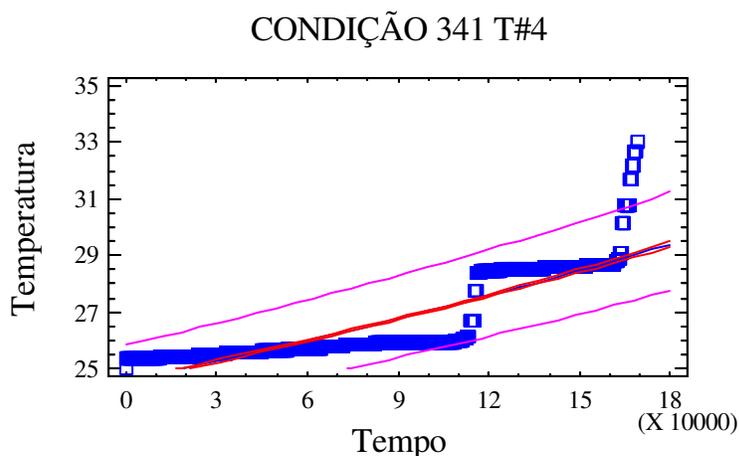


$$\text{Temperatura} = 16,994 + 1,7 \times 10^{-2} \times \sqrt{\text{tempo}}$$

Figura 228 - Regressão condição 241. Termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $-0,9523$ e o R^2 é igual a $90,69\%$.

4.5.2.2.6. Condição 341.



$$\text{Temperatura} = 1/(4,1 \times 10^{-2} - 3,71 \times 10^{-8} \times \text{Tempo})$$

Figura 229 - Regressão condição 34. Termopar #4.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $-0,717$ e o R^2 é igual a $75,99\%$.

4.5.2.3. Resumo dos resultados apresentados.

A Tabela 67 indica o resumo encontrado para as condições que apresentaram melhores resultados em termos de retirada de calor e compara com a situação onde não foi aplicado o mecanismo de refrigeração.

TABELA 67. Resultados obtidos pelo termopar #4.

Condição	Equação	R ²	Correlação
331	$T = 18,878 - 8,8 \times 10^{-6} \times t$	80,88%	-0,899
231	$T = 22,476 - 9,08 \times 10^{-3} \times \sqrt{t}$	79,97%	-0,894
132	$T = 17,487 + 2,20 \times 10^{-5} \times t$	50,47%	0,7104
142	$T = 1/(4,08 \times 10^{-2} - 8,03 \times 10^{-9} \times t)$	73,16%	-0,855
241	$T = 16,994 + 1,7 \times 10^{-2} \times \sqrt{t}$	90,69%	-0,952
341	$T = 1/(4,1 \times 10^{-2} - 3,71 \times 10^{-8} \times t)$	75,99%	-0,717

4.5.3. Avaliação do estado superficial dos corpos de prova usinados. Operação de serramento circular com serra circular.

A avaliação do estado superficial dos corpos de prova foi realizada por dois métodos, a avaliação de defeitos macroscópicos e a avaliação da rugosidade superficial da região usinada. Com referência a avaliação da rugosidade superficial, avaliou-se os parâmetros Ra e Ry. A metodologia adotada para efeitos de medição seguiu o disposto no item 3.1.5.6.

4.5.3.1. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ra.

Os resultados encontrados para o parâmetro Ra estão dispostos na Tabela 68.

Para efeitos de avaliação foi analisado o valor médio obtido entre as quatro medições.

As Figuras 230 e 231 mostram a influência dos fatores sobre o parâmetro de rugosidade Ra. Conforme observado, parece haver influência da direção de aplicação do fluido de corte no estado superficial, mensurado pelo parâmetro Ra.

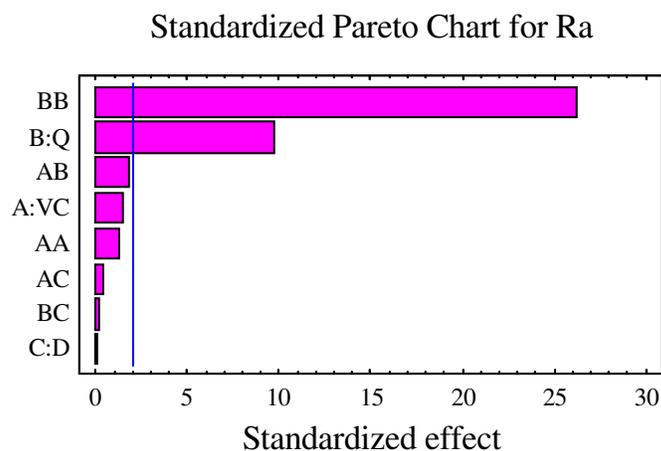


Figura 230 – Gráfico de Pareto -Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

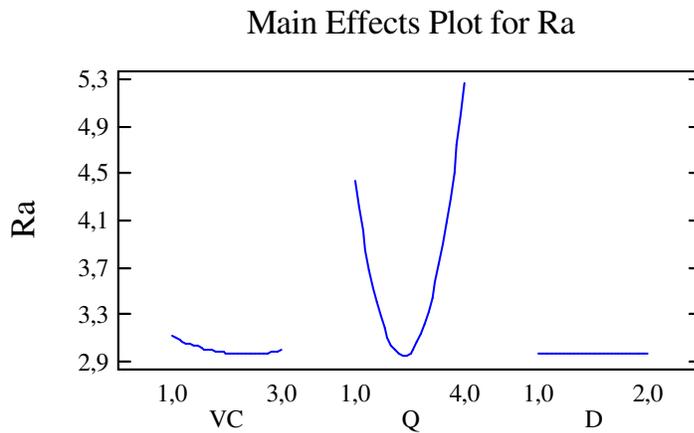


Figura 231 - Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

A Figura 232 mostra o gráfico de contorno cuja evidência é dada para a direção “1” (mesmo sentido da ferramenta de corte). Observa-se que ao nível “4” do fator vazão (ou seja, sem vazão) ocorre os maiores valores para rugosidade superficial Ra.

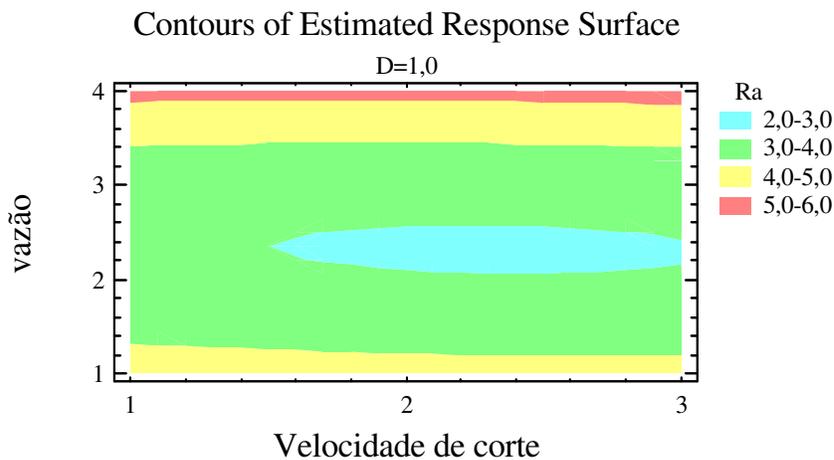


Figura 232 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação ao nível.

A Figura 233 mostra o gráfico de contorno evidenciando a direção “2”. Observa-se que os melhores (menores valores) foram obtidos com o nível “2” e “3” para vazão, combinado com a Velocidade de Corte ao nível “2” e “3”.

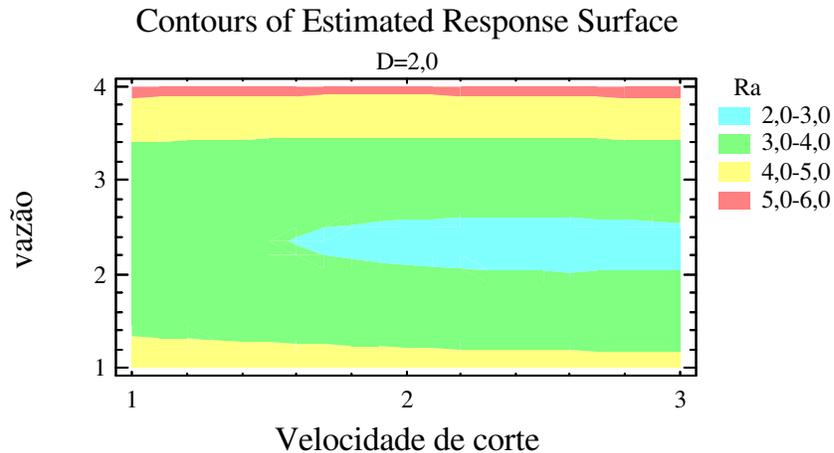


Figura 233 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação ao nível “2”.

A Tabela 69 expõe o resumo estatístico relacionado com o parâmetro de rugosidade Ra encontrado na superfície dos corpos de prova usinados. Na Tabela o fator “A” designa Velocidade de Corte, o fator “B” designa Vazão e o fator “C” direção.

Tabela 69 - Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra apresentada pelos corpos de prova.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
A	0,10927	1	0,10927	2,26	0,1412
B	4,59267	1	4,59267	94,78	0,0000
C	0,00053	1	0,00053	0,01	0,9170
AA	0,07315	1	0,07315	1,51	0,2266
AB	0,15813	1	0,15813	3,26	0,0786
AC	0,00812	1	0,00812	0,17	0,6844
BB	33,3333	1	33,3333	687,91	0,0000
BC	0,00216	1	0,00216	0,04	0,8339
Erro total	1,88979	39	0,048456		
Erro total corrigido	40,1672	47			

Assim, com base nas Figuras dos gráficos e na análise estatística executada presume-se que o fator significativo seja a aplicação do fluido de corte (dióxido de carbono), como significativo.

Nota-se pela Figura 232 e 233 que a rugosidade Ra tende a ser maior quando o nível de vazão é nulo (nível 4) independente da velocidade de corte adotada. O fator direção não implicou em qualquer influência sobre os resultados obtidos. O modelo ficou bem ajustado com a R^2 igual a 95,29% e valor igual a 94,33%. Diferente de outros materiais o MDF possui estrutura muito mais homogênea, conseqüentemente as medições sofreram menor variação resultado em um modelo com elevado ajuste conforme mostrado.

4.5.3.2. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ry.

Os resultados encontrados para o parâmetro Ry estão dispostos na Tabela 70 em anexo.

Com base nesses resultados foi feita a análise estatística de modo a verificar a influência dos fatores envolvidos na experimentação.

A Figura 234 mostra a influência dos fatores sobre o parâmetro de rugosidade Ry. Conforme observado, parece haver influência do fluido de corte no estado superficial, mensurado pelo parâmetro Ry.

A Figura 235 mostra os principais efeitos dos fatores e com relação ao parâmetro de rugosidade Ry. Nota-se que para esse parâmetro, a direção de aplicação do fluido de corte não mostrou qualquer influência.

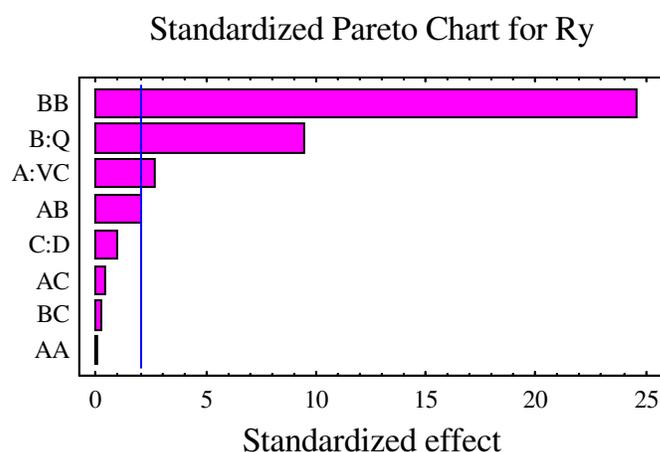


Figura 234 – Gráfico de Pareto -Influência dos fatores sobre a rugosidade Ry dos corpos de prova.

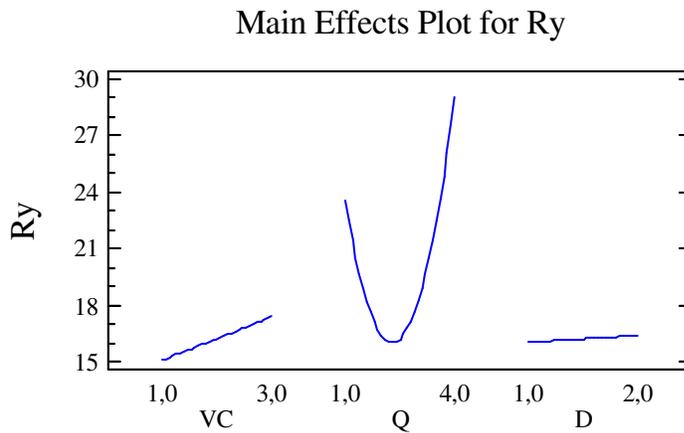


Figura 235 – Influência dos fatores sobre a rugosidade Ry dos corpos de prova.

Na seqüência, a Figura 235 mostra o gráfico de contorno cuja evidencia é dada para a direção “1” (mesmo sentido da ferramenta de corte). Observa-se que os melhores resultados são encontrados com a vazão ao nível 2 e 3 combinados com qualquer nível para a velocidade de corte. Nota-se que para o nível 4 (sem vazão), há os resultados menos satisfatórios.

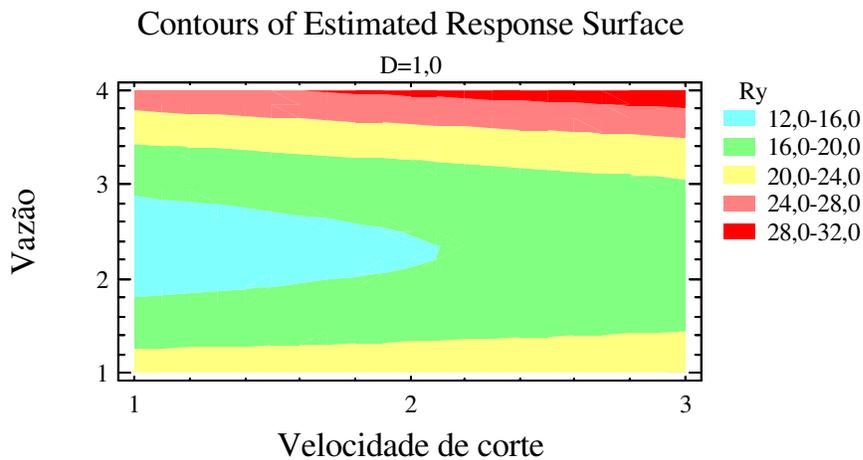


Figura 235 - Influência dos fatores sobre a rugosidade Ry dos corpos de prova.

A Figura 236 mostra o gráfico de contorno evidenciando a direção “2”. Pode ser observado o mesmo comportamento descrito para a Figura 315.

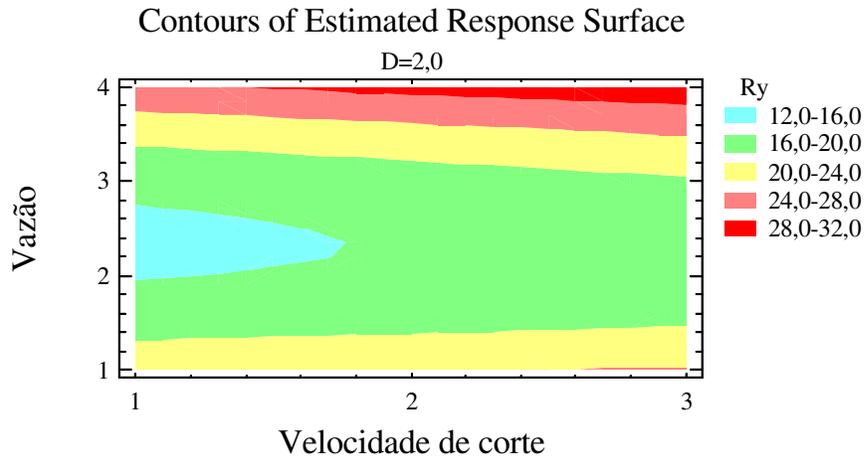


Figura 236 - Influência dos fatores sobre a rugosidade Ry dos corpos de prova.

A Tabela 71 expõe o resumo estatístico relacionado com o parâmetro de rugosidade Ra encontrado na superfície dos corpos de prova usinados. Na Tabela o fator “A” designa velocidade de corte, o fator “B” designa vazão e o fator “C” direção.

Tabela 71. Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra apresentada pelos corpos de prova.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
A	11,4548	1	11,4548	7,21	0,0107
B	143,516	1	143,516	90,30	0,0000
C	1,52297	1	1,52297	0,96	0,3338
AA	0,0103	1	0,0103	0,01	0,9365
AB	6,6137	1	6,6137	4,16	0,0484
AC	0,3230	1	0,3230	0,20	0,6552
BB	963,648	1	963,648	606,29	0,0000
BC	0,0579	1	0,0579	0,04	0,8496
Bloco	11,321	1	11,321	7,12	0,0111
Erro total	60,3975	38	1,5894		
Erro total corrigido	1187,9	47			

Com base nas Figuras dos gráficos e na análise estatística executada presume-se que o fator significativo foi a aplicação do fluido de corte (dióxido de carbono), a velocidade de corte e a combinação destes dois fatores (AB). A direção não foi fator significativa.

Para o modelo apresentado o ajuste encontrado para R^2 foi 94,91%, e o mesmo valor corrigido foi de 93,87%, indicando que o mesmo não está suficientemente ajustado.

4.5.3.3. Avaliação dos defeitos macroscópicos sobre a superfície usinada.

São apresentadas na seqüência as fotos dos corpos de prova usinados que apresentaram evidências de combustão na superfície usinada

4.5.3.3.1. Corpo de prova 13, condição 141.



Figura 237 - Corpo de prova 13 - condição 141

4.5.3.3.2. Corpo de prova 15 condição 241.



Figura 238 - Corpo de prova 15 condição 241

4.5.3.3.3. Corpo de prova 12 condição 341.



Figura 239- Corpo de prova 12 condição 341.

4.5.3.3.4. Corpo de prova 17 condição 342.



Figura 240 - Corpo de prova 17 - condição 342.

Conforme pode ser observado, para as condições de usinagem sem a adoção do dióxido de carbono como fluido de corte, ocorreu combustão da superfície por onde a ferramenta de corte realizou o corte, percebe-se acentuado dano na superfície cortada dos corpos de prova.

4.5.4. Avaliação da vibração no conjunto corpo de prova e máquina operatriz.

Conforme procedimento descrito no item 3.1.5.2, (Figura 34 a 36) foi medida a vibração do conjunto corpo de prova e máquina operatriz.

Como já mencionado para outras análises, foi notado que a presença ou ausência de fluido de corte (dióxido de carbono) não proporcionou diferenças de valores obtidos no que se refere a vibração medida do conjunto máquina e material processado.

Para efeitos da tomada dos valores foi adota o mesmo procedimento aplicado em outras análises (4.1.4; 4.2.4; 4.3.4 e 4.4.4)

A Figura 241 mostra o gráfico de comparação das médias para os quatro níveis de vazão propostos aos experimentos, onde “Q1”, “Q2” e “Q3” retratam o uso do fluido de corte e “Q4” representa sua ausência.

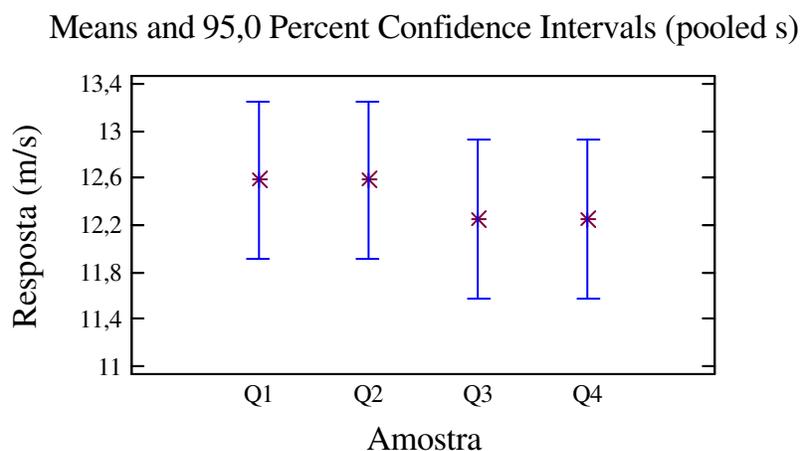


Figura 241 – Gráfico das médias para a análise de vibração resultante do corte dos corpos de prova referente à operação de serramento circular com serra circular.

A Tabela 72 resume os resultados estatísticos obtidos.

Tabela 72. Influência dos fatores sobre a vibração decorrente do processo de usinagem.

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
Entre os grupos	1,3333	3	0,4444	0,34	0,7999
Dentro dos grupos	58,333	44	1,3257		
Erro total corrigido	59,6667	47			

4.5.5. Avaliação da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem.

O procedimento para a medição da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem foi realizado de acordo com o item 3.1.5.3, conforme Figura 37.

A análise dos dados obtidos foi feita de acordo com o mesmo procedimento do item 4.1.4. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 242 e Tabela 73.

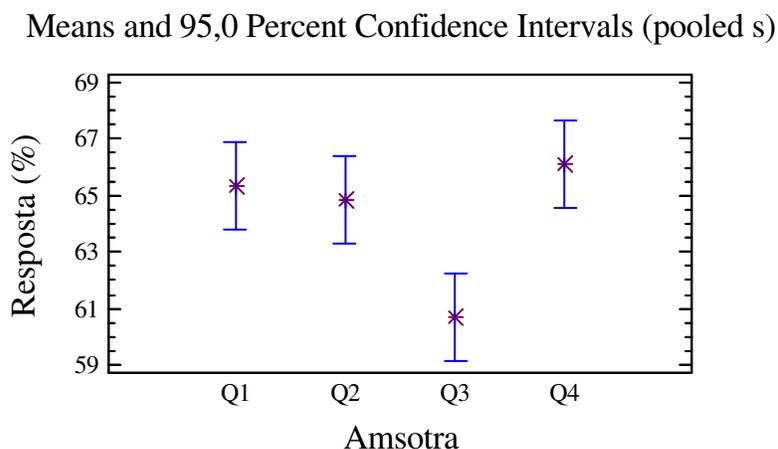


Figura 242 – Gráfico das médias para a análise da umidade relativa próxima a região onde ocorreu o corte referente à operação de serramento circular com serra circular.

Tabela 73. Influência dos fatores sobre a umidade relativa do ambiente próxima à região em processo de usinagem.

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
Entre os grupos	212,563	3	70,8542	10,06	0,0001
Dentro dos grupos	309,917	44	7,04356		
Erro total corrigido	522,479	47			

Observa-se pela análise que há influência significativa do fator vazão do dióxido de carbono. Pela análise das médias de cada ensaio é possível verificar que ao nível de 45g/min de vazão de dióxido de carbono (nível 3) ocorre queda da umidade relativa do ar ao redor do processo de usinagem, uma explicação para esse fenômeno vem no sentido de que a temperaturas muito abaixo de 0°C, toda a umidade presente próxima da região onde ocorre a usinagem do material condensa-se e posteriormente congela-se.

4.5.6. Avaliação temperatura externa próxima à região em processo de usinagem.

O monitoramento da temperatura foi feito de acordo com a Figura 38, descrita no item 3.1.5.4. Verificou-se que a temperatura próxima à região em processo de usinagem manteve-se constantemente abaixo de 0°C em todos os níveis de aplicação do dióxido de carbono como fluido de corte.

4.6. MDF – Operação de fresamento tangencial.

Os resultados apresentados referem-se aos experimentos realizados com a máquina operatriz tupia e com a utilização de fresas . Para efeitos deste relatório, Todos os corpos de prova foram ensaiados seguindo-se o planejamento experimental mostrado no item 3.2.4.

4.6.1. Caracterização dos corpos de prova.

A Tabela 74 do ANEXO apresenta os dados de caracterização dos corpos de prova fabricados com MDF.

A Figura 243 mostra histograma da densidade aparente dos corpos de prova fabricados em MDF para a realização dos ensaios.

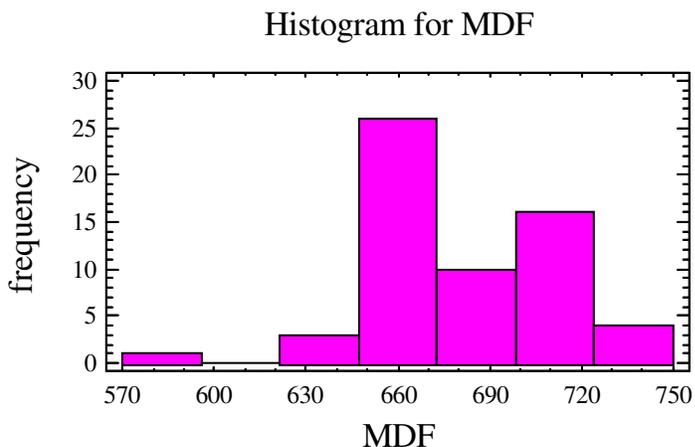


Figura 243. Histograma da densidade aparente dos corpos de prova de MDF

A Tabela 75 contempla o sumário estatístico referente aos corpos de prova fabricados em MDF relacionado com a densidade aparente dos corpos de prova.

TABELA 75. Sumário estatístico para os corpos de prova de MDF - densidade aparente dos corpos de prova.

Estatístico	Valor
Contagem	60
Média	681,029
Variância	927,586
Desvio padrão	30,456
Mínimo	580,45
Máximo	735,45
Amplitude	155,0
Alisamento padrão	-0,503
Curtose padrão	0,706
Coefficiente de variação	10,0%

Dos três materiais adotados para efeitos dessa pesquisa, o MDF foi o que apresentou menor coeficiente de variação. Essa característica já era esperada, uma vez que o MDF é um material processado, assim sendo um material com propriedades mais estáveis e dentro de intervalos mais estreitos.

4.6.2. Resultados pertinentes aos materiais usados - monitoramento da temperatura.

A Tabela 76 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada. Os valores anotados em azul indicam a condição que apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de 4,5%.

TABELA 76 – Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	111	112	121	122	131	132	141	142
1	21,10	19,95	20,05	21,90	19,60	19,30	26,01	25,80
2	21,00	20,95	21,55	23,52	19,10	19,05	25,06	24,50
3	21,05	20,00	20,40	21,56	19,10	19,00	26,05	26,00
4	22,50	21,00	21,46	22,06	19,06	20,05	25,51	26,05
5	22,00	21,70	21,76	21,90	18,05	18,43	26,15	26,10
6	23,45	22,61	22,80	22,86	19,05	19,45	26,10	26,50
Coefficiente de variação	4,5%	4,8%	4,6%	3,3%	2,7%	2,8%	1,7%	2,7%

A Tabela 77 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada. Os valores anotados em azul indicam a condição que apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de aproximadamente 4,2%.

TABELA 77 – Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	211	212	221	222	231	232	241	242
1	23,46	23,52	23,05	23,00	19,80	19,36	26,01	26,20
2	21,55	21,63	21,10	21,00	20,00	19,80	26,30	26,05
3	21,46	21,70	21,01	21,80	20,51	20,50	24,01	24,19
4	22,16	22,51	20,60	21,06	20,50	20,40	25,06	25,16
5	21,10	22,20	20,30	21,16	20,18	20,40	24,20	25,01
6	21,54	22,53	21,10	21,20	20,40	20,19	25,10	25,07
Coefficiente de variação	3,9%	3,1%	4,5%	3,6%	1,4%	2,2%	3,7%	2,9%

A Tabela 78 resume os valores médios obtidos por cada termopar em função da condição de ensaio adotada. Os valores anotados em azul indicam a condição que apresentou menor temperatura durante o processo de usinagem; os valores apresentados em vermelho indicam as condições que apresentaram maior temperatura durante o processo de

usinagem. O coeficiente de variação entre os seis termopares usados nos experimentos foi de aproximadamente 4,2%.

TABELA 78 – Resumo dos valores médios obtidos pelos termopares versus condições de ensaio. Temperatura em °C.

Termopar	311	312	321	322	331	332	341	342
1	21,80	22,30	20,70	20,90	20,40	20,80	24,05	25,01
2	22,03	22,06	20,60	20,01	20,06	20,58	24,10	24,53
3	22,51	23,06	20,56	21,06	21,00	20,95	25,56	25,51
4	22,46	22,89	20,51	21,89	20,01	20,52	26,71	25,32
5	21,55	20,01	20,53	19,95	20,03	20,51	24,56	24,51
6	21,54	20,10	20,49	19,80	18,01	20,46	23,90	24,01
Coeficiente de variação	2,0%	6,2%	0,4%	4,0%	5,1%	0,9%	4,5%	2,3%

Os resultados apresentados pelas análises dos valores obtidos pelos termopares, relacionados nas Tabelas 76, 77 e 78, levam as seguintes considerações:

- *Para as três velocidades de corte adotadas os menores valores de temperatura foram obtidos com a vazão de 45g/min de dióxido de carbono aplicado no mesmo sentido de corte da ferramenta. (131; 231; 331).*

- *Quando a vazão do fluido de corte era reduzida para outros níveis, a temperatura registrada também era aumentada.*

- *Fica evidenciado que a adoção do mecanismo de refrigeração reduz o valor de temperatura na região em processo de usinagem. Sempre a usinagem a seco retornou em maior aquecimento da região em processo de usinagem. (141; 241; 341 e 142; 242;342)*

4.6.2.1. Avaliação dos fatores e níveis relacionados com a temperatura de usinagem.

Com base no planejamento experimental citado no item 3.2.4, foram feitas as análises de significância dos fatores velocidade de corte, vazão e direção de aplicação do fluido de corte. A análise foi feita para todos os termopares, cada qual apresentada individualmente.

Termopar # 1

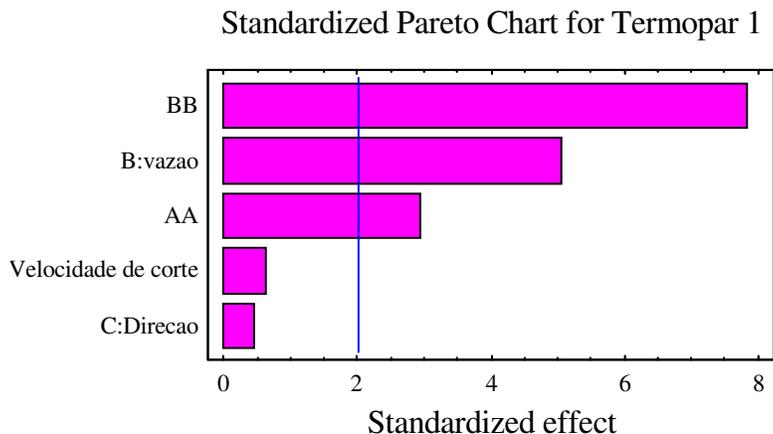


Figura – 244. Efeitos padrões relacionados com o termopar #1.

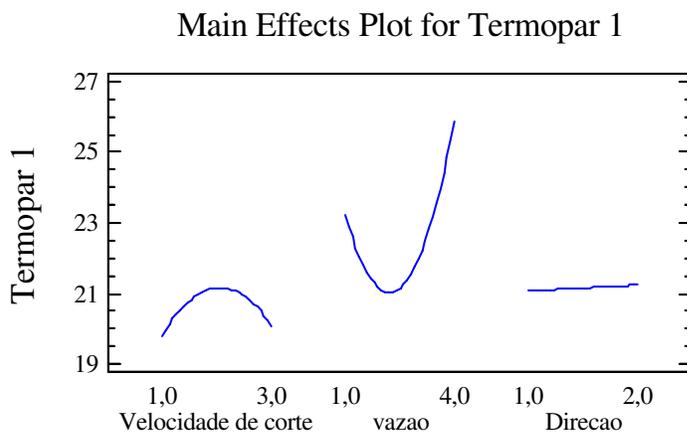


Figura - 245. Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #1.

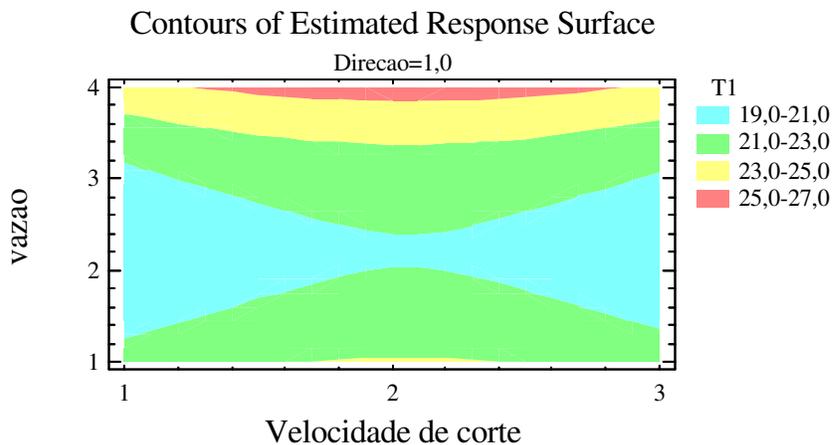


Figura – 246 Distribuição das temperaturas. Termopar #1.

Termopar # 2

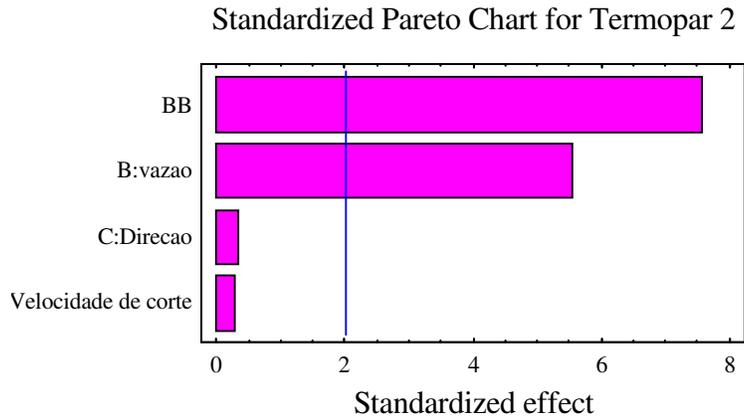


Figura - 247. Efeitos padrões relacionados com o termopar #2.

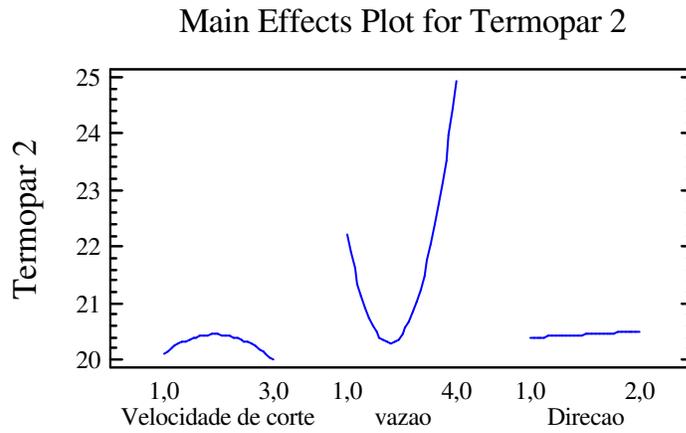


Figura - 248. Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #2.

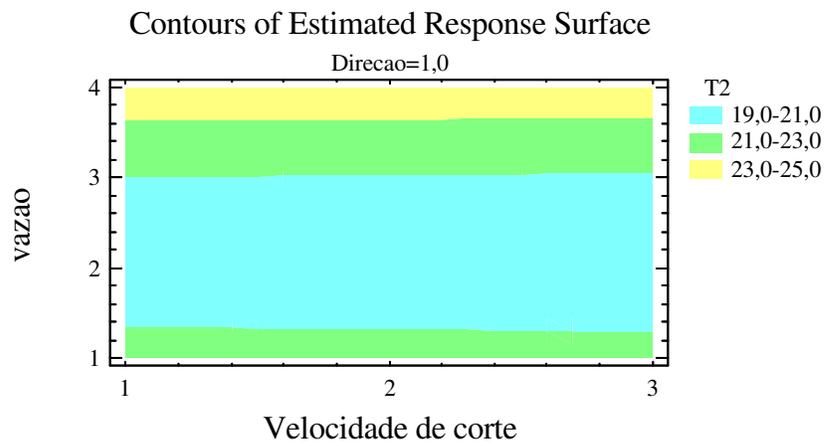


Figura - 249. Distribuição das temperaturas. Termopar #2.

Termopar # 3

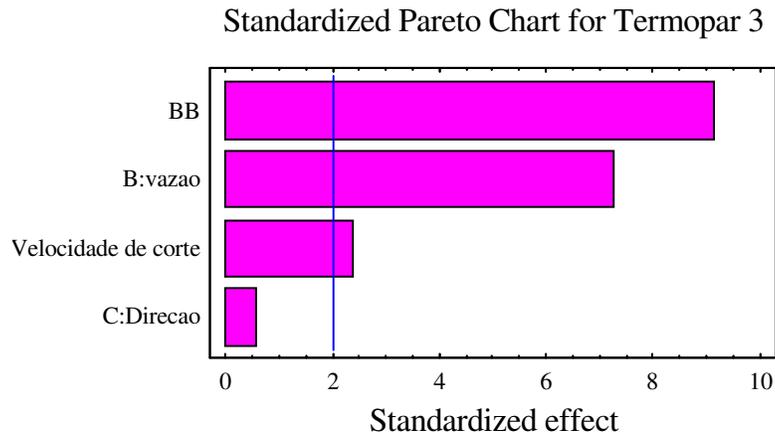


Figura - 250. Efeitos padrões relacionados com o termopar #3.

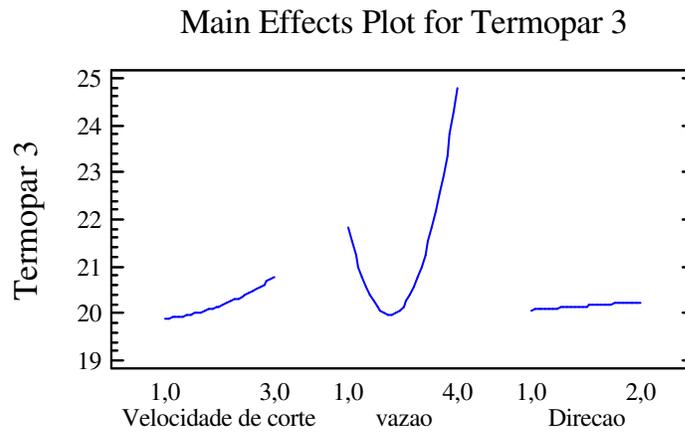


Figura - 251. Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #3.

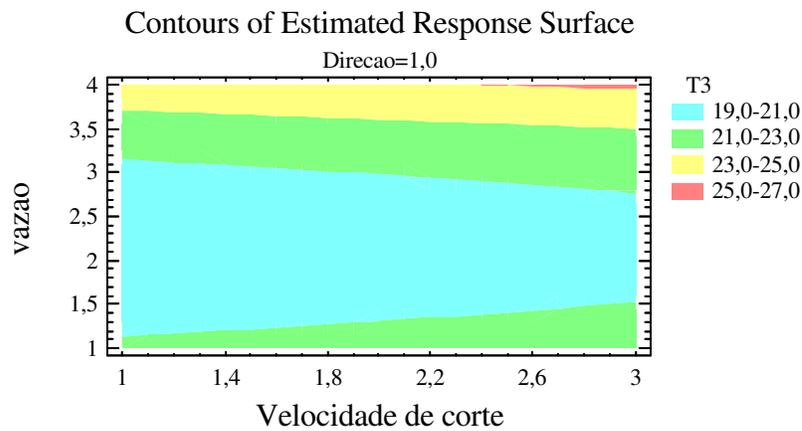


Figura - 252. Distribuição das temperaturas. Termopar #3.

Termopar # 4

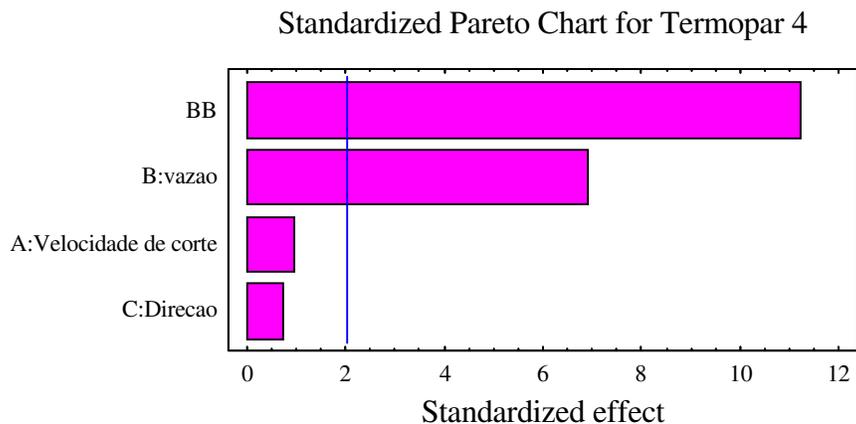


Figura - 253. Efeitos padrões relacionados com o termopar #4.

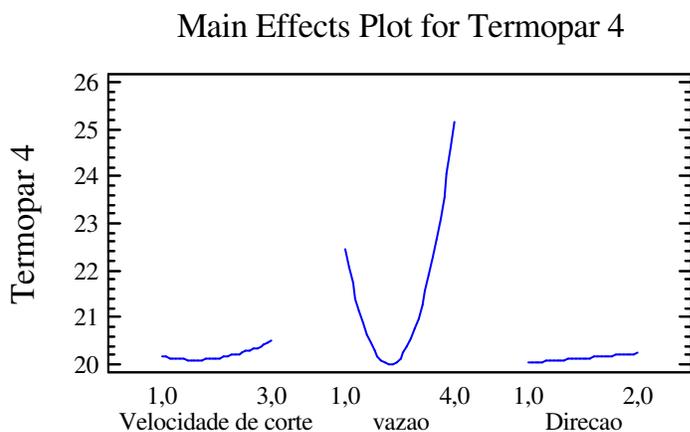


Figura - 254. Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #4.

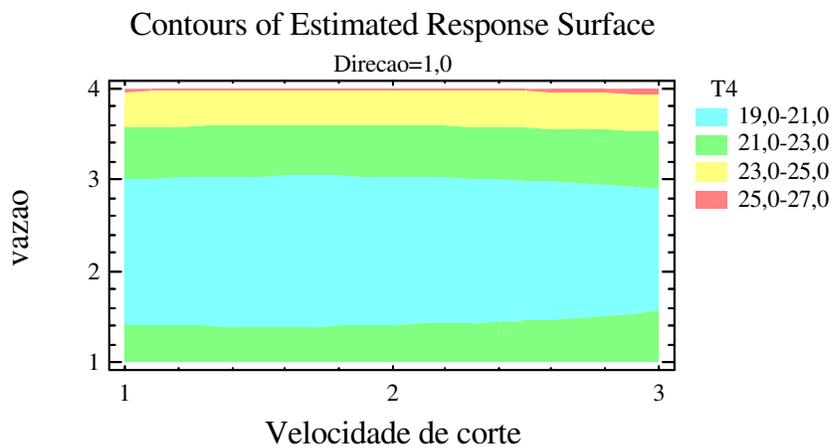


Figura - 255. Distribuição das temperaturas. Termopar #4.

Termopar # 5

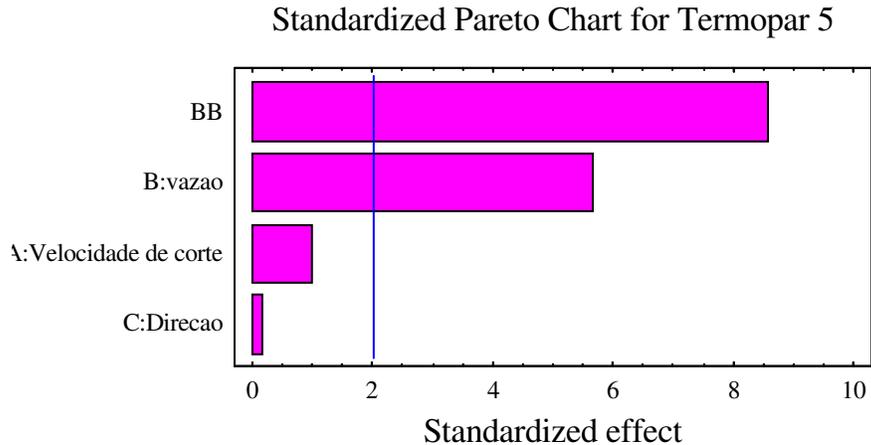


Figura - 256. Efeitos padrões relacionados com o termopar #5.

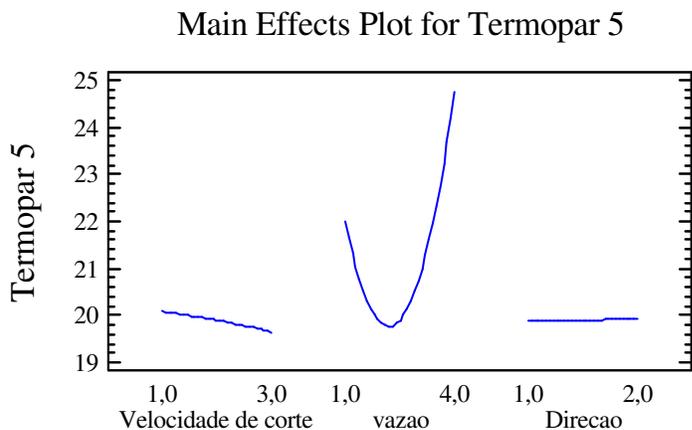


Figura - 257. Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #5.

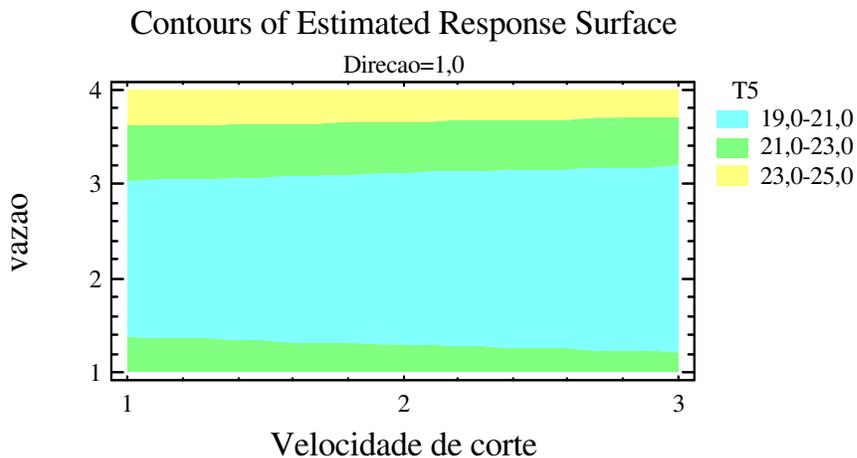


Figura -258. Distribuição das temperaturas. Termopar #5.

Termopar # 6

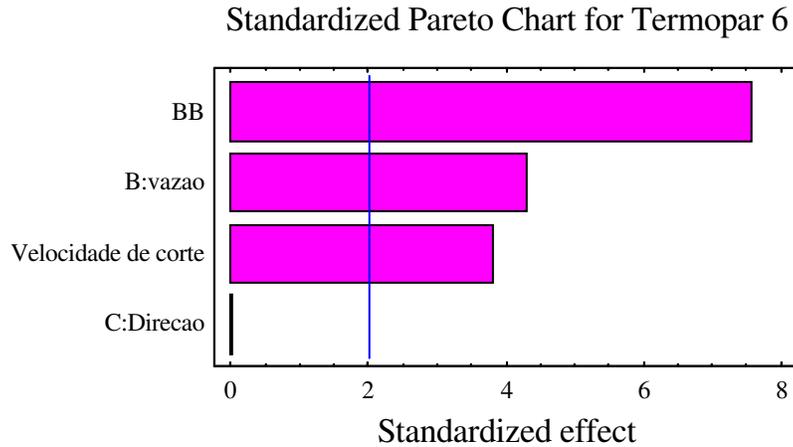


Figura - 259. Efeitos padrões relacionados com o termopar #6.

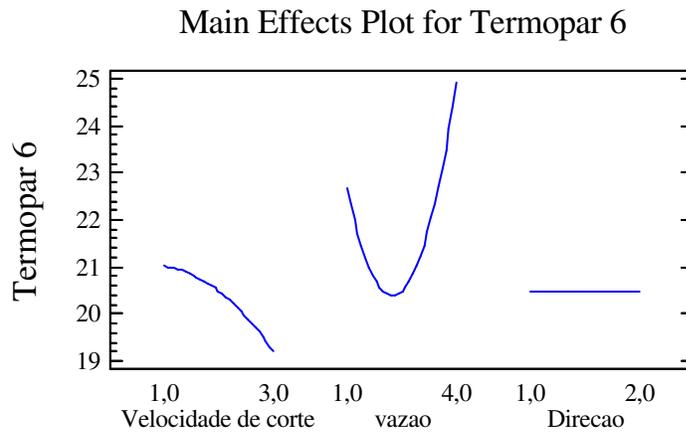


Figura -260. Comportamento dos principais efeitos relacionados com o termopar #6.

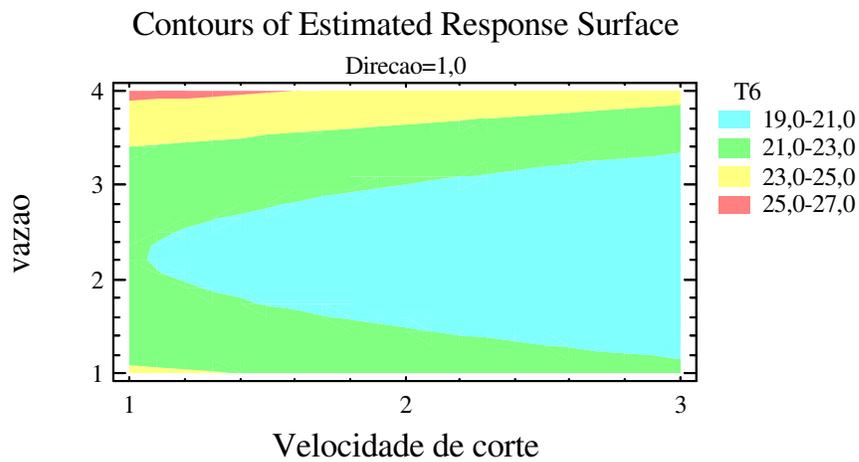


Figura - 261. Distribuição das temperaturas. Termopar #6.

As Figuras 341, 344, 347, 350, 353 e 356 mostram que a vazão é fator significativo para o efeito temperatura de usinagem. O fator direção não foi indicado como significativo por qualquer termopar.

As Figuras 342, 345, 348, 351, 354 e 357 mostram como ocorre o comportamento dos fatores velocidade de corte, vazão e direção. Percebe-se nitidamente que quanto maior a vazão tanto menor é o efeito sobre a temperatura. Percebe-se ainda que para o nível “4” (sem vazão) do fator vazão há o maior valor para o efeito temperatura, uma vez que esse nível corresponde a nenhuma vazão de CO₂.

As Figuras 343, 346, 349, 352, 355 e 358 mostram a distribuição das temperaturas com a direção de aplicação do fluido de corte ao nível “1” (mesmo sentido de corte), em função das variáveis “vazão” *versus* “velocidade de corte”.

Para cada termopar foi efetuada a regressão relacionada com os fatores vazão e direção. Os resultados são apresentados na Tabela 79.

TABELA 79. Equações relacionadas com os termopares e os efeitos vazão e direção do fluido de corte. Eucalipto.

Termopar	Equação	R²
1	$T1 = 23,12 + (4,92 \times Vc) - (6,69 \times Q) + (0,16 \times D) + (1,51 \times Q^2)$	62,00%
2	$T2 = 26,52 - (0,05 \times Vc) - (6,02 \times Q) + (0,11 \times D) + (1,38 \times Q^2)$	66,64%
3	$T3 = 25,41 + (0,44 \times Vc) - (5,99 \times Q) + (0,16 \times D) + (1,39 \times Q^2)$	74,89%
4	$T4 = 27,61 + (0,16 \times Vc) - (7,27 \times Q) + (0,19 \times D) + (1,63 \times Q^2)$	78,7%
5	$T5 = 27,60 - (0,21 \times Vc) - (6,80 \times Q) + (0,05 \times D) + (1,54 \times Q^2)$	68,91%
6	$T6 = 29,37 - (0,90 \times Vc) - (6,59 \times Q) - (0,01 \times D) + (1,46 \times Q^2)$	65,36%
Geral	$Tn = 26,61 - (0,73 \times Vc) - (6,56 \times Q) + (0,11 \times D) + (1,49 \times Q^2)$	69,42%

$Vc = Vc ; Q = vazão$

4.6.2.2. Curvas de aquecimento para as condições de menor aquecimento apresentado durante a realização dos ensaios.

4.6.2.2.1. Condição 131.

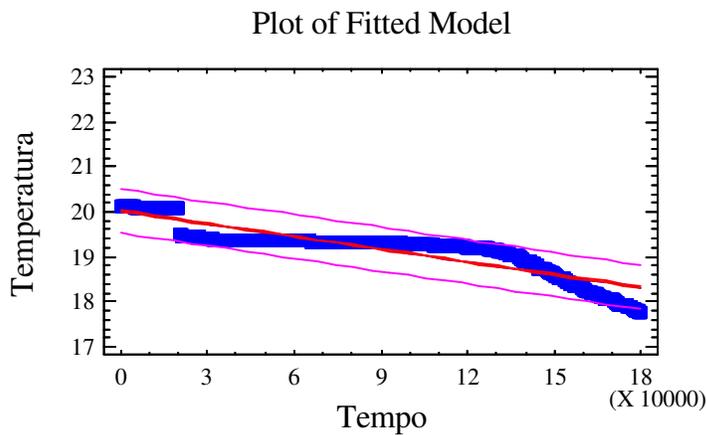


Figura - 262. Regressão condição 131.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $-0,8906$ e o R^2 é igual a $79,32\%$.

4.6.2.2.2. Condição 231.

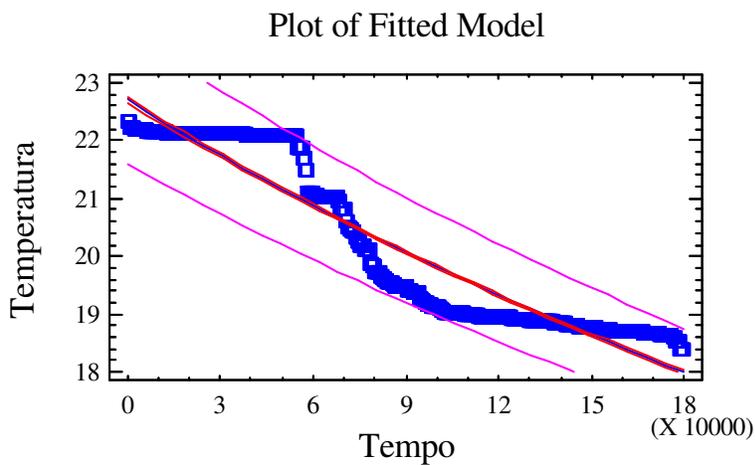


Figura - 263. Regressão condição 231.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $-0,932$ e o R^2 é igual a $89,33\%$.

4.6.2.2.3. Condição 331.

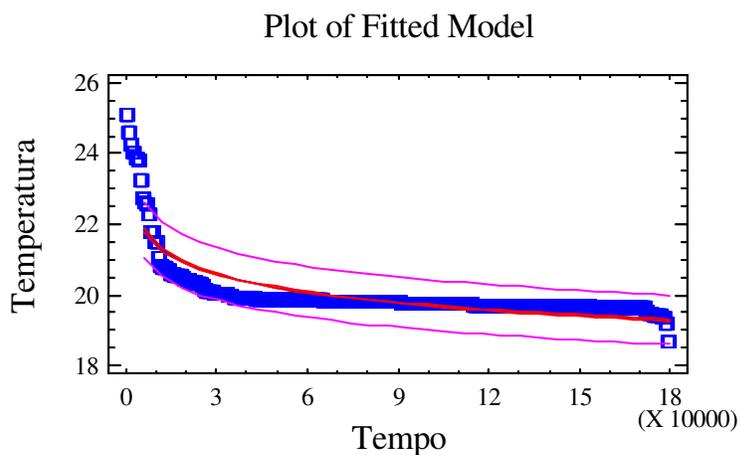


Figura - 361. Regressão condição 331.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $-0,891$ e o R^2 é igual a $79,56\%$.

4.6.2.2.4. Condição 141.

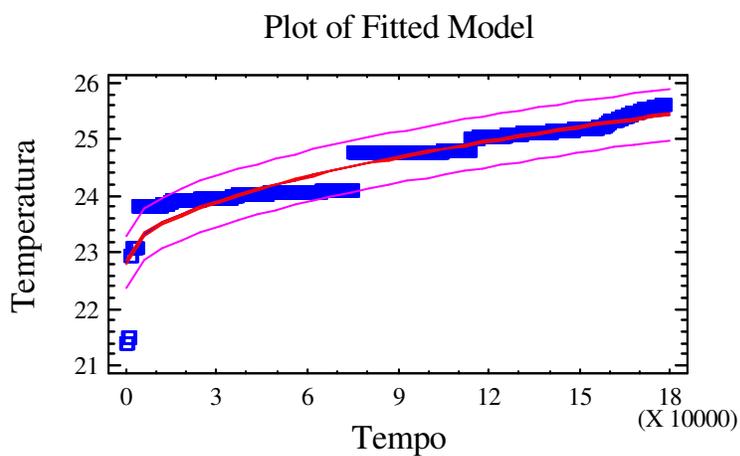


Figura - 264. Regressão condição 141.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $0,935$ e o R^2 é igual a $87,49\%$.

4.6.2.2.5. Condição 241.

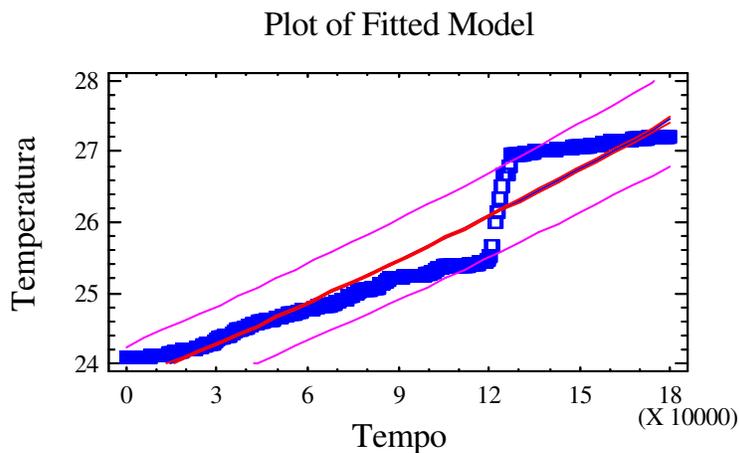


Figura -265. Regressão condição 241.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $r = 0,964$ e o R^2 é igual a 93,66%.

4.6.2.2.6. Condição 341.

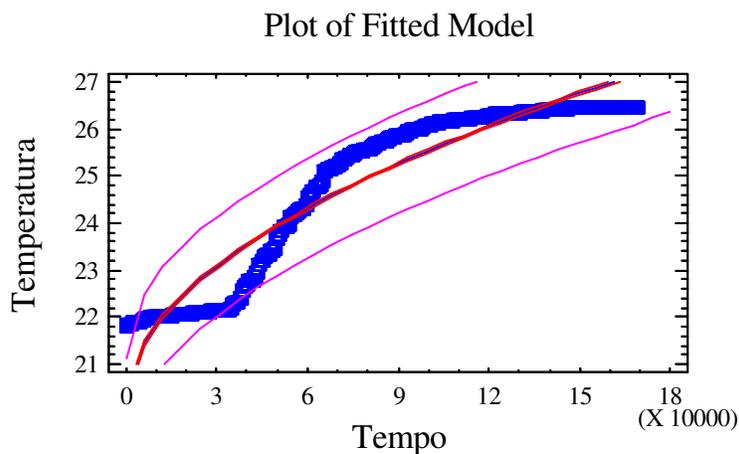


Figura -266. Regressão condição 241.

O coeficiente de correlação entre os valores obtidos é igual a $r = 0,9520$ e o R^2 é igual a 90,60%.

4.6.2.3. Resumo dos resultados apresentados.

A Tabela 80 indica o resumo encontrado para as condições que apresentaram melhores resultados em termos de retirada de calor e compara com a situação onde não foi aplicado o mecanismo de refrigeração.

TABELA 80. Resultados obtidos pelo T #4.

Condição	Equação	R ²	Correlação
331	$T = 26,09 - 18,8 \times 10^{-6} \times t$	79,56%	-0,891
231	$T = 1/(4,4 \times 10^{-2} - 6,40 \times 10^{-8} \times t)$	89,31%	-0,932
131	$T = 1/(6,4 \times 10^{-2} - 7,8 \times 10^{-8} \times t)$	89,45%	-0,946
341	$T = 22,25 + 1,24 \times 10^{-2} \times \sqrt{t}$	90,60%	0,952
241	$T = 1/(4,2 \times 10^{-2} - 3,15 \times 10^{-8} \times t)$	93,66%	0,964
141	$T = 22,83 + 6,1 \times 10^{-3} \times t$	87,49%	0,935

Os resultados mostram que o mecanismo de refrigeração favorece a redução do calor gerado durante o processo de usinagem. Para todos os termopares observa-se satisfatório valor de R² e correlação, todos os valores foram superiores a 70%. Observa-se pela Tabela 49 que o aquecimento quando o mecanismo de refrigeração era utilizado, ocorria de modo linear com retas com baixo coeficiente angular. Para os cortes realizados a seco (nível 4 de vazão), as regressões seguiram modelos não lineares.

Se comparado com as regressões obtidas para o eucalipto (Tabela 26), as apresentadas pelo resultado da usinagem dos corpos de prova em pinus são mais representativas.

4.6.3. Avaliação do estado superficial dos corpos de prova usinados. Operação de fresamento tangencial com fresa perfilada.

A avaliação do estado superficial dos corpos de prova foi realizada conforme procedimentos adotados no item 4.1.3. A metodologia adotada para efeitos de medição seguiu o disposto no item 3.1.5.6.

4.6.3.1. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ra.

Os resultados encontrados para o parâmetro Ra estão dispostos na Tabela 81.

Para efeitos de avaliação foi analisado o valor médio obtido entre as quatro medições. Atrase

As Figuras 364 e 365 mostram a influência dos fatores sobre o parâmetro de rugosidade Ra. Conforme observado, parece haver influência do fluido de corte no estado superficial mensurado pelo parâmetro Ra.

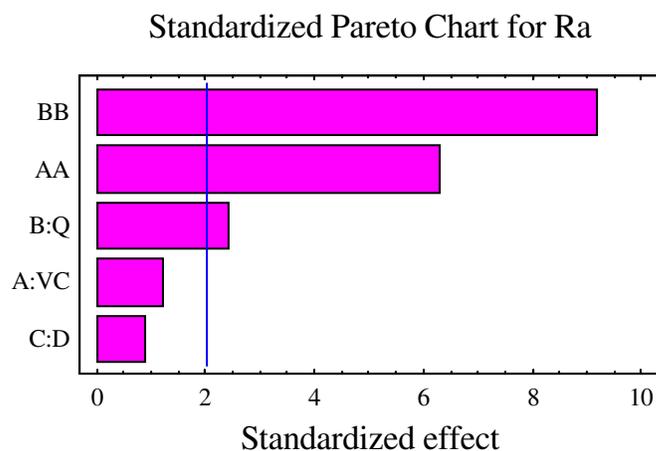


Figura 267 - Gráfico de Pareto -Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

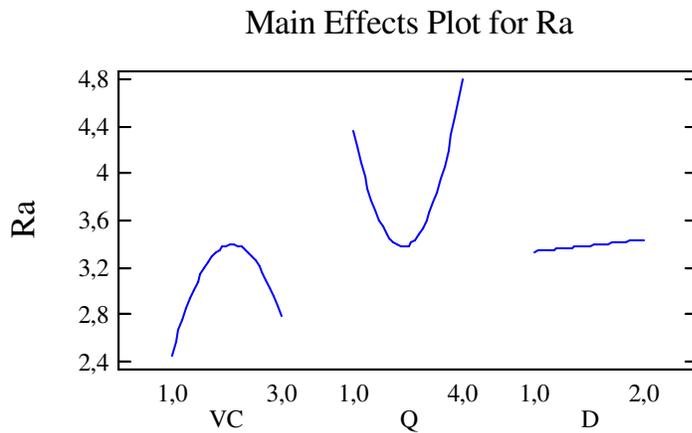


Figura 268 - Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

A Figura 366 mostra o gráfico de contorno cuja evidência é dada para a direção “1” (mesmo sentido da ferramenta de corte). Observa-se que ao nível 4 do fator vazão (ou seja, sem vazão) ocorre os maiores valores para rugosidade superficial Ra.

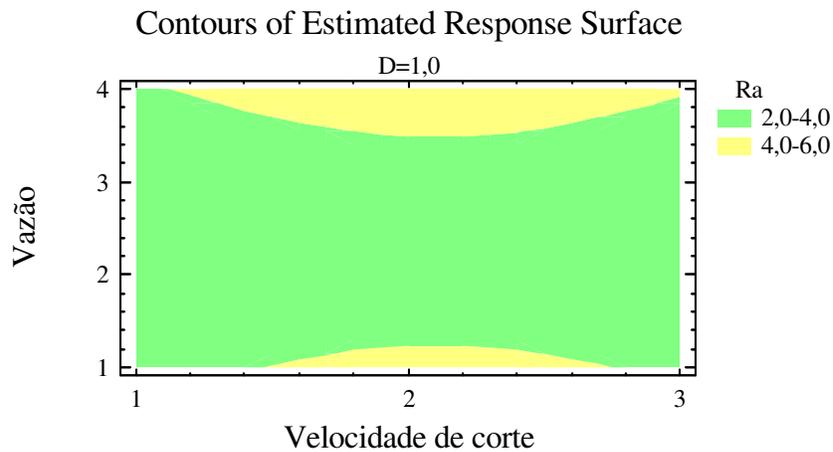


Figura 269 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação “1”.

A Figura 257 mostra o gráfico de contorno evidenciando a direção “2”. Observa-se que os melhores (menores valores) foram obtidos com o nível “2” e “3” para vazão.

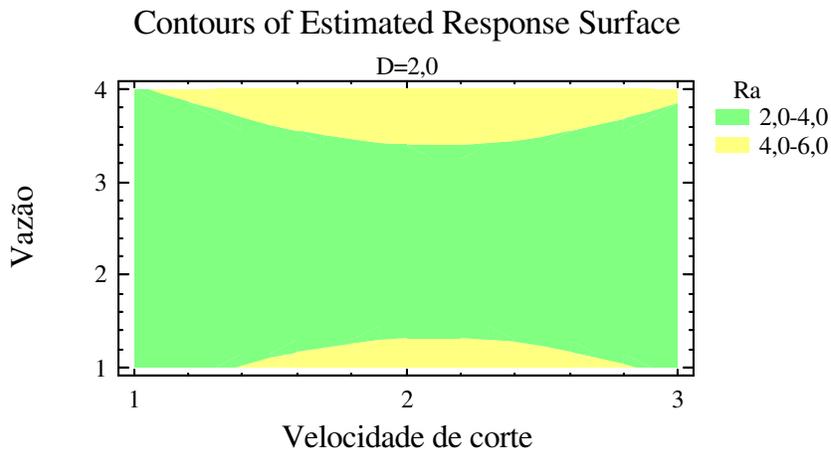


Figura 270 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ra dos corpos de prova com direção de aplicação “2”.

A Tabela 82 expõe o resumo estatístico relacionado com o parâmetro de rugosidade Ra encontrado na superfície dos corpos de prova usinados. Na Tabela o fator “A” designa Velocidade de Corte , o fator “B” designa Vazão e o fator “C” direção.

Tabela 82. Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra apresentada pelos corpos de prova.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
A	0,2335	1	0,2335	1,46	0,2335
B	0,9484	1	0,9484	5,94	0,0192
C	0,1260	1	0,1260	0,79	0,3795
AA	6,3037	1	6,3037	39,47	0,0000
BB	13,4620	1	13,4620	84,28	0,0000
Bloco	0,2664	1	0,2664	1,67	0,2038
Erro total	6,5489	41	0,1597		
Erro total corrigido	31,9931	47			

Assim, com base nas Figuras dos gráficos e na análise estatística executada presume-se que o fator significativo seja a aplicação do fluido de corte (dióxido de carbono).

Notam-se pelas Figuras 366 e 367 que a rugosidade Ra tende a ser maior quando o nível de vazão é nulo (nível “4”). O fator direção parece não ser significativo.

O modelo como apresentado possui bom ajuste, cujo valor encontrado para R^2 para o experimento foi de 79,53% e o mesmo valor corrigido foi de 77,09%.

4.6.3.2. Avaliação do parâmetro de rugosidade Ry.

Os resultados obtidos para o parâmetro Ry estão apresentados na Tabela 83 do ANEXO.

Com base nesses resultados foi feita a análise estatística de modo a verificar a influência dos fatores envolvidos na experimentação.

A Figura 368 mostra a influência dos fatores sobre o parâmetro de rugosidade Ry. Para efeitos de avaliação foi analisado o valor médio obtido entre as quatro medições.

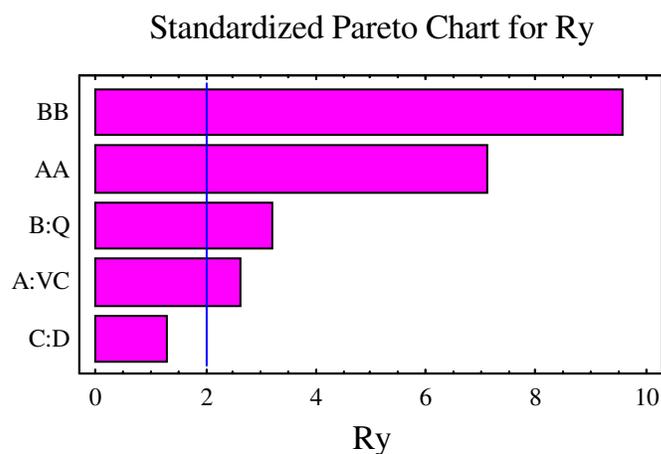


Figura 271 - Gráfico de Pareto -Influência dos fatores sobre a rugosidade Ra dos corpos de prova.

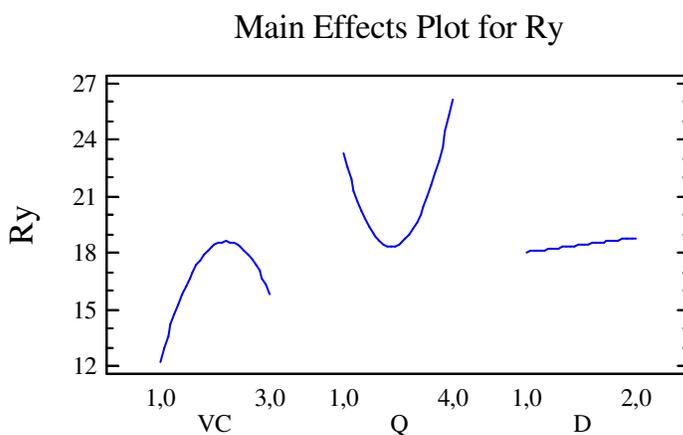


Figura 272 - Influência dos fatores sobre a rugosidade Ry dos corpos de prova.

Conforme observado, parece haver influência da aplicação do fluido de corte no estado superficial, mensurado pelo parâmetro Ry.

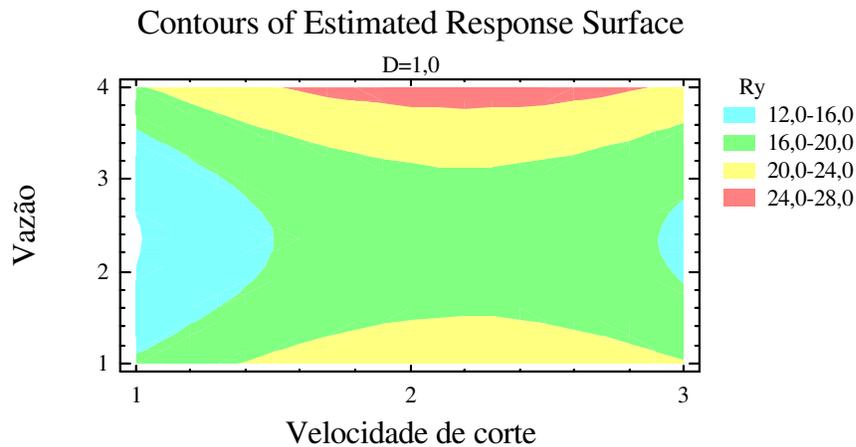


Figura 273 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ry dos corpos de prova com direção de aplicação 1.

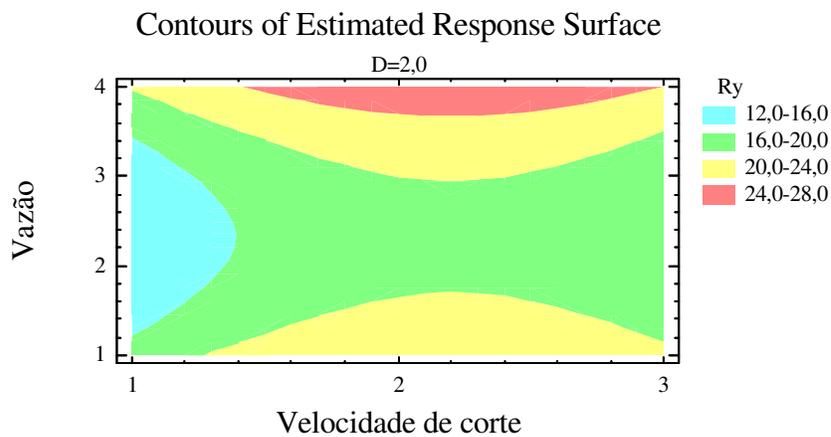


Figura 274 – Gráfico de contorno para a rugosidade Ry dos corpos de prova com direção de aplicação “2”.

A Tabela 84 expõe o resumo estatístico relacionado com o parâmetro de rugosidade Ry encontrado na superfície dos corpos de prova usinados. Na Tabela o fator “A” designa Velocidade de Corte, o fator “B” designa Vazão e o fator “C” direção.

Tabela 84. Influência dos fatores sobre a rugosidade Ry apresentada pelos corpos de prova.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
A	28,0242	1	28,0242	6,86	0,0123
B	41,8665	1	41,8665	10,25	0,0026
C	6,9616	1	6,9616	1,70	0,1991
AA	206,096	1	206,096	50,44	0,0000
BB	375,872	1	375,872	91,98	0,0000
Bloco	0,3729	1	0,3729	0,09	0,7641
Erro total	167,536	41	4,0862		
Erro total corrigido	945,718	47			

Assim, com base nas Figuras dos gráficos e na análise estatística executada presume-se que o fator significativo foi a aplicação do fluido de corte (dióxido de carbono), cujo valor de “P” retornou em 0,0026. Notam-se pelas Figuras 370 e 371 que a rugosidade Ry tende a ser maior quando o nível de vazão é nulo (nível “4”). O fator direção não foi significativo para os resultados obtidos.

O modelo apresentado possui valor encontrado para R^2 igual a 82,28% e o mesmo valor corrigido igual a 80,17%.

4.6.3.3. Avaliação dos defeitos macroscópicos sobre a superfície usinada.

4.6.3.3.1. Condição 141.



Figura 275 - Condição 141.

4.6.3.3.2. Condição 241.



Figura 276 - Condição 241.

4.6.3.3.3. Condição 341.



Figura 277 –Condição 341.

4.6.4. Avaliação da vibração no conjunto corpo de prova e máquina operatriz.

Conforme procedimento descrito no item 3.1.5.2, (Figura 34 a 36) foi medida a vibração do conjunto corpo de prova e máquina operatriz.

Do mesmo modo que para outras avaliações, percebeu-se que não ocorreu influência significativa na vibração medida durante a execução dos ensaios com a adição do fluido de corte com aqueles que não adotaram esse mecanismo de refrigeração.

De modo a propor essa análise, foram tomados os valores médios de cada conjunto de dados relacionados com cada corpo de prova, assim para a vazão “Q=1”, por exemplo, foram destinados para análise os doze dados relativos aos valores médios de cada ensaio

realizado com esse nível de vazão. Cada valor teve origem nos 180 dados obtidos durante a realização de cada ensaio, do total de 48 ensaios realizados.

A Figura 265 mostra o gráfico de comparação das médias para os quatro níveis de vazão propostos aos experimentos, onde “Q1”, “Q2” e “Q3” retratam o uso do fluido de corte e “Q4” representa sua ausência.

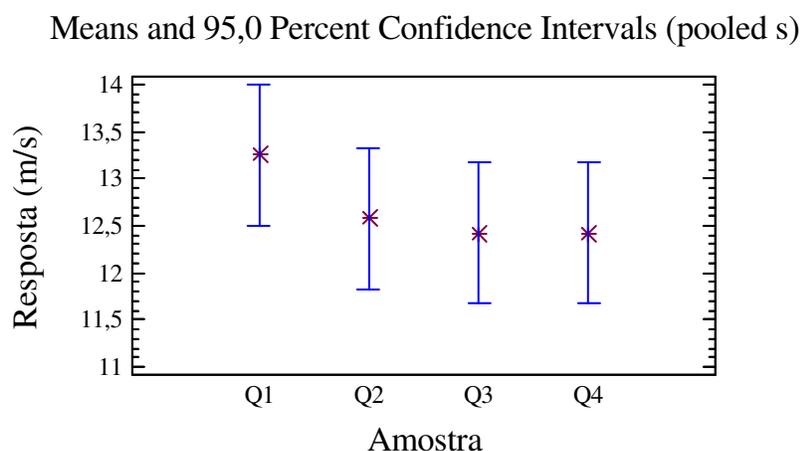


Figura 278.

Tabela 85. Influência dos fatores sobre a vibração decorrente do processo de usinagem.

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
Entre os grupos	5,6666	3	1,8888	1,14	0,3440
Dentro dos grupos	73,000	44	1,6590		
Erro total corrigido	78,666	47			

4.6.5. Avaliação da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem.

O procedimento para a medição da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem foi realizado de acordo com o item 3.2.5.1, conforme Figura 49.

A análise dos dados obtidos foi feita de acordo com o mesmo procedimento do item 4.1.4. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 266 e Tabela 55.

Means and 95,0 Percent Confidence Intervals (pooled s)

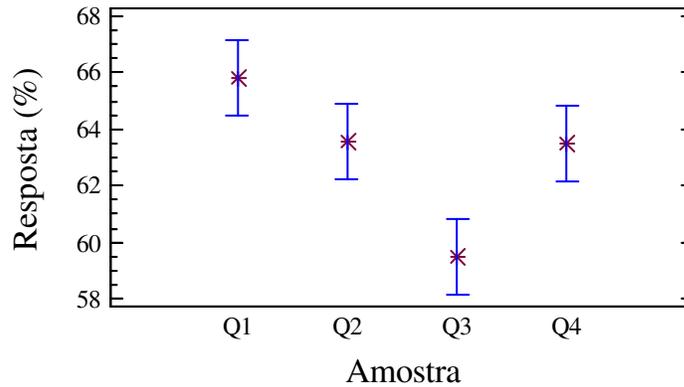


Figura 279 – Gráfico das médias para a análise da umidade relativa próxima a região onde ocorreu o corte referente à operação de fresamento tangencial.

Tabela 86. Influência dos fatores sobre a umidade relativa do ambiente próxima à região em processo de usinagem.

Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Taxa F	Valor de P
Entre os grupos	249,896	3	83,2986	15,90	0,000
Dentro dos grupos	230,583	44	5,24053		
Erro total corrigido	225,479	47			

Conforme pode ser notado, foi obtido o menor valor para a umidade relativa teve quando a vazão de dióxido de carbono foi empregada no maior nível (nível 3). Ao nível “1” a umidade foi maior que sem a aplicação do fluido

4.6.6. Avaliação temperatura externa próxima à região em processo de usinagem.

O monitoramento da temperatura foi feito de acordo com a Figura 49 descrita no item 3.2.5.1. Verificou-se que a temperatura próxima à região em processo de usinagem manteve-se constantemente abaixo de 0°C em todos os níveis de aplicação do dióxido de carbono como fluido de corte.

4.7. Resultados relacionados com a ferramenta de corte – Serra circular.

Foram utilizadas duas serras circulares para a realização dos experimentos. Uma serra foi utilizada para o corte dos corpos de prova sem o mecanismo de refrigeração e outra utilizada para o corte com o mecanismo de refrigeração apresentado neste projeto. Foram identificados dez insertos cortantes do total de trinta e dois insertos existentes em cada serra. Deste modo, aproximadamente um terço dos insertos cortantes foram considerados e tomados como amostras para a avaliação da rugosidade antes e após a realização dos ensaios.

Foram cortados cento e quarenta e quatro corpos de prova, correspondentes a quarenta e oito corpos por material. Todos os corpos de prova foram usinados de acordo com as condições apresentadas no planejamento experimental. Após a realização de todos os ensaios, para os três materiais, foram tomadas as rugosidades superficiais dos insertos da ferramenta de corte. Esses resultados foram comparados com as rugosidades iniciais previamente obtidas antes que as ferramentas de corte fossem aplicadas para as operações de usinagem pretendidas.

Os insertos foram limpos e livres de qualquer detrito oriundo do processo de usinagem, antes da efetiva medição da rugosidade inicial e final dos mesmos.

As rugosidades foram retiradas da superfície de saída ($A\gamma$) e da superfície secundária de corte ($A'\alpha$). Para efeitos da medição da rugosidade, foi utilizado o rugosímetro modelo SurfTest, fabricante Mitutoyo, devidamente calibrado.

Foram adotados os parâmetros de rugosidade R_a [rugosidade média aritmética] e rugosidade R_y [rugosidade total]. O rugosímetro foi preparado de modo que medisse cinco *cut-off's* [região de avaliação], com cada *cut-off* equivalente a 0,8mm. O comprimento total avaliado total de 4,0mm.

A Figura 280 ilustra o inserto cortante das serras circulares. Estão indicadas as principais nomenclaturas geométricas relevantes. A Figura em azul é a vista de elevação do inserto, onde se tem a superfície principal de corte, $A\alpha$; a Figura em verde é a vista lateral esquerda, onde se tem a superfície secundária de corte $A'\alpha$; a Figura em laranja é a vista de planta, onde se tem a superfície de saída $A\gamma$. A indicação feita pelo algarismo 1 mostra a ponta de corte; o algarismo 2 indica a aresta principal de corte; o algarismo 3 indica a aresta secundária de corte e a seta tracejada indica a direção de avanço.

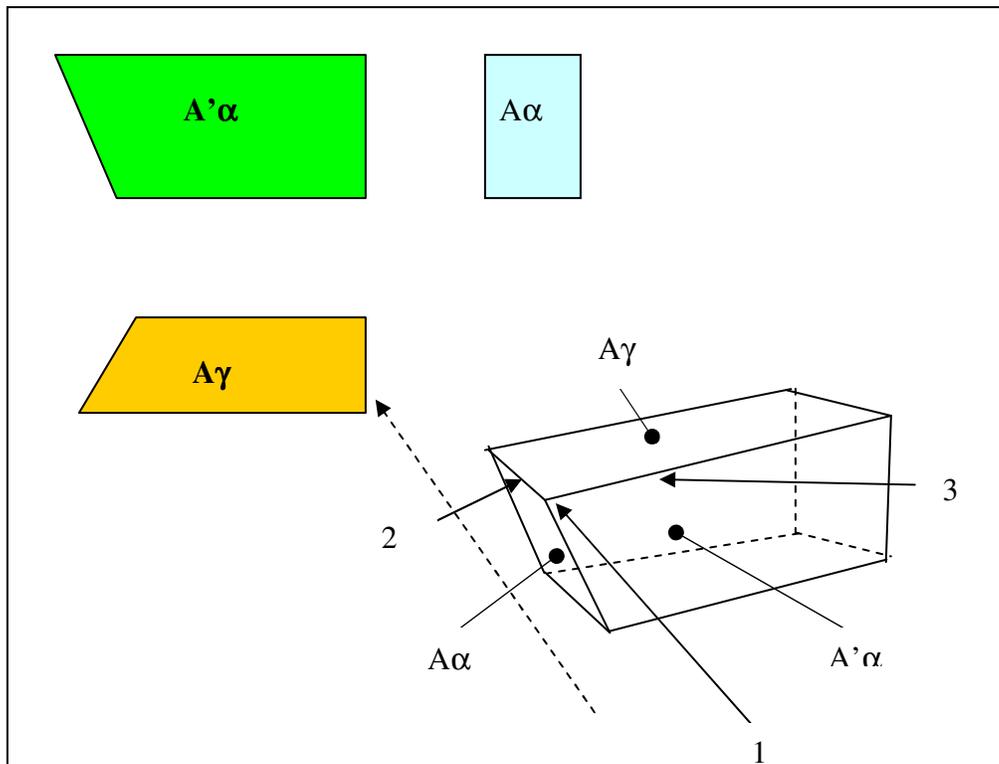


Figura 280. Geometria do inserto de corte das serras circulares

4.7.1. Rugosidade na superfície secundária de folga ($A'\alpha$).

O procedimento de medição da rugosidade dos insertos das serras circulares foi realizado para ambas as serras e os resultados estão dispostos nas seguintes Tabelas:

- Tabela 87, que mostra a rugosidade inicial dos insertos da serra circular utilizada para o corte dos corpos de prova sem mecanismo de refrigeração;
- Tabela 88 que mostra a rugosidade inicial dos insertos da serra circular utilizada para o corte dos corpos de prova com mecanismo de refrigeração;
- Tabela 89 que mostra a rugosidade final dos insertos da serra circular utilizada para o corte dos corpos de prova sem mecanismo de refrigeração;
- Tabela 90 que mostra a rugosidade final dos insertos da serra circular utilizada para o corte dos corpos de prova com mecanismo de refrigeração.

TABELA 91 – Rugosidade inicial dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte sem o mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,13	0,88
2	0,19	1,31
3	0,17	1,14
4	0,36	1,93
5	0,13	0,88
6	0,28	1,44
7	0,22	1,68
8	0,30	2,13
9	0,18	1,10
10	0,21	1,14

TABELA 92 – Rugosidade inicial dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte com o mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,35	1,87
2	0,20	1,10
3	0,26	1,44
4	0,10	0,19
5	0,32	1,92
6	0,17	0,94
7	0,22	1,17
8	0,17	0,99
9	0,24	1,19
10	0,13	0,83

TABELA 93 – Rugosidade final dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte sem mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,23	1,05
2	0,25	1,34
3	0,25	1,16
4	0,44	2,05
5	0,18	1,99
6	0,35	2,05
7	0,35	1,90
8	0,34	2,18
9	0,28	1,10
10	0,29	1,24

TABELA 94 – Rugosidade final dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte com o mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,36	1,90
2	0,21	1,11
3	0,27	1,44
4	0,12	0,21
5	0,34	1,94
6	0,19	0,96
7	0,23	1,18
8	0,18	1,01
9	0,25	1,21
10	0,14	0,83

Os dados apresentados foram analisados de modo a averiguar se a rugosidade final em versus rugosidade inicial é significante em termos estatísticos.

4.7.1.1. Rugosidade Ra.

O gráfico da Figura 281 compara os valores obtidos com as serras que usinaram os corpos de prova a seco e com o mecanismo de refrigeração.

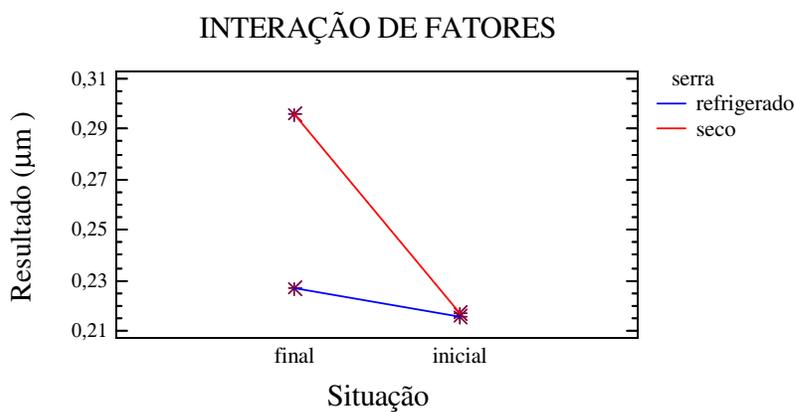


Figura 281. Rugosidade Ra – Interação de fatores. Superfície secundária de folga –A'α.

Os gráficos das Figuras 282 e 283 comparam, respectivamente, os valores médios obtidos dos experimentos realizados com o corte a seco e refrigerado.

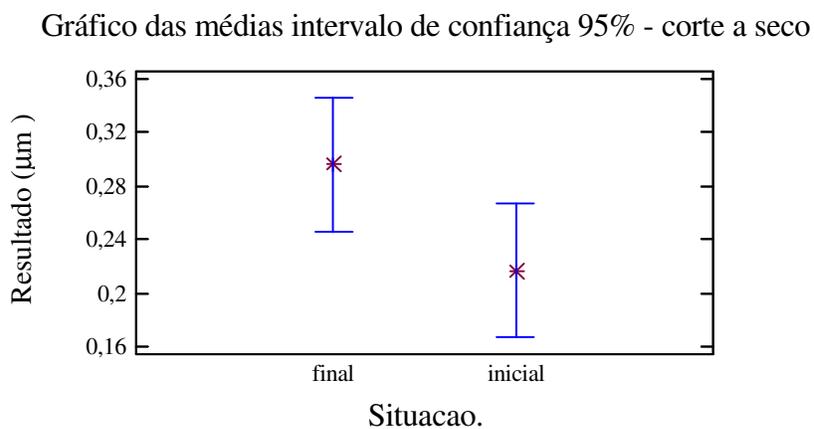


Figura 282. Rugosidade Ra – Gráfico das médias. Superfície secundária de folga –A'α - Seco.

Gráfico das médias intervalo de confiança 95% - corte refrigerado

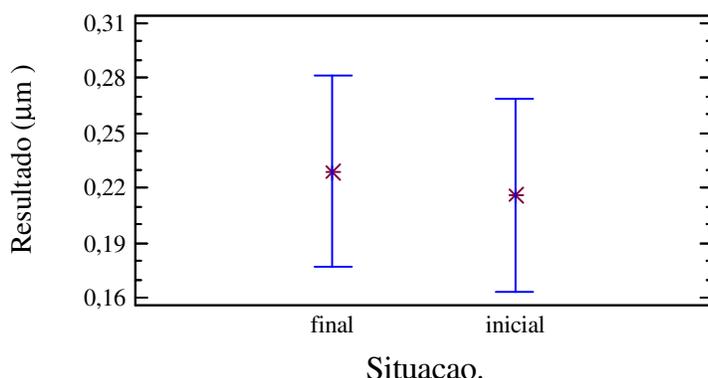


Figura 283. Rugosidade Ra – Gráfico das médias. Superfície secundária de folga–A'α Refrigerado.

A Tabela 96 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade Ra medido na superfície secundária de folga, (A'α) da serra utilizada para o corte a seco.

TABELA 96. Análise da variância Rugosidade Ra – Superfície secundária de folga A'α.

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,031205	1	0,031205	5,53	0,0303
Dentro os grupos	0,101650	18	0,005647		
Total (corrigido)	0,132855	19			

A Tabela 97 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade Ra medido na superfície secundária de folga, (A'α) da serra utilizada para o corte refrigerado.

TABELA 97. Análise da variância Rugosidade Ra – Superfície secundária de folga A'α.

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,000845	1	0,000845	0,14	0,7172
Dentro os grupos	0,112330	18	0,006240		
Total (corrigido)	0,113175	19			

Pelas Tabelas e gráficos apresentados, observa-se que a ausência do mecanismo de refrigeração torna os valores estatisticamente diferentes comparando-se, para a mesma serra, os valores de rugosidade Ra antes e depois da realização dos procedimentos de usinagem. A adoção do mecanismo de refrigeração, entretanto, tende a tornar a diferença encontrada, antes e depois da realização dos ensaios, estatisticamente semelhantes.

4.7.1.2. Rugosidade Ry.

As mesmas seqüências de análise foram feitas para o parâmetro de rugosidade Ry, e os resultados são apresentados nas Figuras 284, 285 e 286.

O gráfico da Figura 284 compara os valores obtidos com as serras que usinaram os corpos de prova a seco e com o mecanismo de refrigeração.

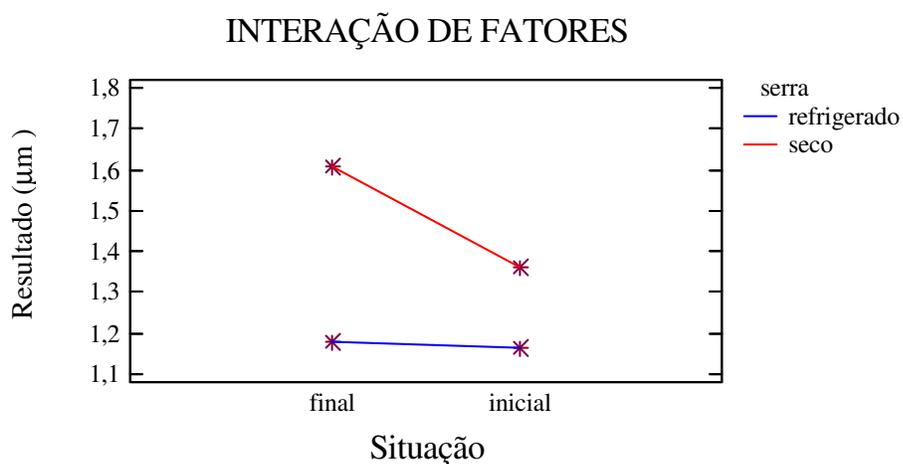


Figura 284. Rugosidade Ry – Interação de fatores. Superfície secundária de folga –A'α.

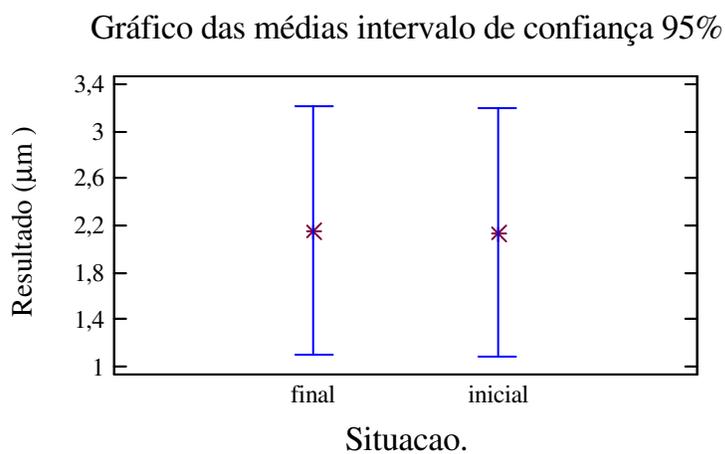


Figura 285 Rugosidade Ry - Gráfico das médias. Superfície secundária de folga –A'α - Seco.

Gráfico das médias intervalo de confiança 95%

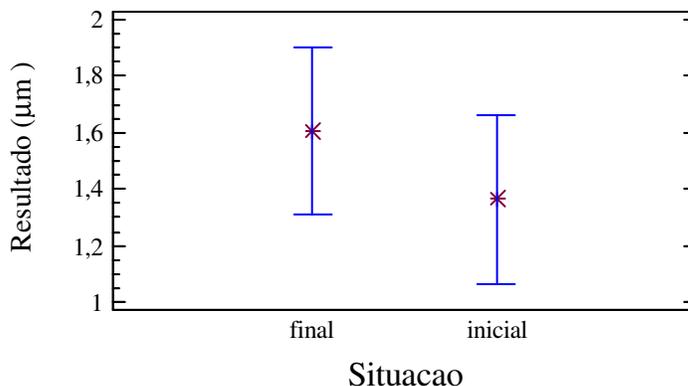


Figura 286 Rugosidade Ry – Gráfico das médias. Superfície secundária de folga –A’α - Refrigerado.

Os gráficos das Figuras 382 e 383 comparam, respectivamente, os valores médios obtidos dos experimentos realizados com o corte a seco e refrigerado.

A Tabela 98 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade Ry medido na superfície secundária de folga, (A’α) da serra utilizada para o corte sem uso de refrigeração.

TABELA 98. Análise da variância Rugosidade Ry. Superfície secundária de folga A’α.

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,295245	1	0,295245	1,48	0,2388
Dentro os grupos	3,580650	18	0,198925		
Total (corrigido)	3,875890	19			

A Tabela 99 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade Ry medido na superfície secundária de folga, (A’α) da serra utilizada para o corte refrigerado.

TABELA 99. Análise da variância Rugosidade Ry. Superfície secundária de folga A’α.

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,001125	1	0,001125	0,00	0,9478
Dentro os grupos	4,601730	18	0,255652		
Total (corrigido)	4,601730	19			

Observa-se pelos resultados apresentados que a adoção do mecanismo de refrigeração tende a manter os valores de rugosidade R_y antes e após a realização dos experimentos mais homogêneos quando comparados com a realização dos experimentos sem sua adoção. O índice “p” encontrado na Tabela 98 indica que praticamente não houve mudanças de resultados entre os valores antes e depois da realização dos ensaios para cuja serra foi adotado o mecanismo de refrigeração, assim pode ser afirmado que a adoção desse mecanismo tende a permitir maior vida útil da ferramenta de corte, quando o parâmetro avaliado seja a rugosidade R_y .

4.7.2. Rugosidade na superfície de saída ($A\gamma$).

O procedimento de medição da rugosidade dos insertos das serras circulares foi realizado para ambas as serras e os resultados estão dispostos nas seguintes Tabelas:

- Tabela 99, que mostra a rugosidade inicial dos insertos da serra circular utilizada para o corte sem mecanismo de refrigeração dos corpos de prova.

- Tabela 100, que mostra a rugosidade inicial dos insertos da serra circular utilizada para o corte com mecanismo de refrigeração dos corpos de prova.

- Tabela 101, que mostra a rugosidade final dos insertos da serra circular utilizada para o corte com mecanismo de refrigeração dos corpos de prova sem mecanismo de refrigeração dos corpos de prova.

- Tabela 102, que mostra a rugosidade final dos insertos da serra circular utilizada para o corte com mecanismo de refrigeração dos corpos de prova.

TABELA 99 – Rugosidade inicial dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte sem o mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,10	0,63
2	0,10	0,59
3	0,14	0,97
4	0,12	0,88
5	0,13	0,68
6	0,11	0,95
7	0,22	1,30
8	0,31	1,23
9	0,12	0,80
10	0,27	1,10

TABELA 100 – Rugosidade inicial dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte com o mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,47	2,42
2	0,64	3,51
3	0,96	5,26
4	0,18	1,59
5	0,11	0,75
6	0,16	1,18
7	0,12	0,78
8	0,13	1,40
9	0,08	0,58
10	0,36	3,89

TABELA 101 – Rugosidade final dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte sem o mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,15	0,66
2	0,14	0,67
3	0,20	0,99
4	0,15	0,93
5	0,15	0,75
6	0,14	0,99
7	0,26	1,40
8	0,37	1,40
9	0,15	0,89
10	0,33	1,20

TABELA 102 – Rugosidade final dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte com o mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,48	2,43
2	0,65	3,55
3	0,97	5,26
4	0,18	1,60
5	0,13	0,77
6	0,17	1,19
7	0,13	0,80
8	0,14	1,41
9	0,09	0,60
10	0,37	3,90

Foram feitas as mesmas análises realizadas para a avaliação da superfície secundária de corte ($A'\alpha$).

4.7.2.1. Rugosidade Ra.

A Figura 287 mostra a interação entre os fatores situação e serra.

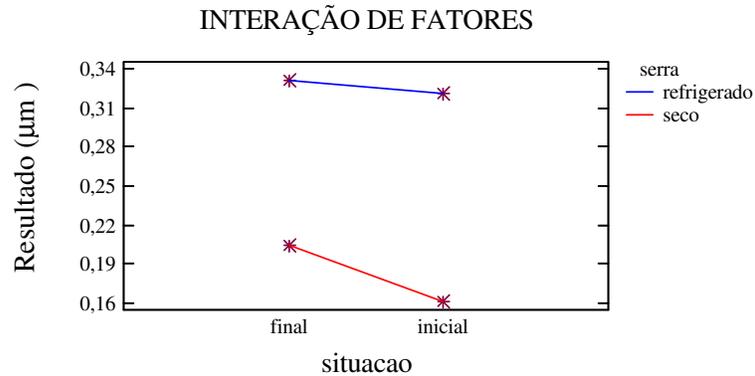


Figura 287. Rugosidade Ra – Interação de fatores. Superfície de saída A γ .

Os gráficos das Figuras 288 e 289 comparam, respectivamente, os valores médios obtidos dos experimentos realizados com o corte a seco e refrigerado.

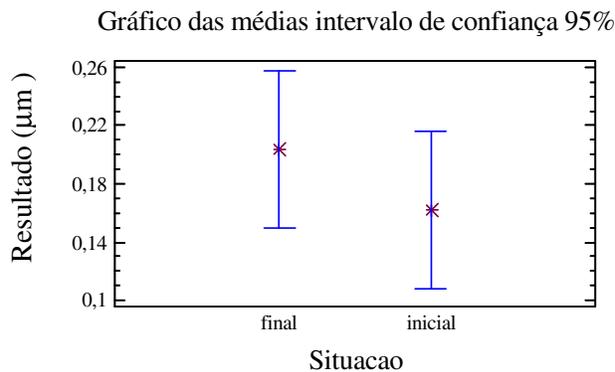


Figura 288. Rugosidade Ra- Gráfico das médias. Superfície de saída A γ - Seco.

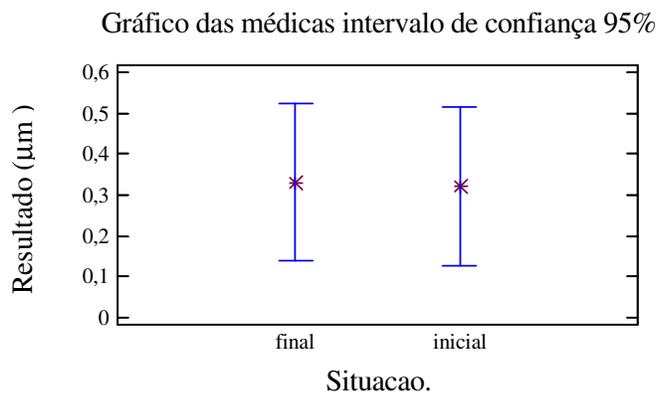


Figura 289. Rugosidade Ra – Gráfico das médias. Superfície de saída A γ - Refrigerado.

A Tabela 103 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade Ra medido na superfície secundária de folga, ($A\gamma$) da serra utilizada para o corte a seco.

TABELA 103. Análise da variância Rugosidade Ra. Superfície de saída $A\gamma$.

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,00882	1	0,00882	1,34	0,2628
Dentro os grupos	0,11880	18	0,00660		
Total (corrigido)	0,12762	19			

A Tabela 104 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade Ra medido na superfície secundária de folga, ($A\gamma$) da serra utilizada para o corte refrigerado.

TABELA 104. Análise da variância Rugosidade Ra. Superfície de saída $A\gamma$.

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,00050	1	0,000500	0,01	0,9395
Dentro os grupos	1,51698	18	0,084276		
Total (corrigido)	1,51748	19			

Os resultados indicam que há maior homogeneidade dos resultados antes e depois dos procedimentos de usinagem para aqueles cujo mecanismo de refrigeração foi adotado. Observa-se da Tabela 104 (corte refrigerado) que o valor de p foi 0,9395, em contraste com o valor obtido da Tabela 103 (corte a seco), cujo valor foi 0,2628.

A adoção do mecanismo de refrigeração tende a manter os mesmos valores de rugosidade Ra sobre a superfície de saída mais estável em função do tempo e uso da ferramenta.

4.7.2.2. Rugosidade R_y .

A Figura 290 apresenta a interação entre os fatores situação e serra. O resultado apresentado refere-se ao parâmetro R_y .

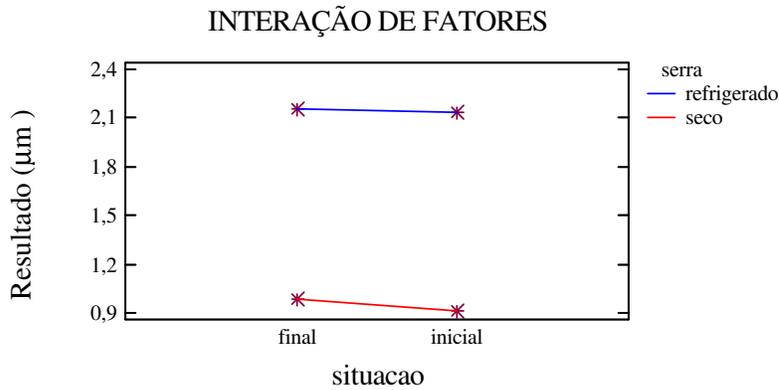


Figura 290. Rugosidade Ry – Interação de fatores. Superfície de saída Aγ.

Os gráficos das Figuras 291 e 292 comparam, respectivamente, os valores médios obtidos dos experimentos realizados com o corte a seco e refrigerado.

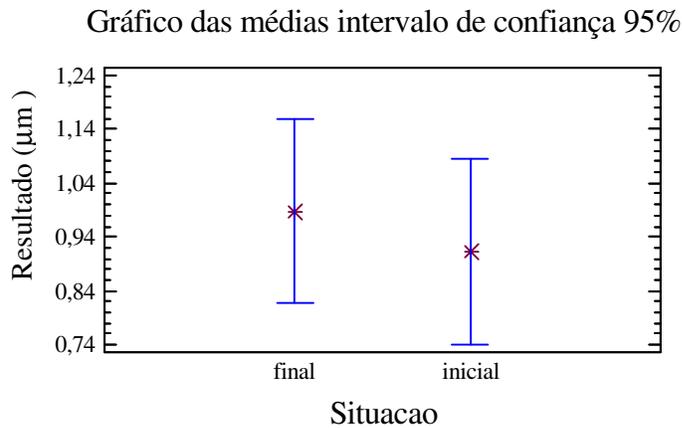


Figura 291 - Rugosidade Ry – Gráfico das médias. Superfície de saída Aγ - Seco.

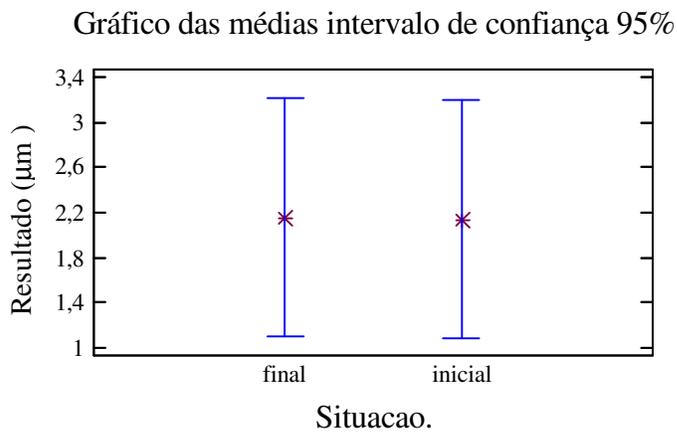


Figura 292 - Rugosidade Ry –Gráfico das médias. Superfície de saída Aγ - Refrigerado.

A Tabela 105 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade R_y medido na superfície secundária de folga, (A_γ) da serra utilizada para o corte a seco.

TABELA 105. Análise da variância Rugosidade R_y . Superfície de saída A_γ .

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,028125	1	0,028125	0,42	0,5251
Dentro os grupos	1,205170	18	0,066953		
Total (corrigido)	0,12762	19			

A Tabela 106 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade R_y medido na superfície secundária de folga, (A_γ) da serra utilizada para o corte refrigerado.

TABELA 106. Análise da variância Rugosidade R_y . Superfície de saída A_γ .

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,001125	1	0,001125	0,00	0,9834
Dentro os grupos	45,41310	18	2,522950		
Total (corrigido)	45,41430	19			

Os efeitos do mecanismo de refrigeração são menores quando o parâmetro mensurado é a padrão de rugosidade R_y e a superfície avaliada é a superfície de saída segundo a quantidade de ensaios realizados. Entretanto, ainda a adoção do dióxido de carbono tende a manter mais estável os valores mensurados para a dita superfície.

Em geral pode ser apresentado o seguinte panorama, antes e depois dos procedimentos de usinagem retratado na Tabela 107.

TABELA 107 Análise da variância Rugosidade R_y . Superfície de saída A_γ .

Superfície	Padrão de rugosidade	Mecanismo de refrigeração	Valor de p
$A'\alpha$	Ra	Sim	0,7172
$A'\alpha$	R_y	Sim	0,9478
A_γ	Ra	Sim	0,9395
A_γ	R_y	Sim	0,9834
$A'\alpha$	Ra	Não	0,0303
$A'\alpha$	R_y	Não	0,2388
A_γ	Ra	Não	0,2628
A_γ	R_y	Não	0,5251

4.7.3. Formação da película de material processado.

A Figura 293 mostra a formação da película de material processado na superfície secundária de folga $A'\alpha$ depois que a serra circular cortou 18 corpos de prova sem a adoção do mecanismo de refrigeração baseado no dióxido de carbono.

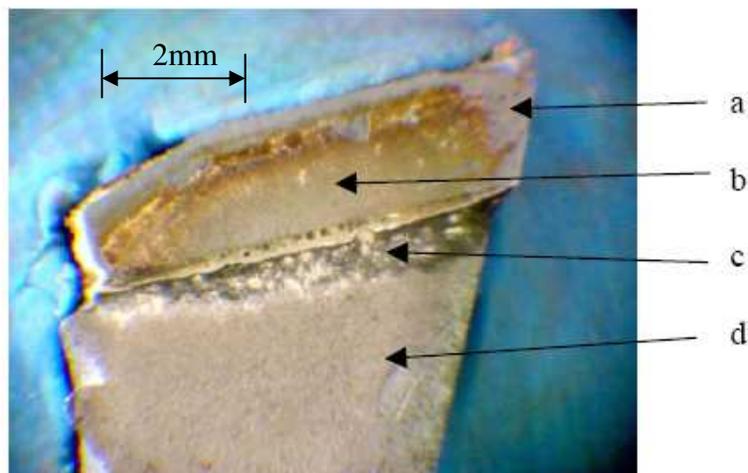


Figura 293. Inserto de corte com vista da superfície secundária de folga $A'\alpha$. a-) Inserto em metal duro; b-) película de material processado; c-) solda para união entre o inserto e corpo do disco; d-) corpo da serra circular em aço.

A Figura 294 mostra que, diferentemente do inserto mostrado na Figura 293 não ocorreu a formação da película de material processado na superfície secundária de folga $A'\alpha$ depois que a serra circular cortou 18 corpos de prova com a adoção do mecanismo de refrigeração baseado no dióxido de carbono.

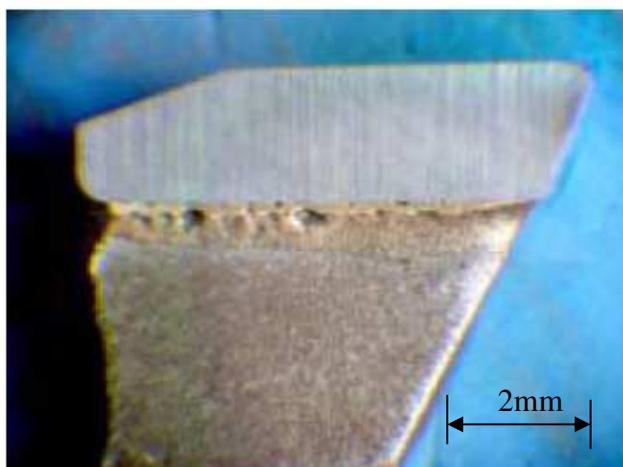


Figura 294. Inserto de corte com vista da superfície secundária de folga $A'\alpha$ sem apresentar a formação da película de material processado.

A Figura 295 mostra a formação da película de material processado superfície de saída $A\gamma$ depois que a serra circular cortou 18 corpos de prova sem a adoção do mecanismo de refrigeração baseado no dióxido de carbono. O detalhe na Figura indica que principiou a combustão dos resíduos constituintes da película de material processado

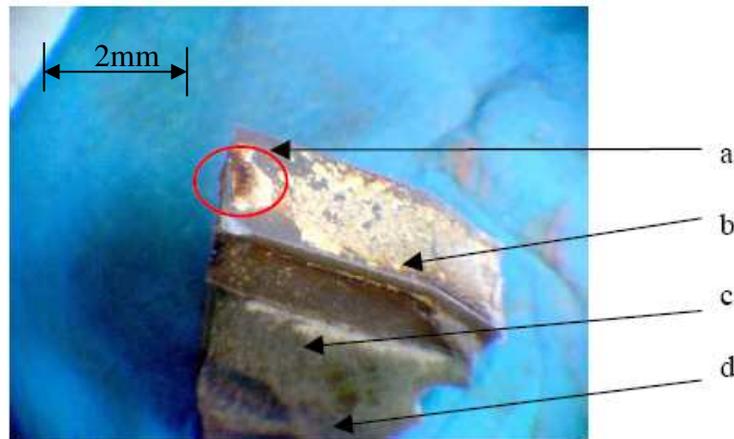


Figura 295. Inserto de corte com vista da superfície saída $A\gamma$. a-) Inserto em metal duro; b-) película de material processado; c-) solda para união entre o inserto e corpo do disco; d-) corpo da serra circular em aço.

A Figura 296 mostra a formação da película de material processado superfície de saída $A\gamma$ depois que a serra circular cortou 18 corpos de prova sem a adoção do mecanismo de refrigeração baseado no dióxido de carbono. Nota-se que a formação é reduzida quando em comparação com o inserto da serra utilizada para os procedimentos de usinagem sem o mecanismo de refrigeração. O detalhe na Figura indica que principiou a combustão dos resíduos constituintes da película de material processado.

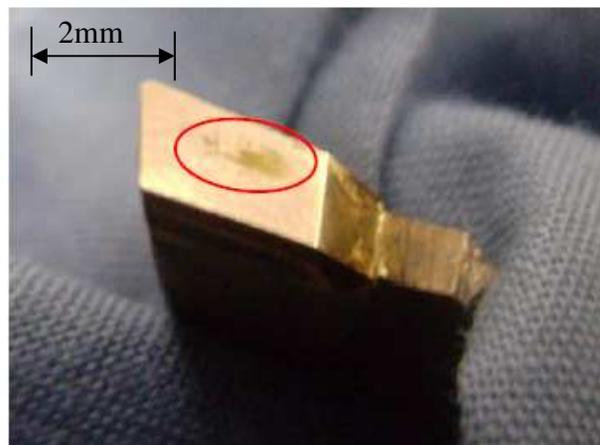


Figura 296. Inserto de corte com vista da superfície saída $A\gamma$.

Em face das figuras apresentadas, nota-se que a adoção do dióxido de carbono aplicado em forma de névoa reduz o fenômeno de formação da película residual de material processado sobre as superfícies da ferramenta. Essa redução tem, como consequência, maior vida útil da ferramenta e, portanto, melhor resultado sobre a superfície do material processado, quer seja a madeira ou materiais dela derivados como o MDF estudado nessa pesquisa.

Assim, o efeito da redução da temperatura, proveniente da aplicação do dióxido de carbono em forma de névoa, influencia na redução da formação da película residual de material processado sobre as superfícies dos insertos da ferramenta de corte.

4.7.4. Vida útil da ferramenta.

Com base nos resultados da rugosidade dos insertos foram feitos ensaios adicionais com vistas a quantificar a vida útil da ferramenta de corte. Para fins dessa análise a rugosidade foi medida a cada 10 corpos de prova cortados. Foram cortados corpos de prova com vazão no nível “3” (máxima) e nível “4” (ausência). Para esse experimento foram cortados 200 corpos de prova, resultando assim em 20 tomadas de medidas de rugosidade dos insertos. O parâmetro adotado foi o R_y e o inserto avaliado foi o inserto o identificado pelo algarismo 10.

Entende-se que com o corte dos materiais a rugosidade superficial dos insertos de corte tende a aumentar até um patamar inaceitável, que significa o momento da troca da ferramenta por outra.

A Figura 297 mostra o comportamento da rugosidade em função do material cortado com o mecanismo de refrigeração no maior nível.

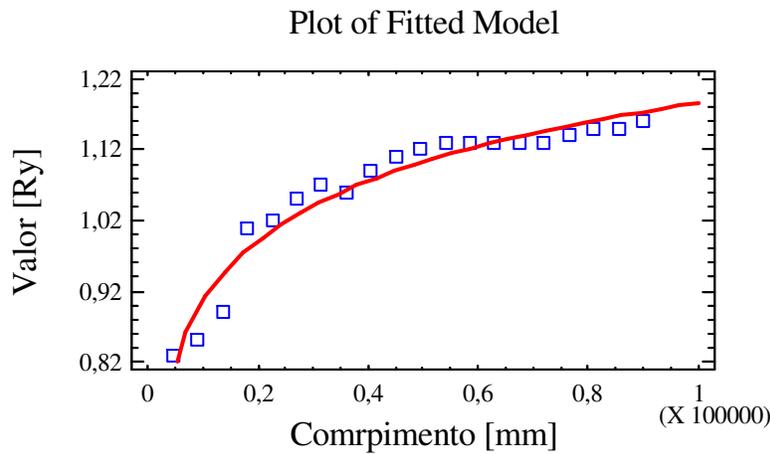


Figura 297. Rugosidade Ry em função do material processado com o mecanismo de refrigeração.

A função que rege o desgaste apresentado pela Figura é $\text{Valor} = 0,811 + 0,120x \ln(\text{Comprimento})$, o coeficiente de correlação é 0,973 e o R^2 é igual a 94,82%.

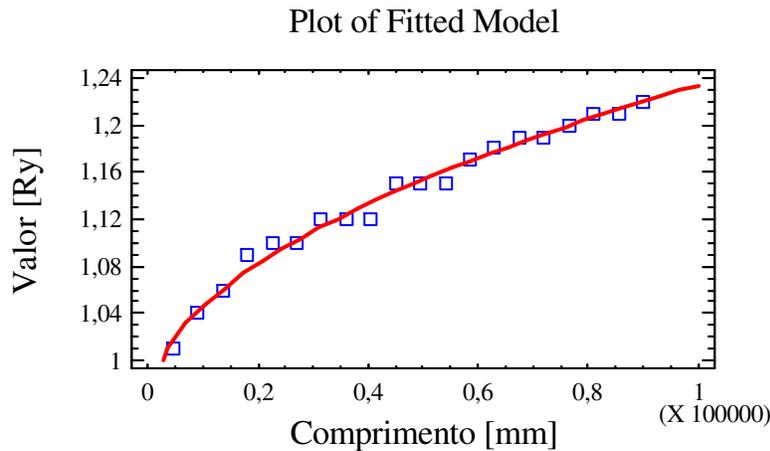


Figura 298. Rugosidade Ry em função do material processado sem mecanismo de refrigeração.

A Figura 298 mostra o comportamento da rugosidade em função do material cortado sem o mecanismo de refrigeração.

A função que rege o desgaste apresentado pela Figura é $\text{Valor} = 0,960 + 0,0008 x \sqrt{(\text{Comprimento})}$, o coeficiente de correlação é 0,993 e o R^2 é igual a 98,72%.

4.8. Resultados relacionados com a ferramenta de corte – Fresa.

Igualmente às serras circulares, foram adotadas duas fresas para a realização dos experimentos. Todas as considerações presentes no item 4.7 aplicaram-se para a avaliação das fresas perfiladas, exceto a quantidade de insertos avaliados que foram cinco para cada fresa perfilada.

A Figura 299 identifica as principais características geométricas dos insertos das fresas perfiladas, em azul há a vista de elevação do inserto, onde se tem a superfície principal de corte, $A\alpha$; a Figura em verde é a vista lateral esquerda, onde se tem a superfície secundária de corte $A'\alpha$; a Figura em laranja é a vista de planta, onde se tem a superfície de saída $A\gamma$. A indicação feita pelo algarismo 1 mostra a ponta de corte; o algarismo 2 indica a aresta principal de corte; o algarismo 3 indica a aresta secundária de corte e a seta tracejada indica a direção de avanço.

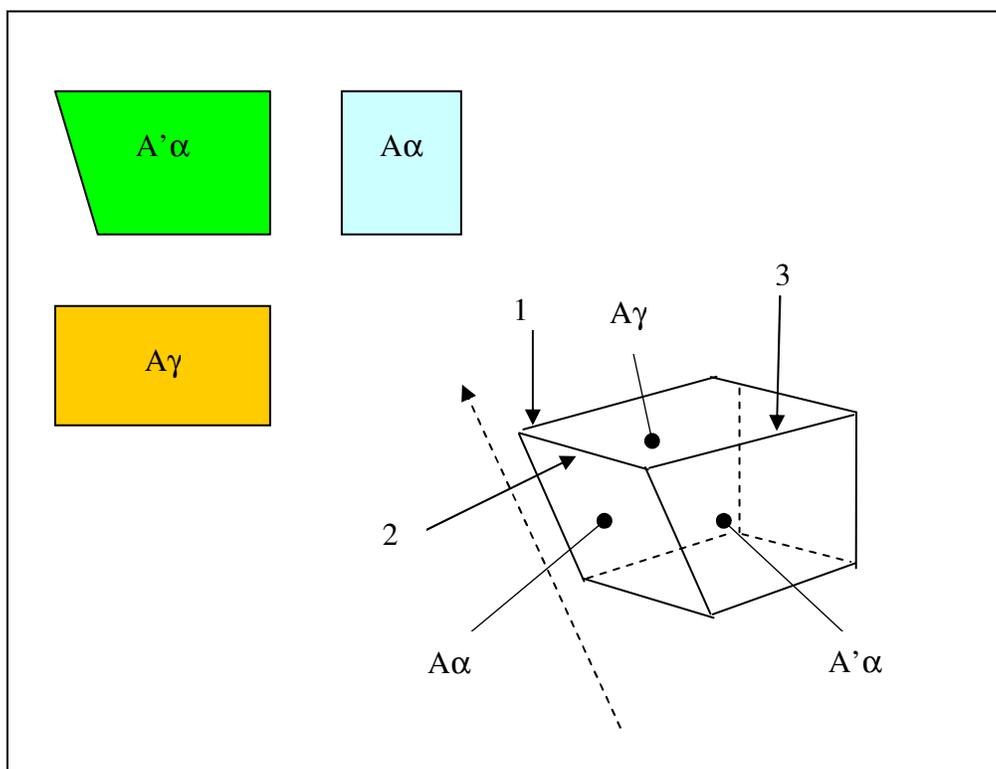


Figura 299. Geometria do inserto de corte das serras circulares

4.8.1. Rugosidade na superfície secundária de folga ($A'\alpha$).

O procedimento de medição da rugosidade dos insertos das serras circulares foi realizado para ambas as serras e os resultados estão dispostos nas seguintes Tabelas:

- Tabela 107 que mostra a rugosidade inicial dos insertos da serra circular utilizada para o corte dos corpos de prova sem mecanismo de refrigeração;
- Tabela 108 que mostra a rugosidade inicial dos insertos da serra circular utilizada para o corte dos corpos de prova com mecanismo de refrigeração;
- Tabela 109 que mostra a rugosidade final dos insertos da serra circular utilizada para o corte dos corpos de prova sem mecanismo de refrigeração;
- Tabela 110 que mostra a rugosidade final dos insertos da serra circular utilizada para o corte dos corpos de prova com mecanismo de refrigeração.

TABELA 107 – Rugosidade inicial dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte sem o mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,20	0,75
2	0,21	0,63
3	0,15	0,56
4	0,15	0,57
5	0,17	0,61

TABELA 108 – Rugosidade inicial dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte com o mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,16	0,54
2	0,17	0,55
3	0,18	0,65
4	0,15	0,62
5	0,18	0,72

TABELA 109 – Rugosidade final dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte sem mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,23	0,81
2	0,25	0,79
3	0,21	0,61
4	0,19	0,62
5	0,23	0,72

TABELA 110 – Rugosidade final dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte com o mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,17	0,56
2	0,19	0,57
3	0,19	0,68
4	0,17	0,65
5	0,19	0,73

Os dados apresentados foram analisados de modo a averiguar se a rugosidade final em versus rugosidade inicial é significativa em termos estatísticos.

4.8.1.1. Rugosidade Ra.

O gráfico da Figura 300 compara os valores obtidos com as serras que usinaram os corpos de prova a seco e com o mecanismo de refrigeração.

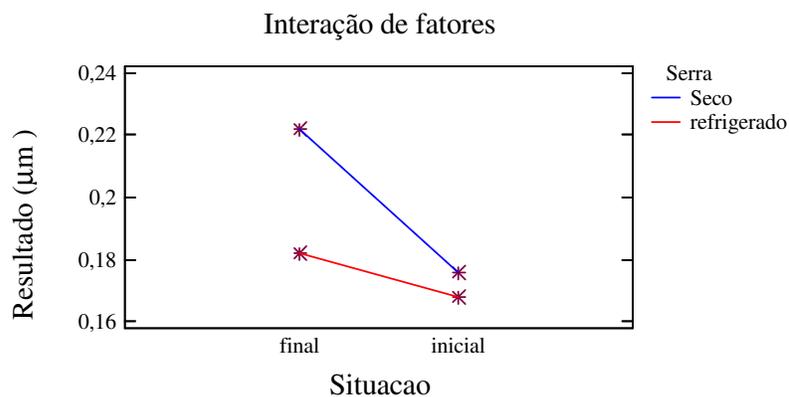


Figura 300. Rugosidade Ra – Interação de fatores. Superfície secundária de folga –A'α.

Os gráficos das Figuras 301 e 302 comparam, respectivamente, os valores médios obtidos dos experimentos realizados com o corte a seco e refrigerado.

Gráfico das médias - Intervalo de confiança 95%. corte a seco

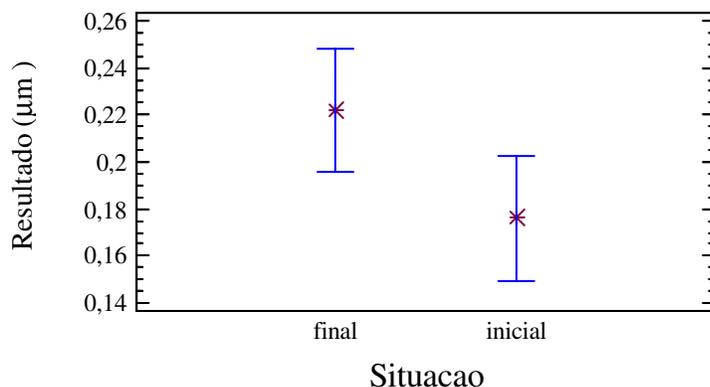


Figura 301. Rugosidade Ra – Gráfico das médias. Superfície secundária de folga –A'α - Seco

Gráfico das médias - Intervalo de confiança de 95%. Corte refrigerado

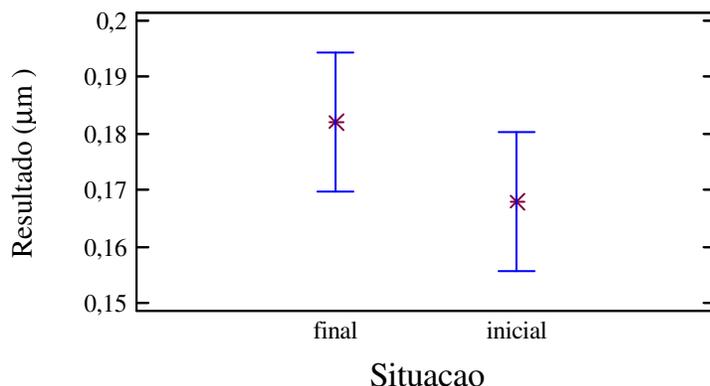


Figura 302. Rugosidade Ra – Gráfico das médias. Superfície secundária de folga – A'α - Refrigerado.

A Tabela 111 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade Ra medido na superfície secundária de folga, (A'α) da serra utilizada para o corte sem uso de refrigeração.

TABELA 111. Análise da variância Rugosidade Ra – Superfície secundária de folga A'α.

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,0045	1	0,0045	7,70	0,0125
Dentro os grupos	0,0105	18	0,0005		
Total (corrigido)	0,01502	19			

A Tabela 112 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade R_a medido na superfície secundária de folga, ($A'\alpha$) da serra utilizada para o corte refrigerado.

TABELA 112. Análise da variância Rugosidade R_a – Superfície secundária de folga $A'\alpha$.

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,00490	1	0,00490	3,38	0,1033
Dentro os grupos	0,00116	8	0,000145		
Total (corrigido)	0,00165	9			

Por comparação entre os valores dados nas Tabelas 111 e 112, juntamente com a análise dos gráficos apresentados, percebeu-se que a adoção do mecanismo de refrigeração significou menor desgaste da fresa cujo corte foi realizado com a adoção desse mecanismo.

4.8.1.2 Rugosidade R_y .

Foram feitas as mesmas análises descritas no item 4.8.1.1.

O gráfico da Figura 303 compara os valores obtidos com as serras que usinaram os corpos de prova a seco e com o mecanismo de refrigeração.

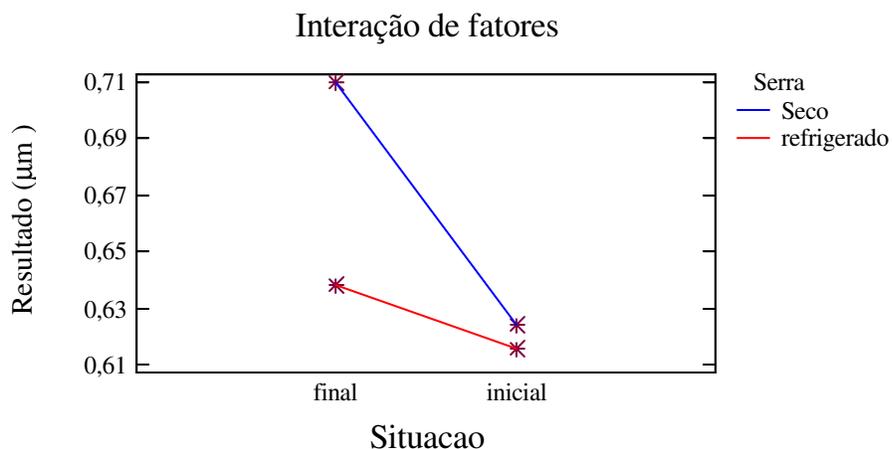


Figura 303. Rugosidade R_y – Interação de fatores. Superfície secundária de folga – $A'\alpha$.

Os gráficos das Figuras 304 e 305 comparam, respectivamente, os valores médios obtidos dos experimentos realizados com o corte a seco e refrigerado.

Gráfico das médias - Intrevalo de confiança 95%. Corte a seco

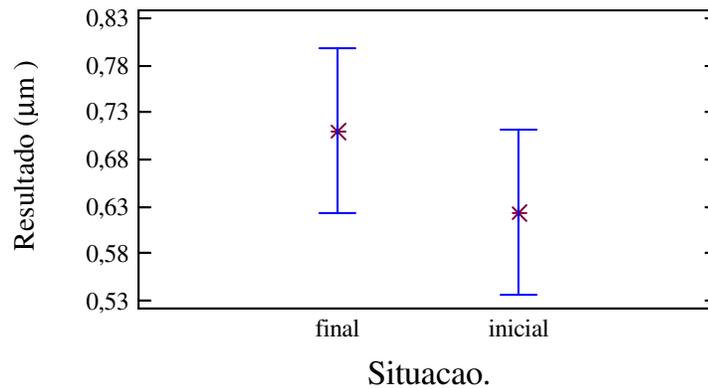


Figura 304. Rugosidade Ry – Gráfico das médias. Superfície secundária de folga –A’α – Seco

Gráfico das médias - Intervalo de confiança 95%. Corte refrigerado

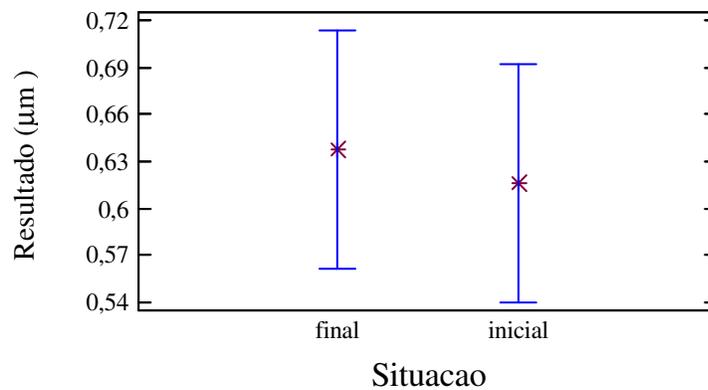


Figura 305. Rugosidade Ry –Gráfico das médias. Superfície secundária de folga –A’α - Refrigerado.

A Tabela 113 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade Ry medido na superfície secundária de folga, (A’α) da serra utilizada para o corte a seco.

TABELA 113. Análise da variância Rugosidade Ry. Superfície secundária de folga A’α.

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,01849	1	0,01849	2,56	0,1481
Dentro os grupos	0,05772	8	0,007215		
Total (corrigido)	0,07621	9			

A Tabela 114 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade R_y medido na superfície secundária de folga, ($A'\alpha$) da serra utilizada para o corte refrigerado.

TABELA 114. Análise da variância Rugosidade R_y . Superfície secundária de folga $A'\alpha$.

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,00121	1	0,00121	0,22	0,6486
Dentro os grupos	0,04320	8	0,00540		
Total (corrigido)	0,04441	9			

Notou-se que em termos estatísticos não houve diferenças entre os valores obtidos entre a serra que cortou a seco com aquela que cortou com o mecanismo de refrigeração. Entretanto, os valores apresentados ferramenta que cortou a seco mostrou-se mais próximo ao considerado estatisticamente significativo. ($p=0,05$).

4.8.2. Rugosidade na superfície de saída ($A\gamma$).

O mesmo procedimento adotado no item 4.8.1 foi aplicado para a avaliação da superfície de saída - $A\gamma$. Os resultados foram dispostos nas Tabelas 115, 116, 117 e 118.

- Tabela 115, que mostra a rugosidade inicial dos insertos da serra circular utilizada para o corte sem mecanismo de refrigeração dos corpos de prova.

- Tabela 116, que mostra a rugosidade inicial dos insertos da serra circular utilizada para o corte com mecanismo de refrigeração dos corpos de prova.

- Tabela 117, que mostra a rugosidade final dos insertos da serra circular utilizada para o corte com mecanismo de refrigeração dos corpos de prova sem mecanismo de refrigeração dos corpos de prova.

- Tabela 118, que mostra a rugosidade final dos insertos da serra circular utilizada para o corte com mecanismo de refrigeração dos corpos de prova.

TABELA 115 – Rugosidade inicial dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte sem o mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,21	0,73
2	0,21	0,72
3	0,22	0,70
4	0,18	0,66
5	0,19	0,65

TABELA 116 – Rugosidade inicial dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte com o mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,19	0,54
2	0,20	0,55
3	0,20	0,65
4	0,18	0,62
5	0,18	0,72

TABELA 117 – Rugosidade final dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte sem o mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,25	0,77
2	0,24	0,73
3	0,23	0,72
4	0,22	0,70
5	0,21	0,67

TABELA 118 – Rugosidade final dos insertos da ferramenta de corte serra circular utilizada para o corte com o mecanismo de refrigeração.

Inserto avaliado	Ra (μm)	Ry (μm)
1	0,21	0,55
2	0,22	0,55
3	0,21	0,66
4	0,19	0,63
5	0,18	0,73

Foram feitas as mesmas análises realizadas para a avaliação da superfície secundária de corte ($A'\alpha$).

4.8.2.1. Rugosidade Ra.

A Figura 306 mostra a interação entre os fatores situação e serra.

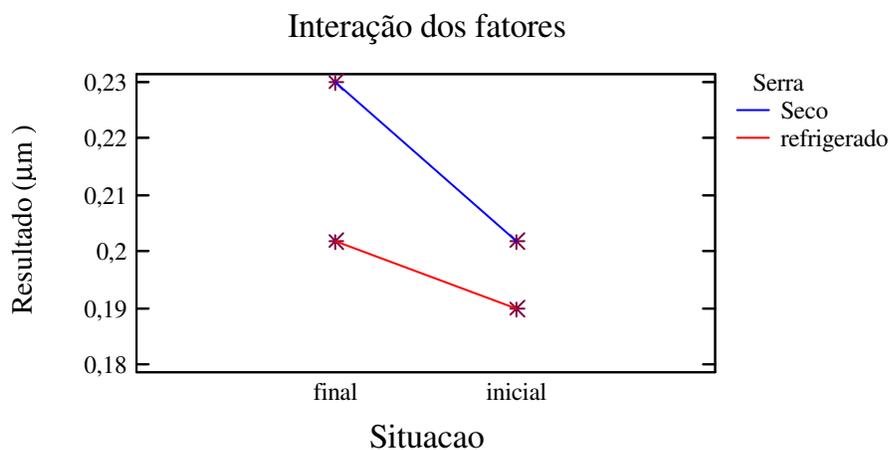


Figura 306. Rugosidade Ra – Interação de fatores. Superfície de saída $A\gamma$.

Os gráficos das Figuras 307 e 308 comparam, respectivamente, os valores médios obtidos dos experimentos realizados com o corte a seco e refrigerado.

Gráfico das médias - Intervalo de confiança de 95%. Corte a seco

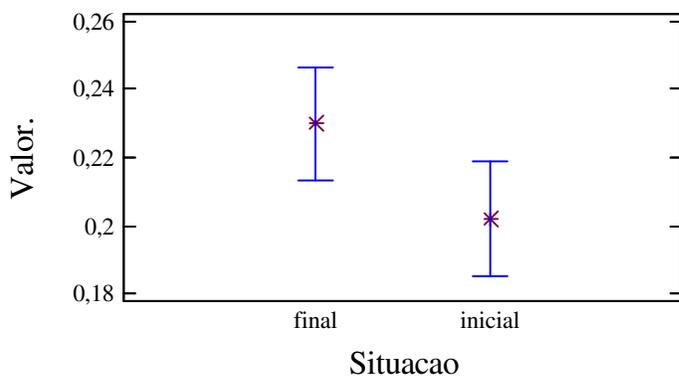


Figura 307. Rugosidade Ra – Gráfico das médias. Superfície de saída $A\gamma$ - Seco.

Gráfico das médias - Intervalo de confiança 95%. Corte refrigerado

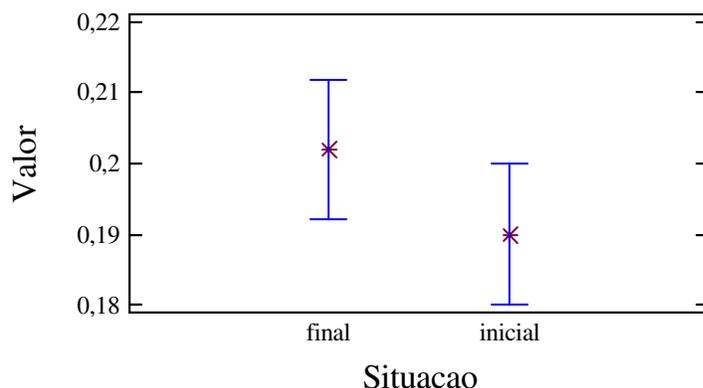


Figura 308. Rugosidade Ra – Gráfico das médias. Superfície de saída A γ - Refrigerado.

A Tabela 119 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade Ra medido na superfície secundária de folga, (A γ) da serra utilizada para o corte a seco.

TABELA 119. Análise da variância Rugosidade Ra. Superfície de saída A γ .

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,00196	1	0,00196	7,54	0,0252
Dentro os grupos	0,00208	8	0,00026		
Total (corrigido)	0,00404	9			

A Tabela 120 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade Ra medido na superfície secundária de folga, (A γ) da serra utilizada para o corte refrigerado.

TABELA 120. Análise da variância Rugosidade Ra. Superfície de saída A γ .

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,00036	1	0,00036	1,95	0,2005
Dentro os grupos	0,00148	8	0,00018		
Total (corrigido)	0,00184	9			

Semelhante a outras análises os resultados apresentados mostram que quando o dióxido de carbono é utilizado há menor desgaste da ferramenta de corte.

4.8.2.2. Rugosidade Ry.

A Figura 309 apresenta a interação entre os fatores situação e serra. O resultado apresentado refere-se ao parâmetro Ry.

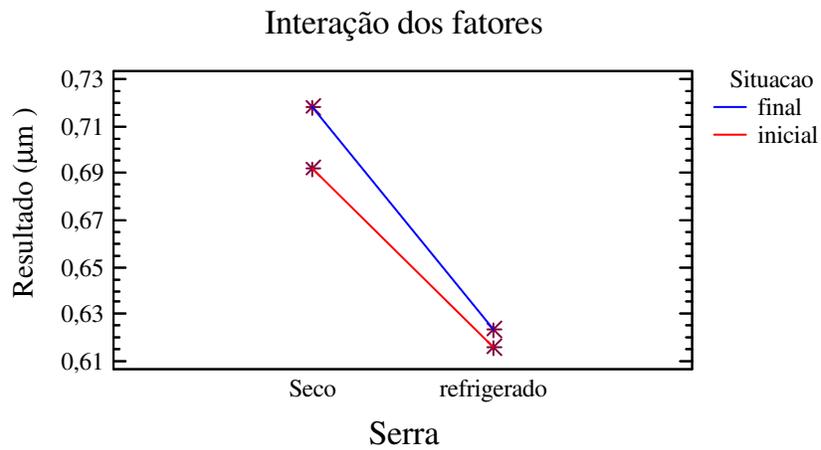


Figura 309. Rugosidade R_y – Interação de fatores. Superfície de saída $A\gamma$.

Os gráficos das Figuras 310 e 311 comparam, respectivamente, os valores médios obtidos dos experimentos realizados com o corte a seco e refrigerado.

Gráfico das médias - Intervalo de confiança 95%. Corte a seco

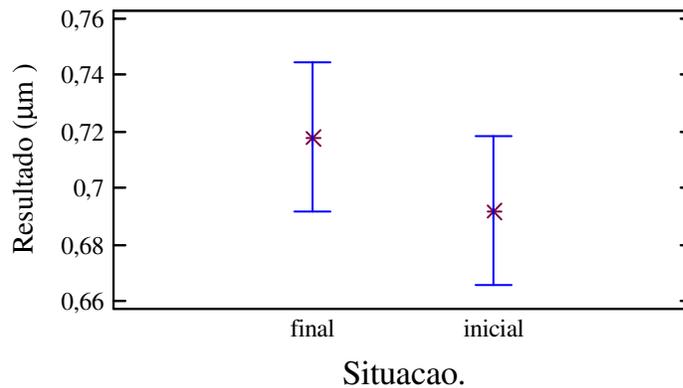


Figura 310. Rugosidade R_y – Gráfico das médias. Superfície de saída $A\gamma$ - Seco.

Gráfico das médias - Intervalo de confiança 95%. Corte refrigerado

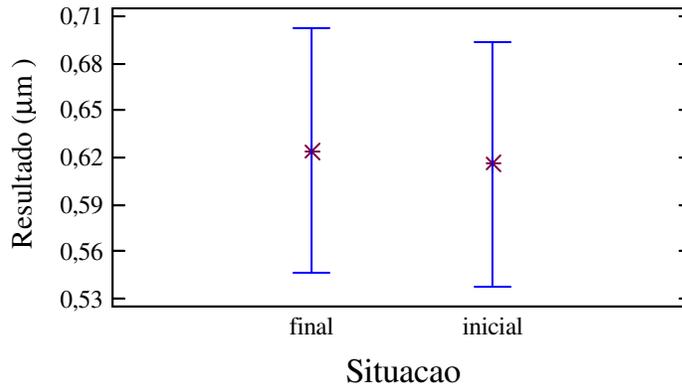


Figura 311. Rugosidade Ry – Gráfico das médias. Superfície de saída A γ - Refrigerado.

A Tabela 120 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade Ry medido na superfície secundária de folga, (A γ) da serra utilizada para o corte a seco.

TABELA 120. Análise da variância Rugosidade Ry. Superfície de saída A γ .

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,00169	1	0,00169	1,28	0,2906
Dentro os grupos	0,10560	8	0,00132		
Total (corrigido)	0,01225	9			

A Tabela 121 mostra a análise da variância referente ao parâmetro de rugosidade Ry medido na superfície secundária de folga, (A γ) da serra utilizada para o corte refrigerado.

TABELA 121. Análise da variância Rugosidade Ry. Superfície de saída A γ .

Fonte	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	Razão F	Valor de P
Entre os grupos	0,00016	1	0,00016	0,03	0,8712
Dentro os grupos	0,04564	8	0,00570		
Total (corrigido)	0,04580	9			

Em geral pode ser apresentado o seguinte panorama, antes e depois dos procedimentos de usinagem retratado na Tabela 122.

TABELA 122. Resumo dos valores de p obtidos para as superfícies avaliadas.

Superfície	Padrão de rugosidade	Mecanismo de refrigeração	Valor de p
A'α	Ra	Sim	0,1033
A'α	Ry	Sim	0,6486
Aγ	Ra	Sim	0,2005
Aγ	Ry	Sim	0,8712
A'α	Ra	Não	0,0125
A'α	Ry	Não	0,1481
Aγ	Ra	Não	0,0252
Aγ	Ry	Não	0,2906

4.8.3. Formação da película de material processado.

A Figura 312 mostra a formação da película de material processado superfície de saída Aγ depois que a fresa perfilada cortou 18 corpos de prova sem a adoção do mecanismo de refrigeração baseado no dióxido de carbono.

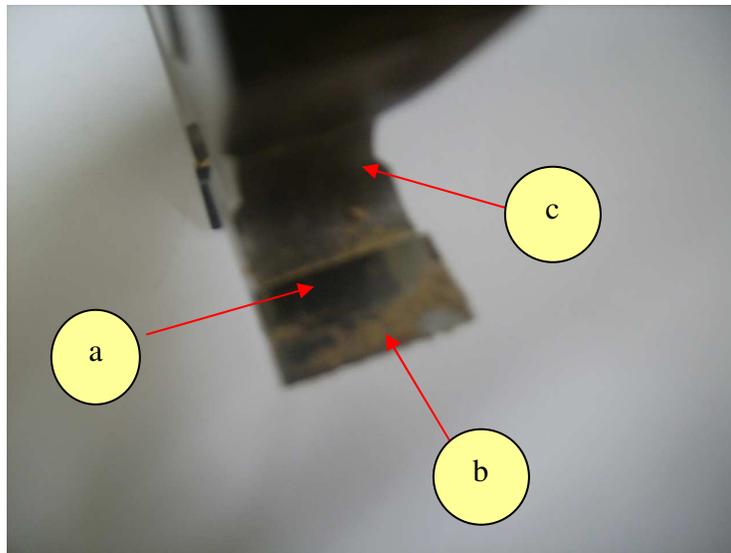


Figura 312. Inserto de corte com vista da superfície saída Aγ. a-) Inserto em metal duro; b-) película de material processado; c-) corpo da serra circular em aço.

A Figura 313 mostra a formação da película de material processado na superfície de saída $A\gamma$ depois que a fresa cortou 18 corpos de prova com a adoção do mecanismo de refrigeração baseado no dióxido de carbono. Nota-se que a formação é reduzida quando em comparação com o inserto da serra utilizada para os procedimentos de usinagem sem o mecanismo de refrigeração.



Figura 313. Inserto de corte com vista da superfície saída $A\gamma$ sem apresentar a formação da película de material processado.

4.8.4. Vida útil da ferramenta.

Para a avaliação da vida útil da ferramenta de corte, adotou-se o procedimento tomado para as serras circulares, descrito no item 4.7.4

A Figura 314 mostra o comportamento da rugosidade em função do material cortado sem o mecanismo de refrigeração. Assim, tem-se a vida útil da ferramenta, avaliada pela rugosidade dos insertos de corte em que a função dependente é o comprimento de material processado.

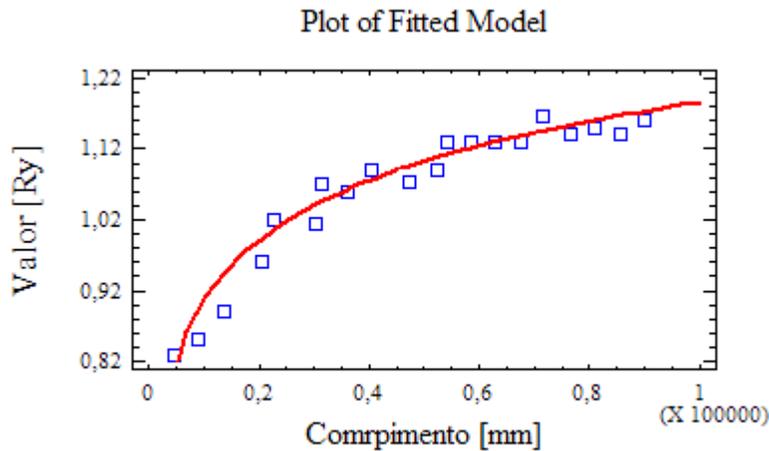


Figura 314. Gráfico de vida útil para o corte refrigerado – Superfície de saída A_γ.

A função que rege o desgaste apresentado pela Figura é “valor = -0,098 + 0,099 x ln(Comprimento)”. O coeficiente de correlação apresentado foi de 0,922 e o R² 90,01%

A Figura 315 mostra o comportamento da rugosidade em função do material cortado com o mecanismo de refrigeração. Assim, tem-se a vida útil da ferramenta, avaliada pela rugosidade dos inserts de corte em que a função dependente é o comprimento de material processado.

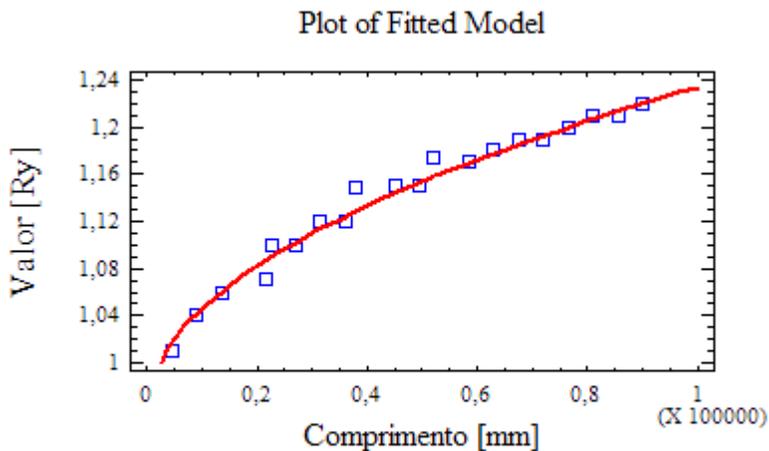


Figura 315. Gráfico de vida útil para o corte a seco – Superfície de saída A_γ

A função que rege o desgaste apresentado pela Figura é “valor = 0,811 + 0,021 x √(Comprimento)”. O coeficiente de correlação é 0,913 e o R² igual a 89,93%.

5. CONCLUSÕES.

Com base nos resultados apresentados, contidos nessa tese, pode-se concluir o que segue:

5.1. Resultados relacionados com a temperatura.

A adoção do mecanismo de refrigeração implicou em menor temperatura durante a execução dos procedimentos de usinagem para os três materiais estudados e para ambas operações propostas nesta tese. A condição de vazão que, de forma geral, apresentou os melhores resultados foi a do nível “3”, ou seja, o maior nível proposto para os experimentos, cujo valor foi de 45g/min. A direção que apresentou os melhores resultados foi no mesmo sentido de avanço da ferramenta de corte, cuja codificação nos experimentos foi “1”. Desse modo, as condições [n, 3, 1], (n é o valor da velocidade de corte) permitiram alcançar os melhores resultados pertinentes à temperatura.

5.2. Resultados relacionados com a rugosidade.

Em relação ao parâmetro rugosidade, os melhores resultados foram:

Eucalipto – operação de serramento circular. Rugosidade Ra.

Os melhores resultados foram obtidos com a vazão ao nível “2”, quando a velocidade de corte estava ao nível “1” (menor). Com o aumento da velocidade de corte os melhores resultados (menor rugosidade) foram obtidos com o nível “3” para o fator vazão. Os melhores resultados foram obtidos com a aplicação do dióxido de carbono no mesmo sentido do avanço da ferramenta de corte. No sentido contrário (nível “2”) ao nível “3” para vazão houve o aumento da rugosidade superficial dos corpos-de-prova ensaiados.

Eucalipto – operação de serramento circular. Rugosidade Ry.

Para o parâmetro de rugosidade avaliado Ry, os melhores resultados foram encontrados com a vazão ao nível 2 ou 3, para velocidades de corte até o nível “2”. Para a velocidade de corte ao nível “3”, os melhores resultados foram encontrados com a vazão ao nível “1”. Não houve diferenças significativas entre as direções de aplicação do fluido.

Eucalipto – operação de fresamento tangencial. Rugosidade Ra.

Para essa operação e parâmetro de rugosidade, os melhores resultados forma obtidos com a vazão ao nível “2” e aplicados na mesma direção do avanço da ferramenta.

Eucalipto – operação de fresamento tangencial. Rugosidade Ry.

Para essa operação e parâmetro avaliado os melhores resultados foram obtidos com a vazão ao nível “3” e com aplicação na mesma direção da ferramenta de corte (nível “1”)

Pinus – operação de serramento circular. Rugosidade Ra

Os melhores resultados foram obtidos com a vazão ao nível ”2” e aplicados na mesma direção do avanço da ferramenta de corte (nível “1”).

Pinus – operação de serramento circular. Rugosidade Ry.

Para essa operação e parâmetro de rugosidade, os melhores resultados foram obtidos com a vazão aplicada ao nível “2” e aplicada na mesma direção do avanço da ferramenta de corte (nível “1”).

Pinus – operação de fresamento tangencial. Rugosidade Ra.

Os melhores resultados foram obtidos com o nível de vazão ao nível “3” (para a velocidade de corte ao nível “3”). Para a velocidade de corte ao nível “1” e “2”, o nível de vazão foi indiferente. Em todos os casos, os melhores resultados foram obtidos com a aplicação do fluido de corte na mesma direção do avanço da ferramenta de corte.

Pinus – operação de fresamento tangencial. Rugosidade Ry.

Os melhores resultados foram obtidos com a vazão ao nível “2” e “3” aplicados na mesma direção do avanço da ferramenta de corte.

MDF – operação de serramento circular. Rugosidade Ra.

Os melhores resultados foram obtidos com a vazão ao nível “2”, independente do sentido de aplicação do fluido de corte.

MDF – operação de serramento circular. Rugosidade Ry.

Os melhores resultados foram obtidos com a aplicação do fluido de corte com vazão ao nível “2” e “3” para a velocidade de corte ao nível “3”. A direção de aplicação do fluido preferencial foi a do nível “1” (mesma direção do avanço da ferramenta de corte).

MDF – operação de fresamento tangencial. Rugosidade Ra.

A rugosidade Ra mostrou melhores resultados quando havia fluido de corte, independente do nível. A ausência manifestou os resultados menos satisfatórios. (maior rugosidade).

MDF – operação de fresamento tangencial. Rugosidade Ry.

Para o padrão de rugosidade apresentado e operação mencionada, os melhores resultados foram obtidos com o nível “3” de vazão para as velocidades de corte ao nível “1”

e “3”. Para a velocidade de corte ao nível “2” os melhores resultados foram obtidos com o nível “2” para a vazão.

Conclui-se que a rugosidade obtida com a adição do fluido de corte baseado em névoa carbônica não apresentou um padrão definitivo no que concerne ao montante de dióxido de carbono necessário para os efeitos de melhorias do estado superficial dos materiais avaliados. Observaram-se, entretanto, duas particularidades:

A adoção do fluido de corte sempre apresentou resultados mais satisfatórios (menor rugosidade apresentada pelos corpos-de-prova), independente do nível de aplicação (níveis “1”, “2”, e “3”)

O nível “2” (30g/min) de vazão de dióxido de carbono aplicado em forma de névoa parece ser o mais indicado quando se avalia os resultados de forma geral pois a rugosidade pode ser afetada (aumentada) quando a quantidade de fluido aplicado seja demasiada.

A direção preferencial para a aplicação do fluido de corte foi, de maneira geral a correspondente ao nível “1”, que é a mesma direção do avanço da ferramenta de corte. A direção oposta (nível “2”) não apresentou os mesmos resultados obtidos com o nível “1” principalmente quando a velocidade de corte estava ajustada ao nível “3”. Nesse caso o efeito do ar turbulento ao redor da ferramenta impediu o efetivo contato do fluido refrigerante com o material em processo de usinagem e ferramenta de corte.

Há diferenças relacionadas ao nível de vazão e parâmetro de rugosidade avaliado. Para o parâmetro R_y o nível adequado é o nível “2”. Importante mencionar que esse parâmetro retrata com maior veracidade o real estado superficial do material processado, que o R_a , uma vez que este último tende a suavizar eventuais “defeitos” encontrados nas superfícies usinadas.

5.3. Resultados relacionados com a vibração.

A vibração monitorada não foi influenciada pela adoção do mecanismo de refrigeração baseado em névoa carbônica. Independente do nível adotada os resultados não apresentaram diferenças estatísticas, para os ensaios realizados com os materiais e dimensões adotadas nessa pesquisa.

É possível que a vibração seja significativa se as dimensões do material processado forem superiores àquelas que foram adotadas nessa pesquisa, uma vez que a vibração é uma componente das condições de corte e processamento do material. Além disso, para cortes

mais severos (com maior profundidade ou remoção de material) há a possibilidade de haver influencia positiva do mecanismo de refrigeração na vibração, entretanto esse trabalho não permitiu obter conclusões a esse respeito sendo, portanto importante questão a ser avaliada em estudos posteriores.

5.4. Resultados relacionados com a umidade relativa e temperatura medida externamente a região de usinagem.

Para todos os níveis de aplicação do dióxido de carbono, a temperatura registrada na região de usinagem foi inferior àquela obtida com a usinagem sem o dióxido de carbono.

A umidade relativa apresentou os menores resultados ao nível “3” de vazão do dióxido de carbono, o segundo menor valor foi obtido com o nível “4” (sem fluido de corte). Ao nível “1” e “2” ocorreu o aumento da umidade relativa próxima a região em processo de usinagem. Esse comportamento indica que o excesso de dióxido de carbono pode reduzir a umidade relativa do ambiente próximo ao que ocorrem os procedimentos de usinagem. Em caso de um procedimento de usinagem longo, a baixa umidade do ambiente próximo onde ocorrem os procedimentos de usinagem pode influir na própria umidade do material processado, entretanto essa é uma averiguação que necessita ser comprovada. Em caso afirmativo se poderia ter aumento da resistência mecânica do material processado com conseqüente aumento da força e potência de corte.

5.5. Resultados relacionados com os desgastes e avarias nas ferramentas de corte com e sem o uso do mecanismo de refrigeração.

A adoção do mecanismo de refrigeração reduziu e, em alguns casos, impediu a adesão de material, proveniente do processo de corte, na ferramenta de corte e também contribuiu para o menor desgaste (medidos pelos parâmetros de rugosidade Ra e Ry) da ferramenta de corte. Para estudos posteriores seria importante avaliar esses resultados em situação de maior agressividade, utilizando-se maior profundidade e maiores comprimentos de corte.

Conclusões finais.

Do modo como foi proposto o mecanismo de refrigeração atende as propostas impetradas, pois se notou que ocorreram menores valores para a temperatura próxima a região em processo de usinagem, aliada ao melhoramento do estado superficial dos materiais processados, bem diminuição do efeito degradante para as ferramentas de corte – a formação da aresta postiça de corte.

Sugestões para trabalhos futuros.

Como sugestão para trabalhos futuros com o mecanismo de refrigeração proposto nessa pesquisa, seguem os seguintes pontos:

Realização de procedimentos de usinagem com cortes mais robustos, ou seja, com maior comprimento e profundidade de corte, assim poder-se-á averiguar com maior eficiência o efeito de redução da temperatura decorrente do processo de usinagem, bem como avaliar a vibração oriunda do processo em si.

Trabalhar com valores intermediários para a vazão do fluido de corte adotado nessa pesquisa.

Criar um modelo matemático que retrate a várias variáveis envolvidas no processo e as várias saídas desejadas como resultado. Nesse sentido a criação de um programa computacional que viesse a gerenciar o processo de usinagem associado com o mecanismo de refrigeração seria um notável desenvolvimento para futuras aplicações industriais.

Como metodologia para avaliar a força de corte, sugere-se o método proposto por A. Nery, que adotou um dispositivo especialmente para essa finalidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMÓVEL **Panorama do setor moveleiro no Brasil**. Relatório setorial. SEBRAE – FINEP ABIMÓVEL, São Paulo, 2005.

ABIMÓVEL **Design como Fator de Competitividade na Indústria Moveleira**. Relatório setorial. SEBRAE – FINEP - ABIMÓVEL, São Paulo, 2002.

ALMEIDA, Alcir R. B. Reengenharia florestal: necessidade perante a evolução do mercado consumidor. **Revista da madeira**. n. 21, p. 9, mar. /abr. 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-1554**; Definitions of terms relate to wood-base fiber and particle panel material. Philadelphia, 1974.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro (1989) NBR 6162; Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais. 37p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. (1990). NBR 6163; Geometria da cunha de corte, 45p.

BAI, Qingshun; et al. Research and development of polycrystalline diamond woodworking tools. **International Journal of Refractory Metals and Hard Metals**, (2002) 395-400.

BIANCHI, Kleber Eduardo; (1996). **Concepção de uma máquina CNC para medição e usinagem de peças de madeira**. Dissertação. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, UFSC, Florianópolis.

BOEHS, L. **Projeto e Implantação de um Sistema Computadorizado de Banco de Dados de Usinagem CINFUS**. Tese de Doutorado. Florianópolis -SC: Editado no Departamento de Engenharia mecânica da UFSC., 1988.

BONDUELLE, Arnaud. **Usinagem, qualidade e custo**. Curso de Engenharia Industrial Madeireira e do Programa de Pós-graduação em Eng. Florestal, UFPR, Curitiba, 2001.

BONDUELLE, Arnaud. **Usinagem, material de corte e desgaste do gume**. Curso de Engenharia Industrial Madeireira e Programa de Pós-graduação em Eng. Florestal, UFPR, Curitiba, 2000.

BONDUELLE, Ghislaine Miranda; (1997) **Avaliação e análise dos custos da má qualidade na indústria de painéis de fibras**. Tese (Doutorado em engenharia de produção) PPGEP - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CALDERIANI Fo., J., MACHADO, A R. & SOUZA, E. M., Influência da ductilidade do material da peça na temperatura de corte e na força de usinagem, **anais do iv congresso de engenharia mecânica do norte-nordeste**, vol. I pp. 407-412, junho 1996, Recife, PE, Brasil.

CASTRO, E. M.; **Estudo da usinabilidade de chapas MDF (Medium density fiberbord) para usinagem de desbaste e acabamento.** Dissertação de Mestrado – USP/Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2000, 122p.

COUTINHO, LUCIANO. **Design como Fator de Competitividade na Indústria Moveleira.** NEIT/ UNICAMP. Relatório setorial SEBRAE – FINEP- ABIMOVEL, São Pulo, 1999.

CETEMO A madeira de eucalipto na indústria moveleira. In: **seminário internacional sobre produtos sólidos de madeira de alta tecnologia**, Belo Horizonte, 1998; encontro sobre tecnologias apropriadas de desdobro, secagem e utilização da madeira de eucalipto, 1, 1998, Belo Horizonte. Anais. Viçosa: SIF/UFV/DEF, 1998, p. 191-195.

COSTA, E. M. A madeira de eucalipto na indústria moveleira. In: **seminário sobre processamento e utilização da madeira de reflorestamento**, 1996. Curitiba. Anais .Curitiba: ABPM/ SBS, 1996. p. 75-89.

DINIZ, A. E., MARCONDES, C. M., COPPINI, N. L., **Tecnologia da usinagem dos materiais**, 3ª edição, Artliber Editora, 2001.

DOI, O; YOKOYAMA, M. Cutting force analysis of wood I. **Bulletin of the JSME**, v.18, n. 40. p.240-246, 1977.

FARIAS, Marzely Gorges (2000). **As questões ambientais e o processo de fresamento em alta velocidade de madeiras de floresta plantada eucalyptus grandis e eucalyptus dunnii.** Tese (Doutorado em engenharia mecânica) - Programa de pós-graduação em engenharia mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

FRANZ, N. C. **An Analysis of the Wood-Cutting Process.** Ph.D. Thesis. Univ. Michigan., Ann Arbor. 152 p. 1958.

GONÇALVES, Marcos Tadeu Tibúrcio. (2000). **Processamento da Madeira. Bauru, SP. 245p.**

GOZELOTO, Marcelo. **Usinagem de madeira, Eucalipto Grandis, com refrigeração por dióxido de carbono aplicado em forma de névoa, via difusor.** CONCRID – Concurso nacional de criatividade docente. SENAI-DN. Brasília, DF, 2003.

GRIGORIOU, A. Comparisons between medium density fiberboard and particleboard. **Holz als Roh und Werkstoff**, v.41, n.5 p. 183-186, 1983.

GURAU, L., MANSFIELD-WILLIAMS, H.D. and IRLE, M.A. A comparison of Laser Triangulation and Stylus Scanning for measuring the Roughness of Sanded Wood Surfaces. In: **Proc. of the 5th International Conference on the Development of Wood Science, Wood Technology and Forestry.** 5th – 7th September Ljubliana, Slovenia. 2001.

HOADLEY, R.B. Understanding wood, (1980). **A Craftsman's Guide to Wood Technology**. The Taunton Press, 256 p.

HOLLIS, K. (2005). Snow brings green machining to laboratory. [online], disponível para consulta em <http://www.chemlin.de/news/mar05/20050316e01.htm>.

ELEOTÉRIO, Jackson Roberto; (2000), **Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina**. Dissertação. (mestrado em ciências). Universidade de São Paulo, São Paulo, Piracicaba.

LEKHNITSKII, S.G. (1981). **Theory of elasticity of an anisotropic body**. Moscou, Mir, p.10-98.

KIVIMAA, E. Die schnittkraft in der holzbearbeitung. **Holz als roh und werkstoff**, v.10, N.3, p.94- 108. 1952.

KAGEIAMA, P. Y; CASER, P.L. (1982). **Adaptação de espécies de pinus na região na região nordeste do Brasil**. Piracicaba: IPEF – Série técnica, v.3, no 10, p.36.

KOCH, P. (1964). **Wood Machining Process**. New York, Ronald Press Company, 530p.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTE, W.A.J. **Principles of Wood Science and Technology**. New York. 1984. v.1, 592 p.

KOPA, J; SALI, S. Wood: an important material in manufacturing technology. **Journal of materials processing technology**, (2003) 134-142.

KUSIAK, A.; BATTAGLIA, J. L. Influence of CrN coating in wood machining from heat flux estimation in the tool. **International Journal of Thermal Sciences**. V.44 issue 3 (2005), p. 289-301.

LUCAS FILHO, Fernando Cardoso; (2004), **Análise da usinagem da madeira visando à melhoria de processos em indústrias de artigos do mobiliário e embalagens agrícolas e industriais**. Tese (doutorado em engenharia de produção) - Universidade Federal de Florianópolis, Santa Catarina, Florianópolis.

MACHADO, A R. & SILVA, M. B., **Usinagem dos metais** (apostila do curso de usinagem dos metais da universidade federal de Uberlândia) Uberlândia, MG, 1994.

McKENZIE, W.M. The relationship between the cutting properties of wood and its physical and mechanical properties. **Forest Products Journal**, v.12, n.6, 1962 p.287-294.

MALDONADO, LUCIA M. O. **Como utilizar o registro de exportação simplificado** – Revista Comércio exterior n.. 20. p.14-30. 2001.

MALONEY, T. M. The family of wood composite materials. **Forest Products Journal**, v.46, n.2 p.19-26, 1996.

NÉRI, Antônio Carlos; (2002). **Determinação e análise da pressão específica de corte (ks) pelo método de “kienzle” para três espécies de eucalipto**. XXXI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA 2002 Salvador – Bahia, 29 de julho a 02 de agosto de 2002.

NÉRI, Antônio Carlos; (1998), **Medidas de forças-de-corte na madeira de eucalipto**. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas – SP. 152p.

NÉRI, Antônio Carlos; (2003), **Parâmetros de corte na usinagem de madeiras de reflorestamento**. Tese (Doutorado em engenharia agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas – SP. 141p.

PANSHIN, A J & DE ZEEUW, C. **Textbook of Wood Technology**. McGraw-Hill. New York. 1980.

OLIVEIRA, E. et al. Correlações entre parâmetros de qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden, **Boletim Técnico da SIF**, Viçosa (MG), n. 2, p. 1-9, 1990.

OLIVEIRA, J. T. S; (1997), Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil. São Paulo, 1997. 2v., 429p. Tese (Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo).

PÄIVINEN, M.; HEINIMAA, T. The effects of different hand tool blade coatings on force demands when cutting wood. **International Journal of Industrial Ergonomics**, 32 (2003) 139–146

PEREIRA, B. A. (1987). **Introdução de coníferas no Brasil: um esboço histórico**. Piracicaba: Esalq – Escola Superior de Agricultura Luís de Queiróz, 34p (Trabalho de Pós-graduação apresentado à Esalq).

PHILBIN, P.; GORDON, S. (2005). Characterisation of the wear behaviour of polycrystalline diamond (PCD) tools when machining wood-based composites. **Journal of Materials Processing Technology**, 162–163 (2005) 665–672

RIZZINI, C. T. Árvores e madeiras úteis do Brasil – **manual de dendrologia** – 2.ed., São Paulo. Ed. E. Blucher., 1981. 381p.

ROCHA, M. P; (2000). **Eucalyptus grandis Hill ex Maiden e Eucalyptus dunnii Maiden como fontes de matéria-prima para serrarias**. Curitiba. 157f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná).

SANTOS, José Carlos (1999). **Análise dos esforços desenvolvidos na usinagem de três espécies de madeira de eucalipto**. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas - SP. 423p.

SOUZA, P. Viabilidade de exploração da Madeira em florestas tropicais. **Wood Magazine**, v3, n. 4, Curitiba, p. 16-19, 1999.

STEMMER, Gaspar Erich. **Ferramentas-de-corte I**. 5. ed. Florianópolis. Ed. da UFSC,. 2001.

TIBURCIO, Ulisses Frazão De Oliveira. (2000). **Aplicação do método de “KIENZLE” em experimentos de usinagem da madeira para determinação da pressão específica de corte**. Dissertação - (Mestrado em engenharia mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, 55p.

TOMASELLI, Ivan. As perspectivas para o setor florestal Brasileiro. **Revista Referência**, Curitiba, v.2 n.3., p.28, jan./fev.2000.

WOODSON, G.E. (1979). Tool forces and chip types in orthogonal cutting of southern hardwoods. **Research Paper SO-146**, U.S. Department of Agriculture, Forest Service.

7.ANEXOS

i. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

TABELA 4. Fatores e níveis do planejamento experimental com respectivos valores e codificação. Serramento circular

Bloco	Fator Velocidade de corte	Fator Vazão	Fator direção do fluido de corte
1	1	1	1
1	2	1	1
1	3	1	1
1	1	2	1
1	2	2	1
1	3	2	1
1	1	3	1
1	2	3	1
1	3	3	1
1	1	4	1
1	2	4	1
1	3	4	1
1	1	1	2
1	2	1	2
1	3	1	2
1	1	2	2
1	2	2	2
1	3	2	2
1	1	3	2
1	2	3	2
1	3	3	2
1	1	4	2
1	2	4	2
1	3	4	2
2	1	1	1
2	2	1	1
2	3	1	1
2	1	2	1
2	2	2	1
2	3	2	1
2	1	3	1
2	2	3	1
2	3	3	1
2	1	4	1
2	2	4	1
2	3	4	1
2	1	1	2
2	2	1	2
2	3	1	2
2	1	2	2
2	2	2	2
2	3	2	2
2	1	3	2
2	2	3	2
2	3	3	2
2	1	4	2
2	2	4	2

2	3	4	2
---	---	---	---

TABELA 6. Fatores e níveis do planejamento experimental com respectivos valores e codificação. Fresamento tangencial.

Bloco	Fator Velocidade de corte	Fator Vazão	Fator direção do fluido de corte
1	1	1	1
1	2	1	1
1	3	1	1
1	1	2	1
1	2	2	1
1	3	2	1
1	1	3	1
1	2	3	1
1	3	3	1
1	1	4	1
1	2	4	1
1	3	4	1
1	1	1	2
1	2	1	2
1	3	1	2
1	1	2	2
1	2	2	2
1	3	2	2
1	1	3	2
1	2	3	2
1	3	3	2
1	1	4	2
1	2	4	2
1	3	4	2
2	1	1	1
2	2	1	1
2	3	1	1
2	1	2	1
2	2	2	1
2	3	2	1
2	1	3	1
2	2	3	1
2	3	3	1
2	1	4	1
2	2	4	1
2	3	4	1
2	1	1	2
2	2	1	2
2	3	1	2
2	1	2	2
2	2	2	2
2	3	2	2
2	1	3	2
2	2	3	2
2	3	3	2
2	1	4	2
2	2	4	2
2	3	4	2

ii. **CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA**

TABELA 7. Caracterização dos corpos de prova de Eucalyptus Grandis – Serramento circular.

Corpo #	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa (g)	Densidade (kg/m³)
1	21,00	449,65	120,70	774,548	679,59
2	21,00	449,70	120,90	716,786	627,80
3	20,90	449,95	120,50	692,326	610,96
4	20,95	450,00	121,00	699,198	612,94
5	21,00	449,60	120,55	721,575	633,97
6	21,00	449,75	120,45	689,876	606,42
7	21,00	449,95	120,75	603,922	529,31
8	21,00	450,00	120,90	805,740	705,24
9	20,85	449,80	120,85	702,747	620,05
10	20,95	449,80	120,55	643,953	566,87
11	21,00	450,00	121,00	589,689	515,71
12	21,00	450,05	120,50	762,427	669,47
13	21,00	450,00	120,55	683,450	599,94
14	21,00	449,90	120,95	634,143	554,94
15	21,00	449,50	121,00	687,329	601,77
16	21,00	449,45	121,00	727,579	637,08
17	21,00	449,75	121,05	699,154	611,53
18	21,00	449,95	121,00	638,912	558,82
19	21,00	449,90	120,70	687,832	603,17
20	20,75	450,00	120,60	691,292	613,88
21	20,85	450,00	120,90	800,087	705,33
22	20,90	449,10	120,35	744,165	658,77
23	20,80	449,70	120,30	624,203	554,72
24	20,45	449,50	120,00	586,250	531,47
25	20,35	449,60	121,00	849,180	767,05
26	20,60	449,70	120,45	818,180	733,25
27	21,00	449,85	120,75	835,385	732,34
28	21,10	449,90	120,55	653,789	571,31
29	21,10	449,65	121,00	671,248	584,71
30	21,05	449,75	120,80	801,384	700,73
31	21,00	449,90	120,70	873,916	766,35
32	21,00	449,80	121,00	629,429	550,71
33	21,00	449,90	121,00	641,836	561,44
34	21,00	449,00	120,40	823,330	725,24
35	21,00	450,00	120,35	754,808	663,68
36	21,00	449,65	120,50	774,548	555,61
37	21,00	450,05	120,60	632,76	648,89
38	21,00	450,10	120,90	739,68	677,47
39	21,00	449,80	120,80	773,67	516,55
40	21,00	449,05	120,70	588,43	551,76
41	21,00	449,00	120,60	627,95	634,21
42	21,00	450,00	120,40	722,79	769,72
43	21,00	450,00	120,30	875,77	597,15
44	20,00	450,05	120,30	678,94	607,09
45	21,00	449,90	120,80	657,15	667,26
46	21,00	450,00	120,90	761,72	594,27

47	21,00	450,00	121,00	678,96	636,52
48	20,50	450,05	120,80	727,91	522,35
49	20,70	449,45	120,60	581,38	563,29
50	20,90	449,25	120,80	631,74	731,00
51	21,00	449,60	121,00	829,77	615,61
52	21,00	450,00	121,00	703,92	502,71
53	21,00	450,00	121,00	574,82	738,72
54	21,00	450,00	120,50	844,69	744,19
55	21,00	449,70	120,45	846,86	565,15
56	21,00	449,30	120,35	642,28	525,14
57	20,70	449,90	120,60	597,11	729,30
58	20,90	449,45	120,75	818,29	650,00
59	20,85	449,65	120,80	737,60	666,00
60	21,10	449,55	120,90	754,09	617,99

Tabela 19. Caracterização dos corpos de prova fabricados com *Eucalyptus grandis* – Fresamento tangencial

Corpo #	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa (g)	Densidade (kg/m³)
1	20,95	450,00	80,00	418,62	555,048
2	20,70	450,00	81,00	508,00	673,280
3	20,90	450,50	80,00	552,13	610,960
4	20,95	450,00	80,00	462,28	612,940
5	20,95	449,60	80,10	478,31	633,970
6	20,70	450,00	80,10	452,47	606,420
7	21,00	449,95	80,00	437,01	578,117
8	21,00	450,00	79,00	526,50	705,240
9	20,95	450,10	79,00	461,90	620,050
10	20,70	449,80	80,00	432,79	581,033
11	21,00	450,00	79,50	387,44	515,710
12	20,00	450,05	80,70	486,29	669,470
13	20,95	450,00	81,00	458,13	599,940
14	20,70	449,90	81,00	418,62	554,940
15	20,00	449,50	80,00	576,69	801,849
16	21,00	449,45	80,00	481,04	637,080
17	20,95	450,20	80,00	461,42	611,530
18	20,70	449,95	80,00	538,61	722,852
19	21,00	449,90	80,00	455,90	603,170
20	20,75	450,00	81,20	465,45	613,880
21	20,95	450,00	81,00	538,61	705,330
22	20,90	449,10	80,90	500,23	658,770
23	20,80	450,30	80,90	420,33	554,720
24	20,00	449,50	80,90	588,64	809,366
25	20,95	450,30	80,90	585,41	767,050
26	20,60	449,70	80,00	386,53	521,563
27	20,00	449,85	80,00	527,11	732,340
28	20,95	450,10	80,00	491,90	652,065
29	21,10	449,65	80,00	443,80	584,710
30	20,00	450,20	80,00	503,23	698,626
31	21,00	449,90	81,30	587,57	764,951
32	21,00	449,80	80,00	569,90	754,171
33	20,00	449,90	79,90	403,64	561,440
34	21,00	449,00	79,90	546,38	725,240
35	21,00	449,00	80,00	500,63	663,680
36	20,95	450,00	80,00	418,62	555,048
37	20,00	450,05	80,20	504,75	699,216
38	21,00	450,10	80,20	491,90	648,890
39	20,70	449,80	80,10	505,26	677,470
40	20,00	449,05	80,00	371,13	516,550
41	21,00	449,00	80,00	550,67	730,022
42	20,70	450,00	79,90	443,24	595,537
43	20,00	450,00	79,90	553,51	769,720
44	21,00	450,05	80,00	451,50	597,150
45	20,00	449,90	80,00	548,83	762,431
46	20,00	450,00	80,00	480,43	667,260
47	20,95	450,00	81,00	453,80	594,270
48	21,00	450,05	79,80	468,54	621,244
49	20,00	449,45	80,10	376,10	522,350

50	20,70	449,25	80,10	468,54	629,005
51	20,90	449,60	79,90	443,24	590,363
52	20,00	450,00	80,00	443,24	615,610
53	21,00	451,00	80,00	380,89	502,710
54	21,00	450,00	80,00	420,90	556,746
55	21,00	449,70	80,15	563,29	744,190
56	21,00	449,30	80,15	427,39	565,150
57	21,00	449,90	80,00	396,92	525,140
58	20,70	449,45	80,00	542,81	729,300
59	20,90	449,65	80,00	497,05	661,129
60	20,70	449,55	80,20	505,26	677,002

Tabela 33. Caracterização dos corpos de prova fabricados com *Pinus Elliottii* – Serramento circular

Corpo #	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa (g)	Densidade (kg/m³)
1	20,90	449,30	120,75	554,183	437,89
2	21,00	449,60	120,50	473,836	373,56
3	21,00	449,80	120,65	542,282	430,82
4	21,00	449,40	120,60	636,458	502,75
5	21,00	449,40	120,70	553,150	437,53
6	21,00	449,70	120,65	560,961	443,81
7	21,00	449,80	120,50	509,064	401,67
8	21,00	449,80	120,50	670,750	528,59
9	20,20	449,50	120,20	685,321	544,51
10	21,00	450,00	120,60	540,891	428,34
11	20,40	450,10	120,60	722,792	568,79
12	21,00	449,50	120,50	668,534	528,91
13	21,00	449,30	120,50	534,155	422,59
14	21,00	450,10	120,40	512,855	403,75
15	21,00	450,20	120,00	567,899	446,81
16	20,90	449,55	120,10	721,718	568,57
17	21,00	449,60	120,55	550,625	433,56
18	20,90	449,70	120,45	559,523	440,66
19	21,00	449,80	120,65	617,054	487,08
20	20,80	449,90	120,00	542,373	433,56
21	21,00	449,90	120,30	553,033	438,87
22	21,00	449,80	120,10	509,273	405,10
23	21,00	451,00	120,20	509,597	406,50
24	21,00	450,10	120,40	607,879	495,32
25	21,00	449,90	120,00	534,642	434,34
26	20,80	449,80	121,00	575,722	464,24
27	20,70	449,70	120,65	601,715	474,87
28	21,00	449,90	120,45	577,702	454,33
29	21,00	449,50	120,35	635,558	498,37
30	21,00	449,30	120,85	565,942	445,75
31	20,90	449,70	120,50	521,683	411,88
32	21,00	450,00	120,00	562,018	442,36
33	21,00	450,00	120,30	546,455	430,11
34	21,00	450,10	120,40	483,464	382,35
35	21,00	449,45	120,60	541,255	428,79
36	20,90	449,30	120,90	554,183	392,76
37	20,50	449,70	120,10	496,84	459,60
38	21,10	449,50	120,30	581,64	486,14
39	21,20	449,60	120,20	616,51	379,42
40	21,00	449,25	120,30	480,87	462,30
41	20,50	450,00	120,10	585,02	471,50
42	21,00	449,40	120,00	597,06	407,51
43	21,00	449,00	120,10	514,56	432,65
44	21,10	449,90	120,30	545,41	480,92
45	21,00	450,00	120,50	578,43	384,35
46	21,00	450,30	120,80	487,51	401,38
47	20,50	450,10	120,30	509,84	411,16
48	20,30	450,30	120,90	522,48	445,02
49	20,90	449,40	120,20	551,35	435,86
50	20,30	449,10	120,00	543,39	413,95

51	21,00	449,35	120,00	521,61	488,63
52	21,00	449,90	120,30	620,00	533,79
53	21,05	449,00	120,50	678,04	468,77
54	21,00	449,00	120,30	594,38	407,91
55	20,90	450,00	120,40	515,08	506,88
56	20,40	450,00	121,00	641,06	520,29
57	20,50	450,10	120,90	657,48	458,59
58	21,10	450,05	120,80	572,53	429,24
59	21,05	450,10	120,10	541,69	443,26
60	21,00	449,80	120,40	558,33	444,70

Tabela 47. Caracterização dos corpos de prova fabricados com *Pinus eliottii* – Fresamento tangencial

Corpo #	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa (g)	Densidade (kg/m³)
1	20,95	450,00	81,00	330,26	432,484
2	20,70	450,00	80,00	281,86	378,230
3	20,90	450,50	80,50	324,51	428,144
4	20,95	450,00	80,50	379,17	499,627
5	20,95	449,60	79,00	330,10	443,622
6	20,70	450,00	80,10	331,14	443,810
7	21,00	449,95	80,10	303,63	401,169
8	21,00	450,00	79,50	394,62	525,266
9	20,95	450,10	79,50	405,63	541,085
10	20,70	449,80	80,00	319,06	428,340
11	21,00	450,00	80,00	427,32	565,235
12	20,00	450,05	80,50	384,19	530,224
13	20,95	450,00	80,50	322,70	425,215
14	20,70	449,90	80,90	304,57	404,249
15	20,00	449,50	80,80	321,35	442,386
16	21,00	449,45	80,80	429,31	562,941
17	20,95	450,20	80,80	327,14	429,267
18	20,70	449,95	80,90	328,34	435,758
19	21,00	449,90	80,90	368,15	481,661
20	20,75	450,00	80,00	328,73	440,063
21	20,95	450,00	81,00	335,13	438,870
22	20,90	449,10	80,00	307,61	409,657
23	20,80	450,30	80,00	308,02	411,073
24	20,00	449,50	80,00	360,24	500,892
25	20,95	450,30	80,00	331,49	439,226
26	20,60	449,70	80,00	344,05	464,240
27	20,00	449,85	80,00	341,79	474,870
28	20,95	450,10	80,00	342,73	454,330
29	21,10	449,65	80,00	378,27	498,370
30	20,00	450,20	80,00	321,08	445,750
31	21,00	449,90	81,20	316,37	412,387
32	21,00	449,80	80,20	334,28	441,257
33	20,00	449,90	80,20	309,22	428,501
34	21,00	449,00	80,00	288,05	381,872
35	21,00	449,00	79,50	323,44	431,487
36	20,95	450,00	79,60	296,22	394,734
37	20,00	450,05	79,70	331,78	462,483
38	21,00	450,10	79,80	368,52	488,577
39	20,70	449,80	80,10	282,97	379,420
40	20,00	449,05	80,10	332,15	461,723
41	21,00	449,00	80,10	355,66	470,911
42	20,70	450,00	79,90	303,30	407,510
43	20,00	450,00	79,90	311,12	432,650
44	21,00	450,05	80,00	363,62	480,920
45	20,00	449,90	80,00	276,67	384,350
46	20,00	450,00	80,00	288,99	401,380
47	20,95	450,00	81,00	313,97	411,160
48	21,00	450,05	79,90	335,63	444,463
49	20,00	449,45	80,10	313,83	435,860
50	20,70	449,25	80,10	308,35	413,950

51	20,90	449,60	79,90	366,86	488,630
52	20,00	450,00	80,00	384,33	533,790
53	21,00	451,00	80,00	355,18	468,770
54	21,00	450,00	80,00	308,38	407,910
55	21,00	449,70	80,20	383,66	506,564
56	21,00	449,30	80,20	393,46	519,966
57	21,00	449,90	80,20	346,62	457,446
58	20,70	449,45	80,10	319,48	428,704
59	20,90	449,65	80,10	333,25	442,707
60	20,70	449,55	80,05	331,89	445,533

Tabela 60. Caracterização dos corpos de prova fabricados com MDF – Serramento circular

Corpo #	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa (g)	Densidade (kg/m ³)
1	20	410,50	121,00	720,18	724,96
2	20	417,00	121,40	731,78	722,76
3	20	417,00	121,85	667,49	656,83
4	20	411,50	121,50	667,56	667,60
5	20	412,00	121,10	656,44	657,85
6	20	415,00	121,80	668,45	661,22
7	20	416,00	122,00	666,25	656,38
8	20	418,00	121,00	730,61	722,26
9	20	415,00	121,80	660,96	653,81
10	20	418,00	121,10	720,08	711,26
11	20	419,00	121,20	722,12	710,99
12	20	411,00	120,80	675,24	680,02
13	20	416,00	122,00	675,76	665,75
14	20	417,00	121,10	721,48	714,36
15	20	412,60	121,80	679,15	675,71
16	20	419,10	121,40	719,61	707,18
17	20	412,50	121,90	569,27	566,06
18	20	420,00	121,50	729,61	714,88
19	20	416,00	121,00	715,92	711,14
20	20	417,60	121,70	719,94	708,30
21	20	416,00	121,10	671,08	666,05
22	20	417,00	121,50	664,30	655,57
23	20	418,00	122,00	664,22	651,25
24	20	416,50	121,50	668,91	660,92
25	20	416,20	121,90	669,27	659,58
26	20	418,00	121,70	677,55	665,95
27	20	422,00	121,10	727,39	711,67
28	20	413,00	119,90	665,53	672,00
29	20	420,00	121,40	714,00	700,16
30	20	418,00	121,30	667,02	657,77
31	20	420,00	121,60	670,18	656,11
32	20	416,00	121,90	663,70	654,40
33	20	414,00	121,70	668,60	663,51
34	20	412,00	121,50	672,37	671,59
35	20	420,00	121,35	721,12	707,44
36	20	414,00	121,50	668,60	664,60
37	20	412,00	121,00	669,59	671,58
38	20	420,00	121,40	676,34	663,23
39	20	415,00	121,00	729,70	726,58
40	20	412,00	122,10	665,02	660,99
41	20	414,50	122,00	665,64	658,15
42	20	413,50	125,50	668,12	643,73
43	20	420,00	121,50	679,51	665,79
44	20	412,00	121,50	657,79	657,03
45	20	414,00	121,10	721,81	719,86
46	20	425,00	121,60	674,40	652,48
47	20	420,30	121,30	723,09	709,16
48	20	421,00	121,80	666,56	649,95
49	20	430,20	121,50	668,30	639,29
50	20	415,00	122,00	671,15	662,80
51	20	412,20	121,90	668,87	665,58

52	20	413,00	121,00	674,05	674,41
53	20	414,00	121,00	717,35	716,00
54	20	417,00	121,20	726,02	718,26
55	20	419,00	121,30	727,02	715,22
56	20	415,60	121,40	715,98	709,54
57	20	412,70	122,00	673,47	668,80
58	20	418,60	121,50	658,54	647,41
59	20	416,00	121,20	725,76	719,73
60	20	412,00	121,00	669,59	671,58

Tabela 74. Caracterização dos corpos de prova fabricados com MDF.

Corpo #	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa (g)	Densidade (kg/m ³)
1	20	420,40	80,63	480,12	708,230
2	20	417,28	80,80	487,85	723,450
3	20	417,35	79,82	444,99	667,900
4	20	411,90	79,66	445,04	678,190
5	20	412,45	80,32	437,63	660,500
6	20	415,49	80,83	445,63	663,500
7	20	416,53	79,53	444,17	670,430
8	20	412,57	80,26	487,07	735,450
9	20	415,60	80,87	440,64	655,540
10	20	418,63	80,49	480,05	712,340
11	20	412,66	80,52	481,41	724,450
12	20	411,69	80,34	450,16	680,540
13	20	412,72	81,04	450,51	673,450
14	20	417,75	80,48	480,99	715,340
15	20	412,77	80,84	452,77	678,430
16	20	419,90	80,74	479,74	707,560
17	20	412,82	79,19	379,51	580,450
18	20	420,85	80,80	486,41	715,220
19	20	412,87	80,23	477,28	720,450
20	20	418,49	78,54	479,96	730,120
21	20	412,92	79,73	447,39	679,430
22	20	417,94	81,39	442,87	650,980
23	20	412,96	79,96	442,81	670,500
24	20	417,48	80,08	445,94	666,900
25	20	413,00	81,79	446,18	660,430
26	20	419,02	81,74	451,70	659,430
27	20	413,04	80,40	484,93	730,120
28	20	414,06	79,69	443,69	672,340
29	20	413,08	80,57	476,00	715,120
30	20	419,10	80,70	444,68	657,430
31	20	413,11	80,69	450,29	675,430
32	20	417,13	80,94	442,47	655,230
33	20	413,15	81,32	445,73	663,320
34	20	413,17	80,92	448,25	670,320
35	20	413,18	80,79	480,75	720,120
36	20	415,20	82,52	445,73	650,450
37	20	413,22	80,34	446,39	672,340
38	20	421,23	79,47	450,89	673,450
39	20	413,25	80,53	479,56	720,560
40	20	413,26	79,00	443,35	678,980
41	20	413,28	80,90	444,95	665,430
42	20	414,80	83,89	445,41	640,030
43	20	413,31	81,20	453,01	674,900
44	20	413,33	80,77	438,53	656,780
45	20	413,34	80,46	481,21	723,430
46	20	426,36	80,85	449,60	652,150
47	20	421,67	80,75	482,06	707,900
48	20	422,39	80,85	444,37	650,600
49	20	413,40	80,49	445,53	669,500
50	20	416,41	80,50	447,43	667,400
51	20	413,63	81,45	446,87	663,200

52	20	413,44	80,50	449,37	675,100
53	20	415,46	80,33	478,23	716,450
54	20	418,47	80,53	484,01	718,100
55	20	420,48	80,50	484,68	715,980
56	20	417,10	80,54	477,32	710,480
57	20	414,21	80,96	448,98	669,400
58	20	420,12	80,80	439,03	646,670
59	20	420,10	80,01	437,56	650,895
60	20	419,17	80,21	432,32	642,920

iii. RESULTADOS REFERENTES À RUGOSIDADE.

TABELA 14. Resultados relacionados com o parâmetro Ra. *Eucalyptus grandis* – Serramento circular.

Corpo #	Condição	1ª	2ª	3ª	4ª	Média	S	Coefficiente de variação
1	221	2,20	3,74	2,77	2,66	2,84	0,65	23%
2	122	4,43	3,40	3,16	3,01	3,50	0,64	18%
3	221	2,35	3,46	2,90	2,46	2,79	0,50	18%
4	321	2,85	2,83	2,17	2,54	2,60	0,32	12%
5	122	3,46	3,60	3,45	3,10	3,40	0,21	6%
6	111	3,23	2,32	3,50	3,95	3,25	0,69	21%
7	341	2,84	2,06	3,48	3,25	2,91	0,62	21%
8	112	2,34	3,00	3,00	3,50	2,96	0,48	16%
9	222	3,46	3,24	3,39	2,99	3,27	0,21	6%
10	312	2,54	3,41	3,87	3,43	3,31	0,56	17%
11	211	2,34	2,36	2,55	2,11	2,34	0,18	8%
12	111	1,34	1,45	2,00	2,10	1,72	0,38	22%
13	112	2,30	2,45	2,43	2,98	2,54	0,30	12%
14	212	2,20	2,16	3,41	2,88	2,66	0,60	22%
15	131	1,34	1,98	1,98	2,44	1,94	0,45	23%
16	142	2,39	2,55	3,77	3,49	3,05	0,68	22%
17	322	1,44	1,30	1,87	1,98	1,65	0,33	20%
18	222	3,09	3,45	3,82	2,32	3,17	0,64	20%
19	121	2,35	2,44	2,33	1,50	2,16	0,44	20%
20	311	2,83	2,48	2,43	2,90	2,66	0,24	9%
21	321	2,89	4,49	4,05	4,32	3,94	0,72	18%
22	232	3,55	3,85	2,89	2,34	3,16	0,68	21%
23	211	2,49	2,55	2,69	2,33	2,52	0,15	6%
24	212	3,09	3,09	2,99	2,43	2,90	0,32	11%
25	322	1,98	1,87	2,49	2,49	2,21	0,33	15%
26	132	2,40	2,46	2,58	1,89	2,33	0,30	13%
27	141	3,49	2,40	3,45	3,49	3,21	0,54	17%
28	332	1,99	2,34	2,31	1,88	2,13	0,23	11%
29	232	2,05	3,01	3,40	2,45	2,73	0,60	22%
30	311	2,19	2,49	1,90	2,88	2,37	0,42	18%
31	312	2,05	3,12	2,99	2,61	2,69	0,48	18%
32	131	2,08	2,90	2,37	3,67	2,76	0,70	25%
33	342	4,94	4,98	3,57	4,91	4,60	0,69	15%

34	141	3,39	2,93	2,67	2,34	2,83	0,44	16%
35	242	2,99	2,90	3,13	3,46	3,12	0,25	8%
36	341	3,45	3,19	2,99	2,87	3,13	0,25	8%
37	342	2,98	2,01	2,64	1,99	2,41	0,49	20%
38	142	2,35	2,63	3,01	3,43	2,86	0,47	16%
39	331	2,01	2,22	2,25	3,01	2,37	0,44	18%
40	132	1,96	1,98	2,87	2,62	2,36	0,46	19%
41	242	2,99	2,43	2,40	2,48	2,58	0,28	11%
42	231	2,41	2,10	2,45	2,07	2,26	0,20	9%
43	241	3,78	3,49	4,58	5,40	4,31	0,86	20%
44	332	2,45	1,99	2,45	1,22	2,03	0,58	29%
45	241	4,56	3,20	4,98	4,00	4,19	0,77	18%
46	231	2,07	1,63	1,34	1,92	1,74	0,32	19%
47	121	2,13	1,49	1,90	2,00	1,88	0,28	15%
48	331	1,77	2,19	1,89	2,48	2,08	0,32	15%

TABELA 16. Resultados relacionados com o parâmetro Ry. *Eucalyptus grandis* – serramento circular.

Corpo #	Condição	1ª	2ª	3ª	4ª	média	S	Coefficiente de variação
1	221	14,97	35,63	8,22	23,74	20,64	11,84	38%
2	122	5,27	11,82	19,57	5,84	10,63	6,66	42%
3	221	8,11	18,46	11,24	15,92	13,43	4,64	22%
4	321	10,79	9,74	8,44	18,64	11,90	4,59	29%
5	122	12,51	8,98	8,39	6,97	9,21	2,35	10%
6	111	12,00	17,49	14,40	13,00	14,22	2,39	17%
7	341	13,03	30,49	12,88	13,09	17,37	8,75	50%
8	112	24,57	13,43	13,40	29,40	20,20	8,08	40%
9	222	7,72	8,69	14,66	17,00	12,02	4,52	43%
10	312	20,00	19,45	13,45	10,10	15,75	4,79	30%
11	211	14,55	14,50	19,40	22,59	17,76	3,96	22%
12	111	10,40	19,00	19,40	14,30	15,78	4,27	27%
13	112	29,40	25,40	19,40	17,40	22,90	5,51	24%
14	212	14,50	19,40	21,34	14,45	17,42	3,49	20%
15	131	6,79	9,68	10,50	12,05	9,76	2,21	23%
16	142	40,61	18,82	35,79	17,50	28,18	11,75	58%
17	322	26,70	12,94	10,73	16,03	16,60	7,08	64%
18	222	8,02	11,22	7,38	8,78	8,85	1,68	31%
19	121	14,90	8,59	8,82	35,00	16,83	12,46	57%
20	311	18,59	19,59	22,54	21,50	20,56	1,79	9%
21	321	12,79	9,91	6,27	10,94	9,98	2,74	19%
22	232	7,50	11,43	15,40	10,40	11,18	3,27	29%
23	211	20,40	23,45	18,40	19,30	20,39	2,20	11%
24	212	20,40	29,40	31,40	29,40	27,65	4,92	18%
25	322	13,02	6,99	15,43	8,90	11,09	3,84	23%
26	132	20,04	10,30	12,34	12,49	13,79	4,28	31%
27	141	34,50	29,40	13,10	10,90	21,98	11,74	70%
28	332	35,40	13,40	15,40	9,49	20,10	13,58	68%
29	232	13,40	14,40	9,50	19,00	14,08	3,91	28%
30	311	34,50	24,30	23,45	19,40	25,41	6,42	25%
31	312	15,25	20,87	18,92	12,62	16,92	3,69	22%
32	131	4,34	5,75	29,76	15,42	13,82	11,71	85%
33	342	15,65	15,61	16,50	19,60	16,84	1,89	17%
34	141	40,54	28,40	18,34	19,30	26,65	10,31	75%
35	242	16,04	34,54	20,44	10,54	20,39	10,27	53%

36	341	14,54	19,54	13,50	15,65	15,81	2,64	13%
37	342	20,54	21,50	20,40	24,54	21,75	1,93	14%
38	142	19,55	17,43	19,76	19,65	18,88	1,25	5%
39	331	7,52	13,83	6,15	21,76	12,32	7,13	58%
40	132	29,74	8,69	17,06	14,70	17,55	8,86	50%
41	242	16,45	58,27	25,12	10,80	27,66	21,24	11%
42	231	29,25	9,58	6,39	11,59	14,20	10,26	72%
43	241	13,98	33,73	12,74	9,52	17,49	10,99	50%
44	332	28,78	10,47	12,71	6,29	14,56	9,84	68%
45	241	14,39	30,43	14,54	10,34	17,43	8,89	9%
46	231	7,51	10,74	6,39	9,66	8,58	1,98	23%
47	121	25,64	15,79	9,33	6,10	14,22	8,62	61%
48	331	8,65	10,54	8,59	22,04	12,46	6,45	52%

Tabela 27. Resultados relacionados com o parâmetro Ra. *Eucalyptus grandis* – Serramento circular

Corpo #	Condição	1ª	2ª	3ª	4ª	Média	S	Coefficiente de variação
1	221	2,20	2,79	2,77	1,66	2,36	0,54	23%
2	122	4,56	3,40	4,50	3,01	3,87	0,78	20%
3	221	2,35	3,00	2,01	2,05	2,35	0,46	19%
4	321	1,77	2,34	2,17	2,54	2,21	0,33	15%
5	122	3,46	3,60	4,45	3,10	3,65	0,57	16%
6	111	3,59	2,32	3,50	3,95	3,34	0,71	21%
7	341	3,54	2,06	3,59	3,25	3,11	0,72	23%
8	112	2,34	3,00	3,00	3,50	2,96	0,48	16%
9	222	2,45	2,56	2,89	2,99	2,72	0,26	9%
10	312	2,54	3,41	3,87	3,34	3,29	0,55	17%
11	211	2,34	2,36	2,55	2,11	2,34	0,18	8%
12	111	1,34	1,45	2,00	2,10	1,72	0,38	22%
13	112	2,30	1,90	1,43	2,08	1,93	0,37	19%
14	212	2,20	2,16	2,99	2,98	2,58	0,47	18%
15	131	1,36	1,48	1,49	2,01	1,59	0,29	18%
16	142	2,39	2,55	3,77	3,49	3,05	0,68	22%
17	322	1,44	1,30	1,14	1,98	1,47	0,36	25%
18	222	2,36	3,45	3,70	2,32	3,50	0,72	21%
19	121	2,35	1,44	1,89	1,43	1,78	0,44	25%
20	311	2,83	2,48	2,43	2,90	2,66	0,24	9%
21	321	2,44	2,49	2,29	2,78	2,50	0,21	8%
22	232	2,01	2,67	2,89	2,87	2,61	0,41	16%
23	211	2,49	2,45	2,59	1,75	2,32	0,38	17%
24	212	3,09	3,09	2,99	2,43	2,90	0,32	11%
25	322	1,98	1,87	2,49	2,49	2,21	0,33	15%
26	132	1,69	2,46	2,58	2,55	2,32	0,42	18%
27	141	3,49	2,40	3,45	3,49	3,21	0,54	17%
28	332	2,35	2,34	2,31	2,08	2,27	0,13	6%
29	232	1,99	3,01	2,01	2,21	2,31	0,48	21%
30	311	2,19	2,49	1,90	2,88	2,37	0,42	18%
31	312	2,05	3,17	3,50	2,61	2,83	0,64	23%
32	131	1,45	2,49	2,22	2,45	2,15	0,48	22%
33	342	4,94	4,98	3,57	4,91	4,60	0,69	15%
34	141	3,38	2,93	2,08	2,34	2,68	0,59	22%
35	242	2,99	2,90	3,13	3,46	3,12	0,25	8%

36	341	3,45	3,19	2,99	2,87	3,13	0,25	8%
37	342	2,98	2,01	2,64	1,99	2,41	0,49	20%
38	142	2,35	2,63	3,01	3,43	2,86	0,47	16%
39	331	1,88	2,22	1,99	2,96	2,26	0,49	21%
40	132	2,96	1,79	3,09	2,62	2,62	0,58	22%
41	242	2,99	2,43	2,40	2,48	2,58	0,28	11%
42	231	1,99	2,10	2,54	2,39	2,56	0,25	10%
43	241	2,78	4,59	4,58	5,31	4,32	1,08	25%
44	332	2,10	1,99	2,35	1,22	1,92	0,49	25%
45	241	4,56	3,20	4,98	4,00	4,19	0,77	18%
46	231	1,54	1,63	1,34	1,92	1,61	0,24	15%
47	121	2,13	1,49	1,90	2,00	1,88	0,28	15%
48	331	2,45	2,19	1,89	2,48	2,25	0,27	12%

Tabela 29. Resultados relacionados com o parâmetro Ry. *Eucalyptus grandis* – Fresamento tangencial.

Corpo #	Condição	1ª	2ª	3ª	4ª	média	S	Coefficiente de variação
1	221	14,97	25,63	28,22	23,74	23,14	5,75	25%
2	122	15,27	11,82	19,57	15,84	15,63	3,17	20%
3	221	18,11	18,46	11,24	15,92	15,93	3,32	21%
4	321	10,79	9,74	11,44	16,50	12,12	3,00	25%
5	122	12,51	8,98	8,39	6,97	10,21	2,35	23%
6	111	12,00	17,49	14,40	13,00	14,22	2,39	17%
7	341	28,45	30,49	29,99	30,37	29,83	0,94	3%
8	112	24,57	29,45	26,78	29,40	27,55	2,35	9%
9	222	14,01	9,45	14,66	17,00	13,78	3,16	23%
10	312	20,00	19,45	13,45	15,55	17,11	3,14	18%
11	211	14,55	14,50	19,40	22,59	17,76	3,96	22%
12	111	10,40	19,00	19,40	17,54	16,59	4,20	25%
13	112	29,40	25,40	19,40	17,40	22,90	5,51	24%
14	212	14,50	19,40	21,34	14,45	17,42	3,49	20%
15	131	9,81	9,68	10,12	11,50	10,28	0,84	8%
16	142	40,61	33,43	35,79	32,45	35,57	3,64	10%
17	322	16,77	12,94	10,73	16,03	14,12	2,80	20%
18	222	10,02	13,22	9,38	11,78	11,10	1,74	16%
19	121	14,90	21,45	23,45	23,00	20,70	3,96	19%
20	311	18,59	19,59	22,54	21,50	20,56	1,79	9%
21	321	12,79	9,91	8,27	10,94	10,48	1,89	18%
22	232	13,45	11,43	15,40	10,40	12,67	2,22	18%
23	211	20,40	23,45	18,40	19,30	20,39	2,20	11%
24	212	20,40	29,40	31,40	29,40	27,65	4,92	18%
25	322	13,02	9,99	15,43	8,90	11,84	2,96	25%
26	132	9,56	10,11	12,34	12,49	11,13	1,51	14%
27	141	34,50	29,40	23,45	20,90	27,06	6,10	23%
28	332	12,57	13,40	15,40	9,49	12,49	2,96	24%
29	232	13,40	14,40	17,59	19,00	16,10	2,63	16%
30	311	34,50	24,30	23,45	19,40	25,41	6,42	25%
31	312	15,25	20,87	18,92	12,62	16,92	3,69	22%
32	131	8,88	9,86	13,13	13,90	11,44	2,45	21%
33	342	25,44	15,61	16,50	19,60	19,29	4,44	23%
34	141	20,54	28,40	18,34	19,30	21,65	4,59	21%
35	242	16,04	24,04	20,44	14,56	18,77	4,31	23%

36	341	14,54	19,54	13,50	15,65	15,81	2,64	17%
37	342	20,54	21,50	20,40	24,54	21,75	1,93	9%
38	142	19,55	17,43	19,76	19,65	18,88	1,25	7%
39	331	10,45	13,83	10,01	15,56	12,46	2,68	21%
40	132	12,40	19,56	17,06	14,70	15,93	3,08	19%
41	242	23,45	28,90	25,12	22,01	24,87	2,97	12%
42	231	14,41	15,67	9,90	11,59	12,89	2,62	20%
43	241	13,98	22,45	19,99	19,45	18,97	3,57	19%
44	332	13,45	10,47	12,71	10,57	11,80	1,51	13%
45	241	14,39	20,44	14,54	11,49	15,22	3,76	25%
46	231	7,51	10,74	6,39	9,66	8,58	1,98	23%
47	121	12,45	15,79	12,88	13,45	13,64	1,49	11%
48	331	8,65	10,54	8,59	9,45	9,31	0,91	10%

Tabela 40. Resultados relacionados com o parâmetro Ra. *Pinus elliottii* – Serramento circular

Corpo #	Condição	1ª	2ª	3ª	4ª	Média	S	Coefficiente de variação
1	142	4,92	5,55	5,00	7,71	5,80	1,31	23%
2	342	6,76	4,99	5,70	4,16	5,40	1,10	20%
3	231	7,68	6,78	7,56	4,46	6,62	1,49	23%
4	242	4,37	3,48	4,59	5,74	4,55	0,93	20%
5	232	5,87	3,75	3,26	3,26	4,04	1,24	31%
6	131	5,16	4,11	4,51	6,51	5,07	1,05	21%
7	341	4,56	3,54	5,65	3,45	4,30	1,03	24%
8	341	3,93	4,24	3,96	4,70	4,21	0,36	8%
9	141	3,83	2,60	2,85	3,26	3,14	0,54	17%
10	141	6,13	5,26	4,36	3,87	4,91	1,00	20%
11	241	4,90	5,00	6,50	4,05	5,11	1,02	20%
12	241	4,20	3,00	3,24	4,51	3,74	0,73	20%
13	342	4,12	5,26	4,98	3,97	4,58	0,63	14%
14	142	3,29	4,01	3,70	3,90	3,73	0,32	9%
15	122	2,75	4,28	4,19	4,82	4,01	0,88	22%
16	121	4,77	4,72	4,89	5,59	4,99	0,40	8%
17	111	2,95	3,45	3,45	2,69	3,14	0,38	12%
18	242	3,81	2,94	4,31	5,17	4,06	0,93	23%
19	211	2,90	3,10	2,90	2,56	2,87	0,22	8%
20	132	4,18	4,09	3,71	3,56	3,89	0,30	8%
21	132	2,99	3,90	2,90	3,54	3,33	0,47	14%
22	122	4,16	3,69	4,83	4,01	4,17	0,48	12%
23	321	1,89	1,90	1,90	2,30	2,00	0,20	10,10%
24	242	2,10	2,59	3,43	3,73	2,96	0,75	25,34%
25	211	1,85	1,88	2,33	2,41	2,12	0,29	13,87%
26	322	2,90	3,00	2,89	2,98	2,94	0,06	1,89%
27	132	4,80	5,14	3,67	3,06	4,17	0,97	23,26%
28	132	2,90	3,34	3,25	1,86	2,84	0,68	23,92%
29	122	2,73	4,99	4,69	4,77	4,30	1,05	24,47%
30	211	5,06	4,58	3,07	4,86	4,39	0,90	20,57%
31	332	5,40	5,00	4,90	4,80	5,03	0,26	5,23%
32	112	6,45	6,44	5,66	3,88	5,61	1,21	21,57%
33	311	2,10	2,90	2,20	2,50	2,43	0,36	14,82%
34	111	5,56	5,24	3,91	4,91	4,91	0,71	14,57%
35	112	4,77	3,75	3,91	5,98	4,60	1,02	22,20%

36	331	4,16	4,79	2,71	4,16	3,96	0,88	22,29%
37	332	4,76	5,90	4,00	4,90	4,89	0,78	15,97%
38	231	4,90	4,90	4,60	4,59	4,75	0,18	3,71%
39	311	1,87	2,10	1,90	2,21	2,02	0,16	8,05%
40	321	1,80	2,91	2,90	2,34	2,49	0,53	21,31%
41	121	4,16	2,70	4,22	3,29	3,59	0,73	20,35%
42	222	4,24	4,63	5,93	3,26	4,52	1,11	24,48%
43	232	2,97	2,71	2,23	4,16	3,02	0,82	27,21%
44	212	2,89	3,00	2,90	3,10	2,97	0,10	3,31%
45	221	4,78	3,62	4,23	3,26	3,97	0,67	16,89%
46	312	3,29	3,34	2,75	3,66	3,26	0,38	11,58%
47	221	2,34	2,10	3,49	2,95	2,72	0,63	23,00%
48	222	4,23	4,24	3,22	4,80	4,12	0,66	15,96%

Tabela 42. Resultados relacionados com o parâmetro Ry. Pinus elliotti – Serramento circular.

Corpo #	Condição	1ª	2ª	3ª	4ª	Média	S	Coefficiente de variação
1	142	37,92	42,26	40,39	38,74	39,83	1,92	4,8%
2	111	20,85	16,03	20,78	18,01	18,92	2,34	12,3%
3	111	16,89	19,66	19,18	16,19	17,98	1,70	9,4%
4	342	35,72	23,80	26,46	21,32	26,83	6,29	23,5%
5	112	22,22	24,80	32,01	18,14	24,29	5,83	24,0%
6	231	22,41	19,31	24,24	33,20	24,79	5,96	24,1%
7	112	23,22	29,99	28,39	18,75	25,09	5,12	20,4%
8	242	32,14	20,75	18,89	22,24	23,51	5,92	25,2%
9	232	25,27	21,81	25,82	34,40	26,83	5,35	20,0%
10	131	24,17	24,13	22,00	22,07	23,09	1,22	5,3%
11	341	21,36	13,96	15,49	15,91	16,68	3,23	19,4%
12	341	32,13	26,23	19,01	24,14	25,38	5,43	21,4%
13	141	23,96	16,76	20,03	28,76	22,38	5,17	23,1%
14	141	17,57	26,56	27,72	20,92	23,19	4,78	20,6%
15	241	14,37	21,06	19,57	23,66	19,67	3,91	19,9%
16	241	27,03	17,23	22,97	30,32	24,39	5,64	23,1%
17	342	22,70	25,19	24,42	30,29	25,65	3,26	12,7%
18	142	21,74	20,36	19,88	19,77	20,44	0,91	4,4%
19	122	12,10	16,31	18,50	19,02	16,48	3,15	19,1%
20	121	10,14	11,36	16,69	11,69	12,47	2,89	23,2%
21	242	18,62	16,37	18,64	13,45	16,77	2,46	14,6%
22	211	15,42	27,24	21,83	23,95	22,11	4,98	22,5%
23	132	36,66	33,10	20,40	32,89	30,76	7,12	23,2%
24	132	30,78	42,29	30,31	23,14	31,63	7,92	25,0%
25	122	36,19	26,86	22,35	29,85	28,81	5,80	20,1%
26	211	22,61	16,45	14,54	15,89	17,37	3,58	20,6%
27	331	14,18	15,61	14,61	20,22	16,16	2,78	17,2%
28	121	25,87	20,90	22,61	17,82	21,80	3,36	15,4%
29	222	18,01	18,81	17,88	20,20	18,73	1,07	5,7%
30	232	13,02	11,87	20,51	15,61	15,25	3,84	25,2%
31	221	22,07	22,34	18,21	27,45	22,52	3,79	16,8%
32	312	16,50	20,20	15,20	17,60	17,38	2,12	12,2%
33	221	23,40	21,09	23,09	19,90	21,87	1,67	7,6%
34	222	19,09	17,60	18,79	20,20	18,92	1,07	5,6%
35	322	19,92	14,59	17,48	19,40	17,85	2,41	13,5%

36	331	16,30	18,49	15,50	19,45	17,44	1,84	10,6%
37	311	16,50	17,50	13,49	19,03	16,63	2,34	14,1%
38	321	21,21	19,28	19,20	19,20	19,72	0,99	5,0%
39	212	21,29	22,20	19,02	19,02	20,38	1,62	7,9%
40	212	19,20	18,20	15,40	19,90	18,18	1,98	10,9%
41	332	21,21	23,20	22,23	22,34	22,25	0,81	3,7%
42	322	21,09	20,10	23,20	22,87	21,82	1,47	6,7%
43	231	23,40	22,30	22,30	22,43	22,61	0,53	2,4%
44	332	20,30	19,20	21,10	22,30	20,73	1,31	6,3%
45	131	25,00	25,40	23,39	22,90	24,17	1,21	5,0%
46	311	17,60	17,60	13,49	18,79	16,87	2,32	13,8%
47	312	17,69	21,20	18,49	18,56	18,99	1,53	8,1%
48	321	19,10	19,20	22,20	21,09	20,40	1,51	7,4%

Tabela 54. Resultados relacionados com o parâmetro Ra. *Pinus elliottii* – Fresamento tangencial.

Corpo #	Condição	1ª	2ª	3ª	4ª	Média	S	Coefficiente de variação
1	142	5,17	5,80	5,32	8,03	6,08	1,33	21,83%
2	342	7,01	5,24	6,11	4,57	5,73	1,06	18,51%
3	231	7,93	7,03	7,91	4,80	6,92	1,47	21,24%
4	242	4,62	3,73	4,94	6,09	4,85	0,98	20,15%
5	232	6,12	4,00	3,61	3,61	4,33	1,21	27,83%
6	131	5,41	4,36	4,82	6,82	5,35	1,07	19,97%
7	341	4,81	3,79	6,06	3,86	4,63	1,06	22,90%
8	341	4,18	4,49	4,39	5,13	4,55	0,41	8,99%
9	141	4,08	2,85	3,17	3,58	3,42	0,53	15,56%
10	141	6,38	5,51	4,68	4,19	5,19	0,96	18,55%
11	131	5,15	5,25	6,81	4,36	5,39	1,03	19,02%
12	241	4,45	3,25	3,59	4,86	4,04	0,75	18,47%
13	241	4,37	5,51	5,35	4,34	4,89	0,62	12,76%
14	212	3,54	4,26	4,02	4,22	4,01	0,33	8,24%
15	342	3,00	4,53	4,62	5,25	4,35	0,95	21,95%
16	142	5,02	4,97	5,21	5,91	5,28	0,43	8,22%
17	122	3,20	3,70	3,73	2,97	3,40	0,38	11,04%
18	121	4,06	3,19	4,59	5,45	4,32	0,95	21,96%
19	322	3,15	3,35	3,28	2,94	3,18	0,18	5,67%
20	111	4,43	4,34	3,96	3,81	4,14	0,30	7,19%
21	312	3,24	4,15	3,27	3,91	3,64	0,46	12,59%
22	331	4,41	3,94	5,22	4,40	4,49	0,53	11,88%
23	321	2,14	2,15	2,28	2,68	2,31	0,25	10,95%
24	242	2,35	2,84	3,80	4,10	3,27	0,82	24,93%
25	211	2,10	2,13	2,65	2,73	2,40	0,33	13,87%
26	322	3,15	3,25	3,27	3,36	3,26	0,09	2,65%
27	132	5,05	5,39	3,98	3,37	4,45	0,94	21,04%
28	132	3,15	3,59	3,56	2,17	3,12	0,66	21,25%
29	122	2,98	5,24	4,97	5,05	4,56	1,06	23,25%
30	211	5,31	4,83	3,40	5,19	4,68	0,88	18,74%
31	332	5,65	5,25	5,29	5,19	5,35	0,21	3,85%
32	112	6,70	6,69	5,91	4,13	5,86	1,21	20,65%
33	311	2,35	3,15	2,57	2,87	2,73	0,35	12,78%
34	111	5,81	5,49	4,19	5,19	5,17	0,70	13,51%
35	112	5,02	4,00	4,19	6,26	4,87	1,03	21,14%

36	331	4,41	5,04	3,11	4,56	4,28	0,82	19,25%
37	332	5,01	6,15	4,40	5,30	5,22	0,73	13,93%
38	231	5,15	5,15	4,95	4,94	5,05	0,12	2,40%
39	311	2,12	2,35	2,27	2,58	2,33	0,19	8,27%
40	321	2,05	3,16	3,28	2,72	2,80	0,56	19,86%
41	121	4,41	2,95	4,50	3,57	3,86	0,74	19,08%
42	222	4,49	4,88	6,28	3,61	4,81	1,11	23,09%
43	232	3,22	2,96	2,58	4,51	3,32	0,84	25,23%
44	212	3,14	3,25	3,23	3,43	3,26	0,12	3,76%
45	221	5,03	3,87	4,58	3,61	4,27	0,65	15,25%
46	312	3,54	3,59	3,12	4,03	3,57	0,37	10,42%
47	221	2,59	2,35	3,84	3,30	3,02	0,68	22,43%
48	222	4,48	4,49	3,57	5,15	4,42	0,65	14,69%

Tabela 56. Resultados relacionados com o parâmetro Ry. Pinus elliotti – Fresamento tangencial.

Corpo #	Condição	1ª	2ª	3ª	4ª	média	S	Coefficiente de variação
1	111	21,10	16,28	21,03	18,26	19,17	2,34	12,19%
2	142	38,17	42,58	40,71	39,06	40,13	1,94	4,84%
3	111	17,14	19,91	19,43	16,44	18,23	1,70	9,32%
4	342	35,97	24,21	26,87	21,73	27,19	6,22	22,86%
5	112	22,47	25,08	32,29	18,42	24,57	5,83	23,75%
6	231	22,66	19,66	24,59	33,55	25,11	5,98	23,80%
7	112	23,47	30,27	28,67	19,03	25,36	5,12	20,20%
8	242	32,39	21,10	19,24	22,59	23,83	5,87	24,62%
9	232	25,52	22,16	26,17	34,75	27,15	5,36	19,75%
10	131	24,42	24,44	22,31	22,38	23,39	1,20	5,15%
11	341	21,61	14,37	15,90	16,32	17,05	3,16	18,51%
12	341	32,38	26,66	19,44	24,57	25,76	5,35	20,78%
13	141	24,21	17,08	20,35	29,08	22,68	5,17	22,78%
14	141	17,82	26,88	28,04	21,24	23,49	4,81	20,47%
15	241	14,62	21,41	19,92	24,01	19,99	3,96	19,81%
16	241	27,28	17,60	23,34	30,69	24,73	5,62	22,74%
17	342	22,95	25,62	24,85	30,72	26,03	3,32	12,75%
18	142	21,99	20,68	20,20	20,09	20,74	0,87	4,21%
19	122	12,35	16,59	18,78	19,30	16,76	3,16	18,89%
20	121	10,39	11,64	16,97	11,97	12,75	2,90	22,76%
21	242	18,87	16,74	19,01	13,82	17,11	2,43	14,19%
22	211	15,67	27,56	22,15	24,27	22,41	5,02	22,38%
23	132	36,91	33,41	20,71	33,20	31,06	7,10	22,88%
24	132	31,03	42,60	30,62	23,45	31,93	7,92	24,81%
25	122	36,44	27,14	22,63	30,13	29,09	5,79	19,90%
26	211	22,86	16,77	14,86	16,21	17,67	3,55	20,08%
27	331	14,43	16,00	15,00	20,61	16,51	2,81	17,02%
28	121	26,12	21,18	22,89	18,10	22,08	3,35	15,16%
29	222	18,26	19,16	18,23	20,55	19,05	1,09	5,71%
30	232	13,27	12,22	20,86	15,96	15,57	3,86	24,76%
31	221	22,32	22,69	18,56	27,80	22,84	3,80	16,62%
32	312	16,75	20,57	15,57	17,97	17,71	2,14	12,08%
33	221	23,65	21,44	23,44	20,25	22,19	1,64	7,37%
34	222	19,34	17,95	19,14	20,55	19,24	1,06	5,53%
35	322	20,17	14,97	17,86	19,78	18,20	2,38	13,05%

36	331	16,55	18,88	15,89	19,84	17,79	1,88	10,54%
37	311	16,75	17,87	13,86	19,40	16,97	2,34	13,79%
38	321	21,46	19,66	19,58	19,58	20,07	0,93	4,62%
39	212	21,54	22,53	19,35	19,35	20,70	1,60	7,74%
40	212	19,45	18,53	15,73	20,23	18,49	1,96	10,62%
41	332	21,46	23,60	22,63	22,74	22,61	0,88	3,89%
42	322	21,34	20,48	23,58	23,25	22,16	1,49	6,74%
43	231	23,65	22,65	22,65	22,78	22,93	0,48	2,11%
44	332	20,55	19,60	21,50	22,70	21,09	1,33	6,29%
45	131	25,25	25,71	23,70	23,21	24,47	1,20	4,91%
46	311	17,85	17,97	13,86	19,16	17,21	2,31	13,42%
47	312	17,94	21,57	18,86	18,93	19,33	1,56	8,09%
48	321	19,35	19,58	22,58	21,47	20,75	1,55	7,47%

Tabela 68. Resultados relacionados com o parâmetro Ra. MDF – Serramento circular.

Corpo #	Condição	1ª	2ª	3ª	4ª	Média	S	Coefficiente de variação
1	142	5,51	5,35	5,34	5,43	5,41	0,08	1,47%
2	342	5,46	5,65	5,45	5,42	5,50	0,10	1,91%
3	231	3,94	3,25	3,40	3,43	3,46	0,37	10,61%
4	242	5,32	5,32	5,43	6,09	5,54	0,37	6,72%
5	232	3,14	3,17	3,15	3,24	3,18	0,05	1,42%
6	131	3,32	3,21	3,12	3,14	3,20	0,09	2,82%
7	341	5,67	5,80	5,45	5,43	5,59	0,18	3,20%
8	341	5,56	5,55	5,46	5,43	5,50	0,06	1,18%
9	141	5,34	5,43	5,39	5,38	5,39	0,04	0,69%
10	141	5,43	5,34	5,34	5,23	5,34	0,08	1,53%
11	131	3,09	3,10	3,10	3,15	3,11	0,03	0,87%
12	241	5,10	5,12	5,23	5,14	5,15	0,06	1,11%
13	241	5,05	5,16	5,13	5,20	5,14	0,06	1,24%
14	212	4,54	4,30	4,22	4,34	4,35	0,14	3,13%
15	342	5,45	5,68	5,46	5,32	5,48	0,15	2,73%
16	142	5,03	5,49	5,35	5,38	5,31	0,20	3,72%
17	122	3,29	3,29	3,19	2,97	3,19	0,15	4,67%
18	121	3,33	3,35	3,43	3,45	3,39	0,06	1,74%
19	322	3,03	3,10	3,12	3,15	3,10	0,05	1,64%
20	111	4,56	4,34	3,96	3,81	4,17	0,34	8,25%
21	312	4,24	4,15	4,27	4,91	4,39	0,35	7,94%
22	331	3,00	3,01	3,09	2,99	3,02	0,05	1,51%
23	321	3,17	3,19	3,19	3,10	3,16	0,04	1,35%
24	242	5,01	5,32	5,13	5,14	5,15	0,13	2,48%
25	211	4,10	4,13	4,65	4,73	4,40	0,33	7,58%
26	322	3,18	3,19	3,19	3,18	3,19	0,01	0,18%
27	132	3,13	3,14	3,32	3,45	3,26	0,15	4,72%
28	132	3,19	3,59	3,56	3,27	3,40	0,20	5,95%
29	122	3,20	3,21	3,22	3,29	3,23	0,04	1,26%
30	211	4,13	4,24	4,40	4,19	4,24	0,12	2,73%
31	332	3,01	3,01	3,00	2,98	3,00	0,01	0,47%
32	112	5,00	4,99	4,89	4,33	4,80	0,32	6,64%
33	311	4,35	4,15	4,57	4,49	4,39	0,18	4,19%
34	111	4,81	4,49	4,29	4,99	4,65	0,31	6,77%
35	112	4,89	4,80	4,78	4,76	4,81	0,06	1,19%
36	331	3,56	3,09	3,14	3,19	3,25	0,21	6,59%

37	332	3,19	3,10	3,12	3,15	3,14	0,04	1,25%
38	231	3,54	3,25	3,33	3,03	3,29	0,21	6,41%
39	311	4,12	4,35	4,27	4,58	4,33	0,19	4,43%
40	321	3,19	3,19	3,22	3,12	3,18	0,04	1,33%
41	121	3,19	3,25	3,38	3,57	3,35	0,17	5,08%
42	222	3,00	3,12	3,11	3,13	3,09	0,06	1,96%
43	232	3,19	3,18	3,21	3,19	3,19	0,01	0,39%
44	212	4,14	4,24	4,20	4,40	4,25	0,11	2,62%
45	221	3,39	3,36	3,32	3,61	3,42	0,13	3,73%
46	312	4,54	4,59	4,12	4,44	4,42	0,21	4,77%
47	221	3,21	3,15	3,19	3,10	3,16	0,05	1,54%
48	222	3,35	3,31	3,12	3,19	3,24	0,11	3,28%

Tabela 70. Resultados relacionados com o parâmetro Ry. MDF – Serramento circular

Corpo #	Condição	1ª	2ª	3ª	4ª	média	S	Coefficiente de variação
1	111	20,20	21,27	22,85	19,81	21,03	1,36	6,46%
2	142	29,20	26,75	29,00	28,24	28,30	1,11	3,93%
3	111	22,31	22,23	24,24	26,20	23,74	1,88	7,93%
4	342	33,31	30,51	29,10	32,52	31,36	1,91	6,09%
5	112	25,92	24,95	25,35	22,95	24,79	1,29	5,21%
6	231	20,09	17,88	19,81	21,27	19,76	1,40	7,11%
7	112	25,81	24,24	24,94	25,47	25,11	0,68	2,73%
8	242	30,32	27,66	28,51	30,53	29,26	1,40	4,78%
9	232	16,64	15,85	16,16	16,85	16,37	0,45	2,77%
10	131	19,59	17,01	16,38	15,70	17,17	1,70	9,89%
11	341	33,45	30,74	28,78	28,51	30,37	2,28	7,52%
12	341	33,36	29,69	28,99	28,78	30,21	2,14	7,08%
13	141	27,23	26,61	28,94	27,98	27,69	1,01	3,63%
14	141	28,24	26,43	28,84	27,46	27,74	1,04	3,74%
15	241	28,05	26,11	27,14	27,76	27,27	0,86	3,14%
16	241	28,28	26,57	26,78	28,60	27,56	1,03	3,74%
17	342	33,79	30,96	29,32	32,45	31,63	1,93	6,09%
18	142	27,16	27,72	29,21	28,51	28,15	0,90	3,19%
19	122	18,75	17,11	15,44	15,63	16,73	1,54	9,20%
20	121	18,32	17,09	17,70	18,52	17,91	0,65	3,62%
21	242	29,06	27,93	27,09	25,91	27,50	1,33	4,85%
22	211	22,55	21,06	25,53	25,54	23,67	2,24	9,45%
23	132	19,09	16,96	17,63	17,60	17,82	0,90	5,08%
24	132	19,78	19,57	19,02	16,84	18,80	1,35	7,16%
25	122	18,56	16,85	17,17	15,94	17,13	1,09	6,34%
26	211	23,13	21,84	24,29	23,05	23,07	1,00	4,34%
27	331	16,50	15,35	17,15	15,88	16,22	0,78	4,80%
28	121	17,86	16,74	18,44	18,42	17,87	0,80	4,47%
29	222	18,30	16,85	15,58	18,78	17,38	1,45	8,36%
30	232	17,23	16,06	16,56	16,91	16,69	0,50	2,99%
31	221	20,00	17,81	18,63	20,91	19,34	1,39	7,17%
32	312	25,86	22,41	22,93	25,19	24,10	1,69	6,99%
33	221	19,26	16,85	17,99	18,29	18,10	0,99	5,48%
34	222	20,77	18,04	16,56	19,46	18,71	1,81	9,70%
35	322	16,06	15,50	17,13	16,54	16,31	0,69	4,25%
36	331	19,94	16,29	17,52	16,27	17,50	1,72	9,85%

37	311	25,67	22,00	24,27	22,76	23,67	1,63	6,88%
38	321	16,17	15,63	17,32	16,09	16,30	0,72	4,41%
39	212	25,88	22,36	23,42	24,30	23,99	1,49	6,20%
40	212	24,01	22,26	23,44	25,08	23,70	1,18	4,96%
41	332	17,16	15,65	16,83	15,35	16,25	0,88	5,43%
42	322	17,17	16,11	17,61	16,79	16,92	0,64	3,76%
43	231	18,41	16,09	16,98	15,45	16,73	1,28	7,66%
44	332	18,50	16,28	17,60	16,38	17,19	1,06	6,18%
45	131	18,54	16,59	16,37	15,91	16,85	1,16	6,89%
46	311	24,72	23,27	22,80	23,36	23,54	0,83	3,51%
47	312	26,76	25,02	22,25	22,91	24,23	2,06	8,49%
48	321	16,59	15,79	17,58	16,29	16,56	0,76	4,56%

Tabela 81. Resultados relacionados com o parâmetro Ra. MDF – Fresamento tangencial.

Corpo #	Condição	1ª	2ª	3ª	4ª	Média	S	Coefficiente de variação
1	142	3,90	3,57	3,34	3,43	3,56	0,24	6,85%
2	342	3,45	4,09	3,45	3,42	3,60	0,33	9,03%
3	231	3,94	3,39	3,41	3,43	3,54	0,27	7,49%
4	242	5,32	5,52	5,43	6,09	5,59	0,34	6,17%
5	232	3,14	2,60	3,15	3,24	3,03	0,29	9,62%
6	131	2,35	2,33	2,21	2,22	2,28	0,07	3,21%
7	341	3,94	3,20	3,85	3,84	3,71	0,34	9,22%
8	341	3,56	3,85	3,86	3,84	3,78	0,15	3,85%
9	141	3,78	3,77	3,81	3,80	3,79	0,02	0,54%
10	141	3,84	3,55	3,78	3,70	3,72	0,12	3,36%
11	131	2,18	2,50	2,20	2,23	2,28	0,15	6,54%
12	241	5,10	5,24	5,70	5,63	5,42	0,29	5,41%
13	241	5,05	5,30	5,63	5,68	5,42	0,30	5,47%
14	212	4,54	4,04	4,22	4,34	4,29	0,21	4,90%
15	342	4,67	4,59	5,46	5,32	5,01	0,44	8,86%
16	142	3,56	3,76	3,35	3,38	3,51	0,19	5,38%
17	122	2,33	2,29	2,36	2,45	2,36	0,07	2,91%
18	121	2,35	2,35	2,43	2,44	2,39	0,05	1,95%
19	322	3,71	3,10	3,12	3,15	3,27	0,29	9,01%
20	111	3,13	3,07	3,53	3,69	3,35	0,30	9,00%
21	312	3,19	3,56	3,27	3,91	3,48	0,33	9,37%
22	331	3,67	3,69	3,18	3,11	3,41	0,31	9,10%
23	321	3,88	3,19	3,26	3,19	3,38	0,34	9,94%
24	242	5,01	5,52	5,13	5,14	5,20	0,22	4,26%
25	211	4,10	4,09	4,29	4,24	4,18	0,10	2,40%
26	322	3,18	3,19	3,19	3,18	3,19	0,01	0,18%
27	132	2,21	2,55	2,32	2,45	2,38	0,15	6,18%
28	132	2,26	2,40	2,56	2,77	2,50	0,22	8,84%
29	122	2,26	2,21	2,22	2,29	2,25	0,04	1,66%
30	211	4,13	4,20	4,11	4,96	4,35	0,41	9,39%
31	332	3,69	3,69	3,56	3,98	3,73	0,18	4,78%
32	112	3,53	3,53	3,89	4,33	3,82	0,38	9,97%
33	311	3,33	3,63	3,23	3,17	3,34	0,20	6,06%
34	111	3,40	3,17	3,03	3,53	3,28	0,22	6,77%
35	112	3,46	3,39	3,78	3,76	3,60	0,20	5,57%
36	331	3,36	3,78	3,22	3,26	3,41	0,26	7,54%

37	332	3,91	3,80	3,32	3,43	3,61	0,28	7,84%
38	231	3,54	3,37	3,35	3,14	3,35	0,16	4,89%
39	311	3,05	3,08	3,02	3,24	3,10	0,10	3,16%
40	321	3,31	3,09	3,28	3,21	3,22	0,10	3,03%
41	121	2,26	2,25	2,39	2,53	2,36	0,13	5,58%
42	222	3,00	3,12	3,11	3,13	3,09	0,06	1,96%
43	232	3,19	3,29	3,21	3,19	3,22	0,05	1,48%
44	212	4,14	4,00	4,20	4,40	4,19	0,17	3,97%
45	221	3,39	3,36	3,55	3,56	3,47	0,10	3,02%
46	312	4,46	4,15	4,12	4,44	4,29	0,18	4,25%
47	221	3,21	3,15	3,26	3,19	3,20	0,05	1,43%
48	222	3,35	3,31	3,12	3,19	3,24	0,11	3,28%

Tabela 83. Resultados relacionados com o parâmetro Ry. MDF – Fresamento tangencial.

Corpo #	Condição	1ª	2ª	3ª	4ª	média	S	Coefficiente de variação
1	111	21,10	16,28	21,03	18,26	19,17	2,34	12,19%
2	142	38,17	42,58	40,71	39,06	40,13	1,94	4,84%
3	111	17,14	19,91	19,43	16,44	18,23	1,70	9,32%
4	342	35,97	24,21	26,87	21,73	27,19	6,22	22,86%
5	112	22,47	25,08	32,29	18,42	24,57	5,83	23,75%
6	231	22,66	19,66	24,59	33,55	25,11	5,98	23,80%
7	112	23,47	30,27	28,67	19,03	25,36	5,12	20,20%
8	242	32,39	21,10	19,24	22,59	23,83	5,87	24,62%
9	232	25,52	22,16	26,17	34,75	27,15	5,36	19,75%
10	131	24,42	24,44	22,31	22,38	23,39	1,20	5,15%
11	341	21,61	14,37	15,90	16,32	17,05	3,16	18,51%
12	341	32,38	26,66	19,44	24,57	25,76	5,35	20,78%
13	141	24,21	17,08	20,35	29,08	22,68	5,17	22,78%
14	141	17,82	26,88	28,04	21,24	23,49	4,81	20,47%
15	241	14,62	21,41	19,92	24,01	19,99	3,96	19,81%
16	241	27,28	17,60	23,34	30,69	24,73	5,62	22,74%
17	342	22,95	25,62	24,85	30,72	26,03	3,32	12,75%
18	142	21,99	20,68	20,20	20,09	20,74	0,87	4,21%
19	122	12,35	16,59	18,78	19,30	16,76	3,16	18,89%
20	121	10,39	11,64	16,97	11,97	12,75	2,90	22,76%
21	242	18,87	16,74	19,01	13,82	17,11	2,43	14,19%
22	211	15,67	27,56	22,15	24,27	22,41	5,02	22,38%
23	132	36,91	33,41	20,71	33,20	31,06	7,10	22,88%
24	132	31,03	42,60	30,62	23,45	31,93	7,92	24,81%
25	122	36,44	27,14	22,63	30,13	29,09	5,79	19,90%
26	211	22,86	16,77	14,86	16,21	17,67	3,55	20,08%
27	331	14,43	16,00	15,00	20,61	16,51	2,81	17,02%
28	121	26,12	21,18	22,89	18,10	22,08	3,35	15,16%
29	222	18,26	19,16	18,23	20,55	19,05	1,09	5,71%
30	232	13,27	12,22	20,86	15,96	15,57	3,86	24,76%
31	221	22,32	22,69	18,56	27,80	22,84	3,80	16,62%
32	312	16,75	20,57	15,57	17,97	17,71	2,14	12,08%
33	221	23,65	21,44	23,44	20,25	22,19	1,64	7,37%
34	222	19,34	17,95	19,14	20,55	19,24	1,06	5,53%
35	322	20,17	14,97	17,86	19,78	18,20	2,38	13,05%
36	331	16,55	18,88	15,89	19,84	17,79	1,88	10,54%

37	311	16,75	17,87	13,86	19,40	16,97	2,34	13,79%
38	321	21,46	19,66	19,58	19,58	20,07	0,93	4,62%
39	212	21,54	22,53	19,35	19,35	20,70	1,60	7,74%
40	212	19,45	18,53	15,73	20,23	18,49	1,96	10,62%
41	332	21,46	23,60	22,63	22,74	22,61	0,88	3,89%
42	322	21,34	20,48	23,58	23,25	22,16	1,49	6,74%
43	231	23,65	22,65	22,65	22,78	22,93	0,48	2,11%
44	332	20,55	19,60	21,50	22,70	21,09	1,33	6,29%
45	131	25,25	25,71	23,70	23,21	24,47	1,20	4,91%
46	311	17,85	17,97	13,86	19,16	17,21	2,31	13,42%
47	312	17,94	21,57	18,86	18,93	19,33	1,56	8,09%
48	321	19,35	19,58	22,58	21,47	20,75	1,55	7,47%