

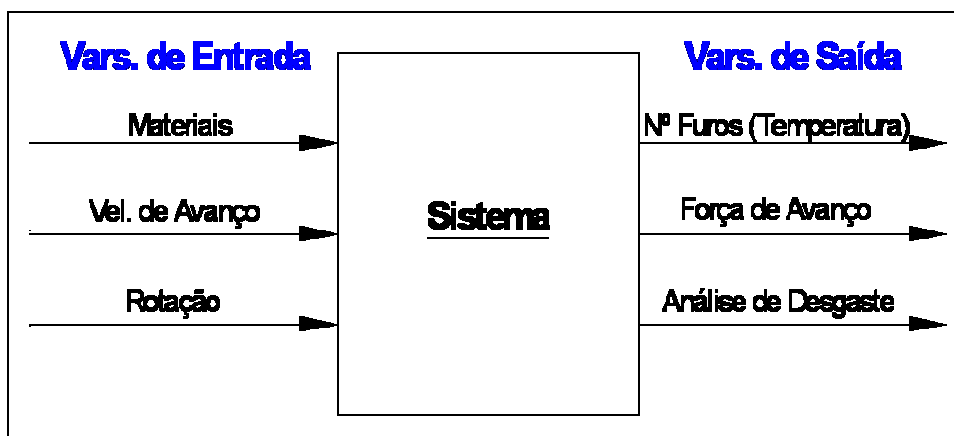


Figura 3.13: Sistema do estudo.

Os fatores dos planejamentos fatoriais foram variados em dois níveis -1 e +1. A Tabela 3.14 mostra os valores dos níveis com seus respectivos códigos.

Tabela 3.14: Descrição dos níveis dos fatores.

Fatores	Valores	Códigos	Valores	Códigos
Materiais	316L ou Zircônia	-1	M340	+1
Vel. Avanço (vf)	24 mm/min	-1	45 mm/min	+1
Rotação (n)	1000 rpm	-1	2500 rpm	+1

Da Tabela 3.14 pode se notar que existe uma variável qualitativa (materiais) e duas quantitativas (velocidade de avanço e rotação).

A Tabela 3.15 apresenta o primeiro Planejamento Fatorial 2^3 .

Tabela 3.15: Primeiro planejamento fatorial 2^3 .

Testes	Material	Vel. Avanço [mm/min]	Rotação [rpm]
1	316L	24	1000
2	M340	24	1000
3	316L	45	1000
4	M340	45	1000
5	316L	24	2500
6	M340	24	2500
7	316L	45	2500
8	M340	45	2500

A Tabela 3.16 mostra o segundo Planejamento Fatorial 2^3 .

Tabela 3.16: Segundo planejamento fatorial 2^3 .

Testes	Material	Vel. Avanço [mm/min]	Rotação [rpm]
1	ZrO ₂	24	1000
2	M340	24	1000
3	ZrO ₂	45	1000
4	M340	45	1000
5	ZrO ₂	24	2500
6	M340	24	2500
7	ZrO ₂	45	2500
8	M340	45	2500

Após os dois Planejamentos Fatoriais 2^3 , foi executado um Planejamento Composto Central com o melhor material de ferramenta testado, ou seja, aquele que teve a capacidade de fazer mais furos. O objetivo deste teste, através de técnica de superfície de resposta, foi procurar valores das variáveis de entrada que pudessem maximizar ou minimizar a resposta.

Os fatores quantitativos foram variados em níveis -1, +1, $-\alpha = -1,14744$, $+\alpha = +1,14744$ e 0 (zero). A Tabela 3.17 mostra os valores dos níveis com seus respectivos códigos.

Tabela 3.17: Descrição dos níveis dos fatores do PCC.

	Fatores	
	Vel. Avanço [mm/min]	Rotação [rpm]
Valores	24	1000
Códigos	-1	-1
Valores	45	2500
Códigos	+1	+1
Valores	22,5	889
Códigos	$-\alpha$	$-\alpha$
Valores	46,5	2611
Códigos	$+\alpha$	$+\alpha$
Valores	34,5	1750
Códigos	0	0

A Tabela 3.18 apresenta o Planejamento Composto Central.

Tabela 3.18: Planejamento composto central.

Testes	Material	Vel. Avanço [mm/min]	Rotação [rpm]
1	M340	24	1000
2	M340	24	2500
3	M340	45	1000
4	M340	45	2500
5	M340	22,5	1750
6	M340	46,5	1750
7	M340	34,5	889
8	M340	34,5	2611
9 (C)	M340	34,5	1750
10 (C)	M340	34,5	1750
11 (C)	M340	34,5	1750

Ao longo de todo o trabalho, os termos referentes aos parâmetros de usinagem serão velocidade de avanço e rotação, pois estes são os nomes que mais se aproximam com o que é usado em implantodontia. Entretanto, a Tab. 3.19 relaciona as variáveis de entrada com avanço e velocidade de corte.

Tabela 3.19: Relações entre parâmetros de usinagem.

Vel. Avanço [mm/min]	Avanço [mm/rev]	Rotação [rpm]	Vel. Corte [m/min]	
			Ø 2 mm	Ø 3 mm
24	0,0240	1000	6,28	9,42
45	0,0450	1000	6,28	9,42
24	0,0096	2500	15,71	23,56
45	0,0180	2500	15,71	23,56
22,5	0,0129	1750	11,00	16,49
46,5	0,0266	1750	11,00	16,49
34,5	0,0388	889	5,59	8,38
34,5	0,0132	2611	16,41	24,61
34,5	0,0197	1750	11,00	16,49

3.5. Ensaios Complementares

Foram feitos dois ensaios que completam o estudo. Um relativo à identificação de algumas propriedades do osso e o outro de inserção de implantes. Ambos serão descritos na sequência.

3.5.1. Identificação de propriedades do osso

O objetivo deste teste foi determinar a densidade do osso cortical (propriedade física), a tensão máxima de ruptura e o módulo de elasticidade em um ensaio de compressão (propriedades mecânicas), comparando assim, com as propriedades do osso humano obtidas por referência bibliográfica.

3.5.1.1. Materiais

- Osso cortical na forma cilíndrica → Tíbia bovina;
- Bit de aço rápido ao W-Co;
- Bedame de aço rápido ao W-Co.

3.5.1.2. Equipamentos

- Torno convencional → IMOR 520II, fabricado pela Romi® (Santa Bárbara d'Oeste/BRA);
- Balança → OHAUS PRECISION Plus Model TP2KS, fornecida pela ALEMMAR comércio e industrial S.A. (São Paulo/BRA);
- Máquina universal de teste → MTS 810, fabricada pela MTS Systems Corporation (Eden Prairie/USA).

3.5.1.3. Métodos

Como não foram encontradas normas que padronizassem ensaios para a determinação de propriedades mecânicas em osso, a metodologia baseou-se em artigos sobre o tema. Dentre eles podem se citar Mikhael et al. (2008), Kunkel et al. (2008) e Kopperdhal e Keaveny (1998), como mais relevantes.

Seis corpos-de-prova cilíndricos de osso cortical foram obtidos da diáfise de uma tíbia bovina. Para tanto, as amostras passaram primeiro por um processo de torneamento cilíndrico, para se atingir o diâmetro desejável. Em seguida, foi feito um torneamento radial para cortar os corpos-de-prova, e finalmente, um faceamento para deixar as faces dos cilindros planas. Após a preparação dos corpos-de-prova, eles foram resfriados até o dia do teste. A Figura 3.14 ilustra uma amostra.



Figura 3.14: Corpo-de-prova para o ensaio de compressão.

A Tabela 3.20 mostra a dimensão dos corpos-de-prova.

Tabela 3.20: Dimensão dos CPs.

Diâmetro [mm]	Comprimento [mm]
$7,48 \pm 0,07$	$7,90 \pm 0,45$

No dia do ensaio de compressão, as amostras foram trazidas à temperatura ambiente em torno de 22°C, medida as massas e ensaiadas sobre uma plataforma da Máquina Universal de Teste. A velocidade de aplicação da carga foi de 0,2 mm/min e a taxa de aquisição de 0,2 segundos. A Figura 3.15 mostra o aparato do ensaio.

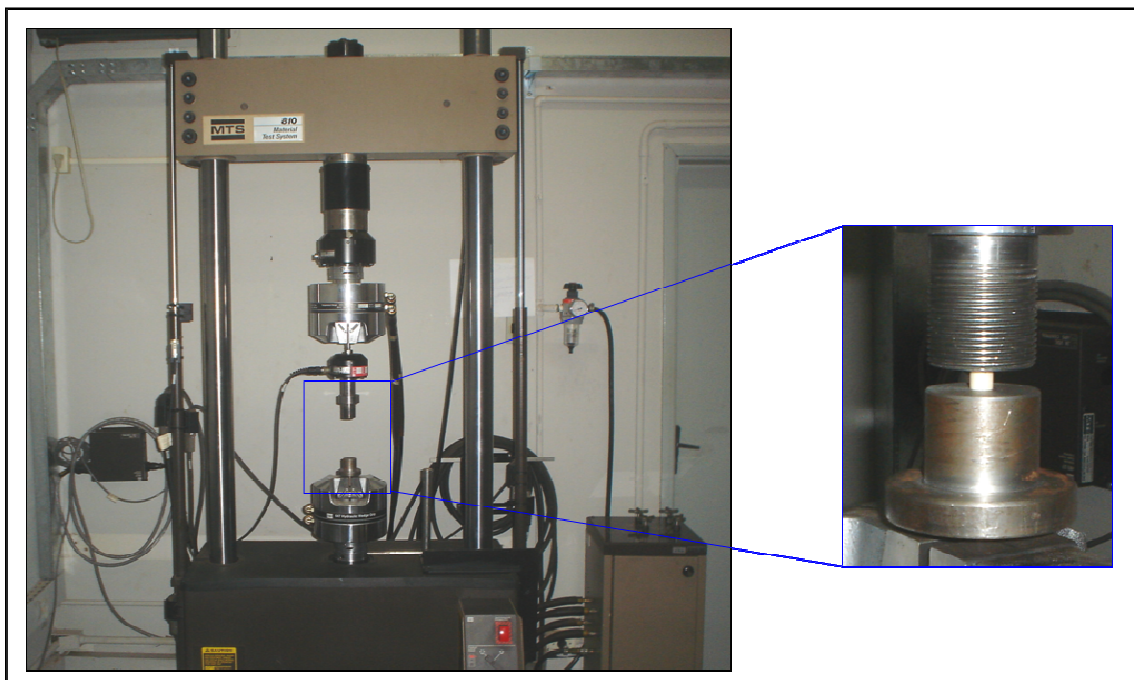


Figura 3.15: Máquina de ensaio universal, em detalhe ensaio de compressão em osso cortical.

3.5.2. Ensaio de inserção

O intuito desse teste foi verificar se existia diferença na inserção do implante em alojamentos ósseos abertos em uma dada condição de corte com um kit de brocas novas e com um kit de brocas desgastadas, já utilizadas no ensaio de usinagem.

3.5.2.1. Materiais

- Osso → Tíbia bovina;
- Implante → Implante Ultra Rosqueante Ø4,0 x 10 mm (SUR 4010), fornecida pela SIN (São Paulo/BRA).

3.5.2.2. Característica do material

- **Titânio comercialmente puro (Donachie, 1988):**

a) Composição química (%):

Os implantes são fabricados de titânio com pureza entre 98 e 99,5%.

b) Características gerais:

- Baixa densidade;
- Elevado ponto de fusão;
- Baixa condutividade térmica;
- Baixo módulo de elasticidade;
- Reatividade química com materiais de ferramenta de usinagem em condições atmosféricas;
- Excelente resistência à corrosão;
- Biocompatibilidade.

A Tabela 3.21 apresenta algumas propriedades físicas e mecânicas do titânio comercialmente puro (Ti CP).

Tabela 3.21: Propriedades físicas e mecânicas do Ti CP.

Grandeza	Valor
Densidade [g/cm ³]	4,507
Ponto de fusão [°C]	1668
Módulo de elasticidade [GPa]	116
Limite de resistência a tração [MPa]	550

c) Principais aplicações:

- Implantes;
- Próteses;
- Instrumentos cirúrgicos;
- Indústria aeronáutica, naval e química.

3.5.2.3. Equipamentos

- Máquina-ferramenta → Centro de Usinagem CNC Discovery 760C Bridgeport, com potência do motor principal de 9 KW e rotação máxima de 10.000 rpm, fabricada pela ROMI[®] S.A. (Santa Bárbara d'Oeste/BRA);
- Unidade fresadora → Motor SIN MSIN, fabricada pela SIN (São Paulo/BRA).

3.5.2.4. Métodos

Foram feitos na máquina-ferramenta CNC, seis sítios no corpo-de-prova ósseo, na condição de corte em que foi conseguido o maior número de furos. Três deles foram feitos com um kit de brocas novas e o restante com um kit de brocas desgastadas. Preparada a amostra, a mesma foi retornada ao “freezer”.

No dia do ensaio, o corpo-de-prova foi trazido à temperatura ambiente e com o auxílio da unidade fresadora fez-se a inserção de um implante nos alvéolos abertos com brocas velhas e com outro implante a inserção naqueles feitos com brocas novas. O monitoramento foi feito a partir do quanto o implante penetrou nos alvéolos. Os parâmetros configurados na unidade fresadora para inserção foi 14 rpm e 50 N.cm. A Figura 3.16 ilustra o ensaio.

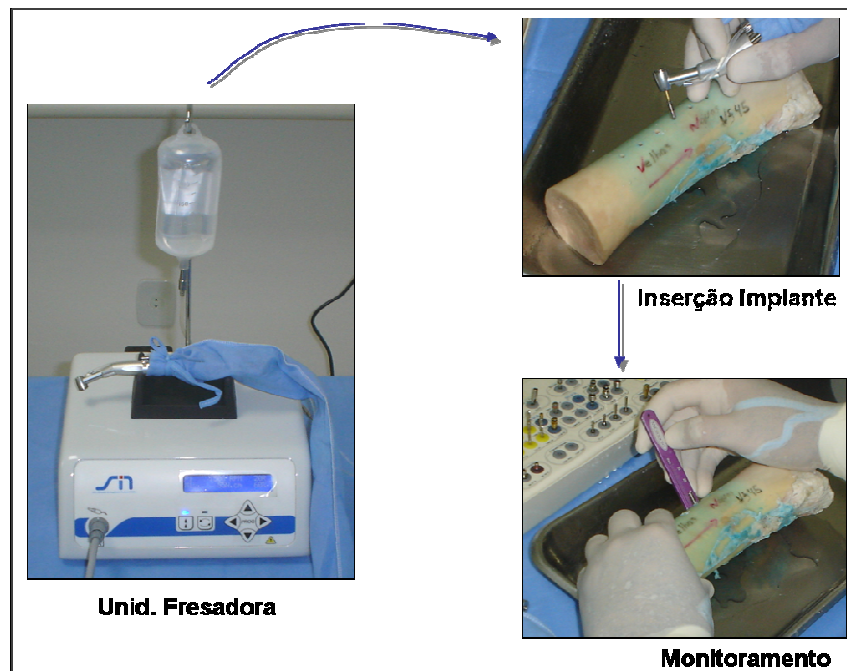


Figura 3.16: Ilustração do ensaio de inserção.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresentará preliminarmente os resultados dos ensaios de adequação e pré-testes, em seguida abordará e discutirá amplamente o ensaio de usinagem. Finalmente, serão apresentados os resultados complementares.

4.1. Resultados dos Ensaios de Adequação

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios: de calibração, comparativo de refrigeração e de oxidação.

4.1.1. Resultados do ensaio de calibração dos termopares

A Tabela 4.1 apresenta os resultados de calibração dos três termopares utilizados nos ensaios.

Em seguida, são plotadas as três curvas de calibração, respectivamente, para cada termopar em função da temperatura média de resposta, Gráf. 4.1, 4.2 e 4.3. Também são definidas as equações de reta para cada termopar e os índices de correlação das mesmas, Eq. (4.1), (4.2) e (4.3).

Tabela 4.1: Resultados de calibração dos termopares.

Banho temp. real [°C]	Termopar 1 [°C]			Média T1 [°C]	Termopar 2 [°C]			Média T2 [°C]	Termopar 3 [°C]			Média T3 [°C]
15	12,2	11,6		11,90	12,2	11,6		11,90	12,1	11,6		11,85
16	13,5	12,8		13,15	13,4	12,8		13,10	13,4	12,8		13,10
17	14,7	14,1		14,40	14,7	14,0		14,35	14,6	14,0		14,30
18	15,9	15,2		15,55	15,9	15,2		15,55	15,9	15,2		15,55
19	17,1	16,5		16,80	17,0	16,5		16,75	17,0	16,5		16,75
20	18,2	17,5		17,85	18,2	17,4		17,80	18,2	17,4		17,80
21	19,4	18,8		19,10	19,4	18,8		19,10	19,4	18,8		19,10
22	20,6	20,1	21,2	20,63	20,6	20,0	21,2	20,60	20,6	20,0	21,2	20,60
23	21,8	22,4		22,10	21,8	22,4		22,10	21,8	22,4		22,10
24	23,0	23,7		23,35	23,0	23,7		23,35	23,0	23,7		23,35
25	24,2	25,1		24,65	24,2	25,1		24,65	24,2	25,0		24,60
26	25,3	26,2		25,75	25,3	26,2		25,75	25,3	26,2		25,75
27	26,5	27,4		26,95	26,5	27,4		26,95	26,5	27,4		26,95
28	27,7	28,5		28,10	27,7	28,5		28,10	27,7	28,5		28,10
29	28,9	29,7		29,30	28,9	29,7		29,30	28,9	29,7		29,30
30	30,2	30,1		30,15	30,1	30,1		30,10	30,1	30,1		30,10
31	31,4	31,4		31,40	31,4	31,4		31,40	31,3	31,4		31,35
32	32,5	32,5		32,50	32,5	32,5		32,50	32,5	32,5		32,50
33	33,8	33,8		33,80	33,8	33,7		33,75	33,7	33,7		33,70
34	35,0	35,9	35,0	35,30	35,0	35,0	35,9	35,30	35,0	35,0		35,00
35	37,0	36,1		36,55	37,0	36,1		36,55	37,0	36,1		36,55
36	38,1	37,3		37,70	38,1	37,3		37,70	38,1	37,3		37,70
37	39,2	38,6		38,90	39,2	38,5		38,85	39,2	38,5		38,85
38	40,4	39,7		40,05	40,4	39,7		40,05	40,4	39,7		40,05
39	41,5	40,9		41,20	41,5	40,9		41,20	41,5	40,9		41,20
40	42,6	41,9	42,1	42,20	42,6	41,9	42,0	42,17	42,6	41,9	42,1	42,20
41	43,7	43,3	43,3	43,43	43,7	43,3	43,3	43,43	43,7	43,3	43,3	43,43
42	44,9	44,6	44,5	44,67	44,9	44,6	44,5	44,67	44,9	44,6	44,5	44,67
43	46,1	46,0		46,05	46,1	45,9		46,00	46,1	45,9		46,00
44	47,3	47,2		47,25	47,3	47,2		47,25	47,3	47,2		47,25
45	48,5	48,6		48,55	48,5	48,6		48,55	48,5	48,6		48,55
46	49,7	49,9		49,80	49,7	49,8		49,75	49,7	49,8		49,75
47	50,8	51,1		50,95	50,8	51,1		50,95	50,8	51,1		50,95
48	52,0	52,4		52,20	52,0	52,4		52,20	52,0	52,4		52,20
49	53,2	53,6		53,40	53,2	53,6		53,40	53,2	53,6		53,40
50	54,4	54,0		54,20	54,4	54,0		54,20	54,4	54,0	54,8	54,40
51	55,7	55,2		55,45	55,7	55,2		55,45	55,7	55,2	56,1	55,67
52	56,9	56,4		56,65	56,9	56,4		56,65	56,9	56,4		56,65
53	58,2	58,8		58,50	58,2	58,8		58,50	58,2	58,8		58,50
54	59,4	60,0		59,70	59,4	60,0		59,70	59,4	60,0		59,70
55	60,6	61,2		60,90	60,6	61,2		60,90	60,7	61,2		60,95
56	61,8	62,3		62,05	61,8	62,3		62,05	61,8	62,3		62,05
57	63,0	63,5		63,25	63,0	63,5		63,25	63,0	63,5		63,25
58	64,1			64,10	64,1			64,10	64,2			64,20
59	65,3			65,30	65,3			65,30	65,3			65,30
60	66,4			66,40	66,4			66,40	66,5			66,50

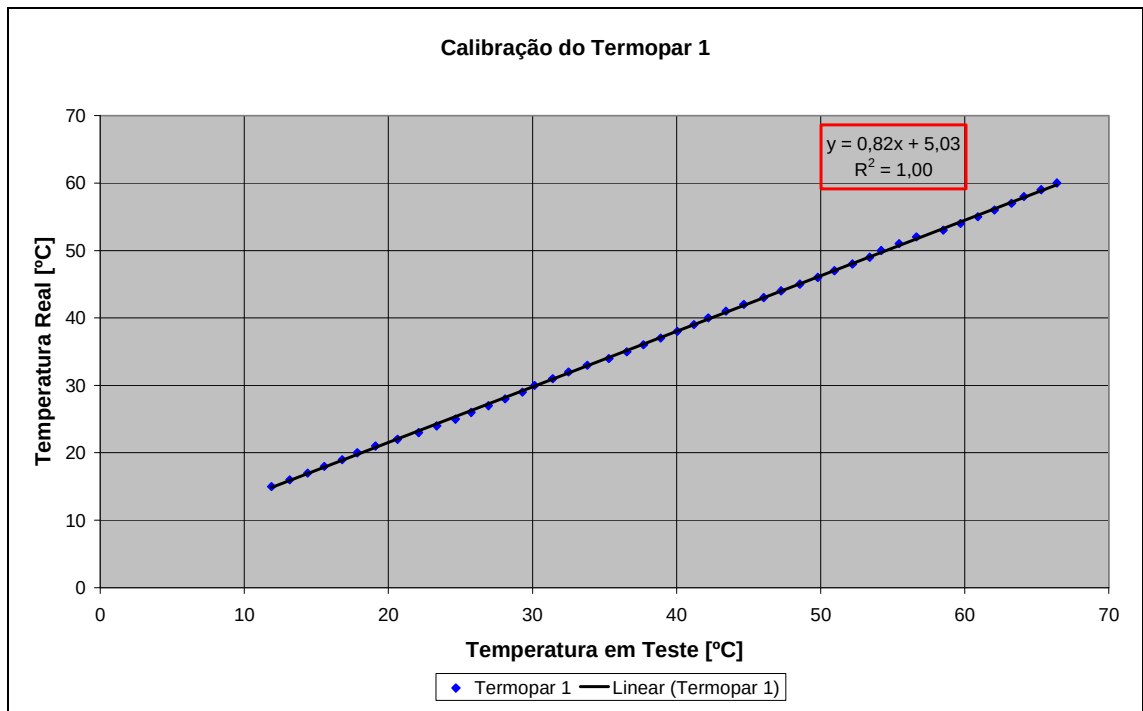


Gráfico 4.1: Curva de calibração para o Termopar 1.

Equação da reta (T1) e índice de correlação: $y = 0,82x + 5,03$ $R^2 = 1$ (4.1).

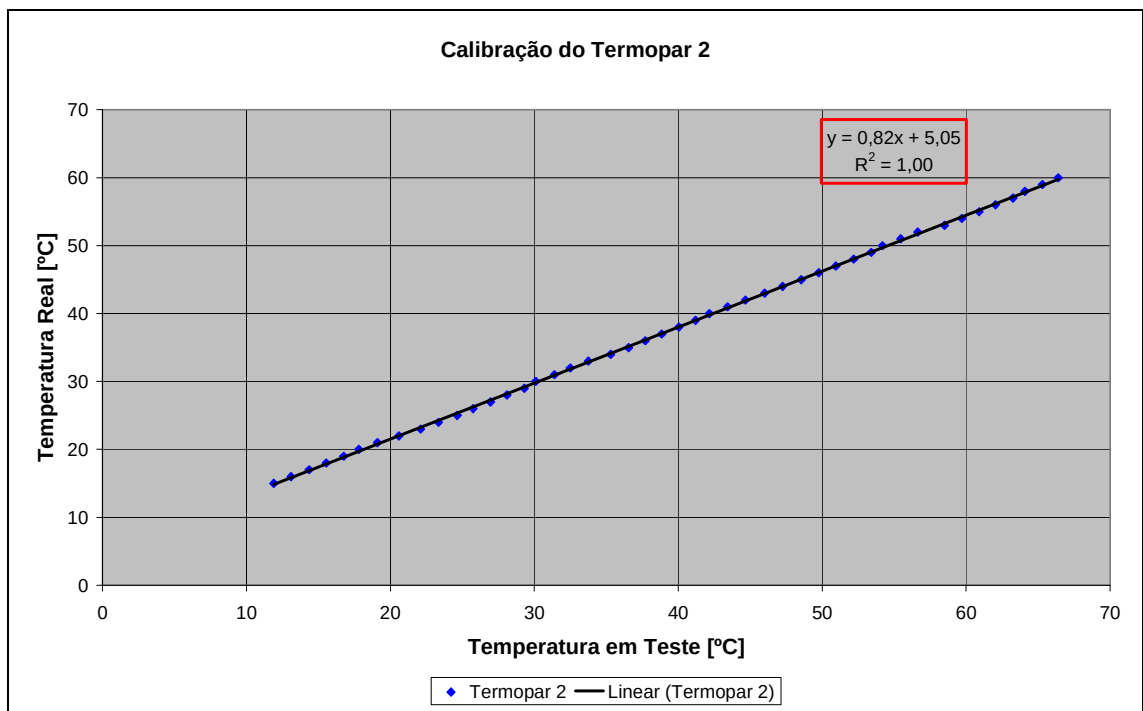


Gráfico 4.2: Curva de calibração para o Termopar 2.

Equação da reta (T2) e índice de correlação: $y = 0,82x + 5,05$ $R^2 = 1$ (4.2).

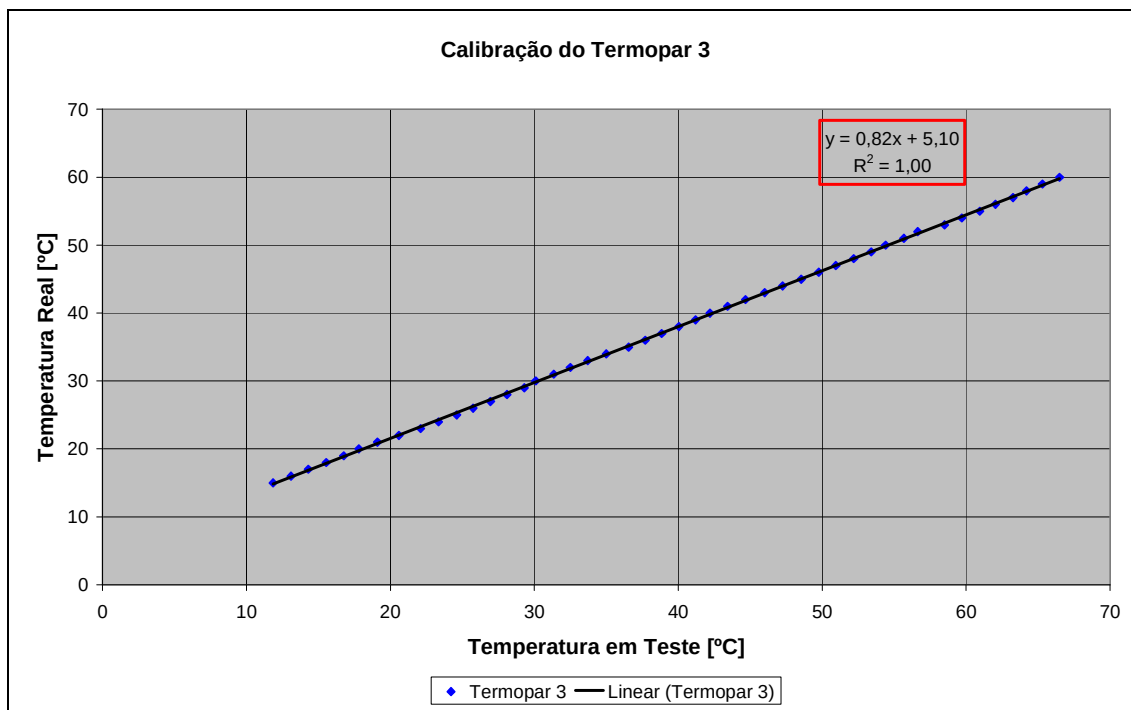


Gráfico 4.3: Curva de calibração para o Termopar 3.

Equação da reta (T3) e índice de correlação: $y = 0,82x + 5,10$ $R^2 = 1$ (4.3).

4.1.2. Resultado do ensaio comparativo de refrigeração

O objetivo deste ensaio é verificar se o soro fisiológico pode ser substituído por um fluido com a mesma capacidade de refrigeração. Para cada ensaio registrado pela unidade de aquisição de dados foi verificada uma curva de diminuição da temperatura em função do tempo com características iguais à mostrada no Gráf. 4.4. Pelo gráfico, a curva azul representa a temperatura do termopar inserido no corpo-de-prova e imerso para o resfriamento na bacia com solução a 20% de fluido de arrefecimento. A curva vermelha representa a temperatura do termopar inserido no outro corpo-de-prova e imerso na bacia com soro fisiológico. Durante todos os ensaios foi verificada uma diferença de temperatura entre as amostras no intervalo de 56 a 20°C, como realçado em detalhe.

A máxima diferença de temperatura no decaimento para os testes está representada no Gráf. 4.5.

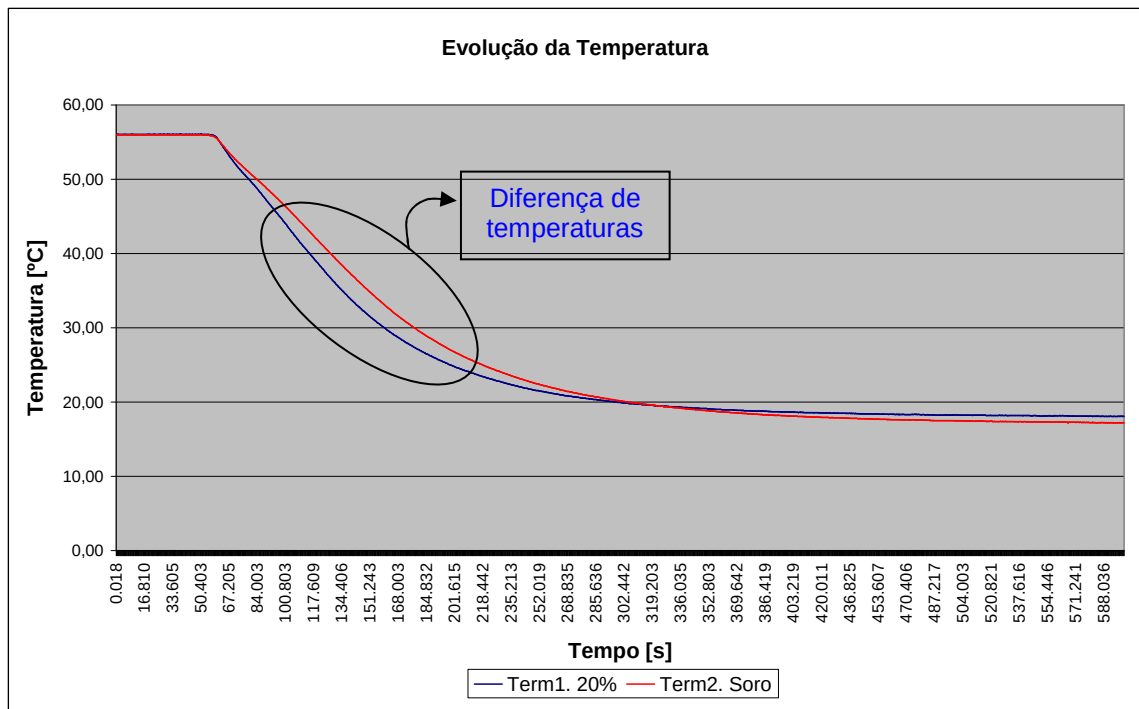


Gráfico 4.4: Evolução do resfriamento dos corpos-de-prova imersos em solução a 20% de fluido de arrefecimento e soro (Teste 4), respectivamente.

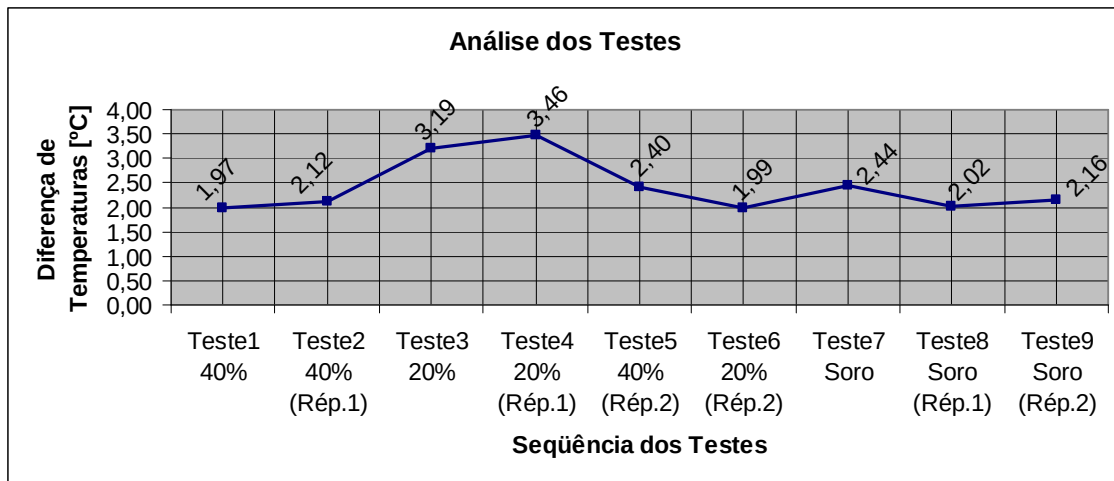


Gráfico 4.5: Máxima diferença de temperatura entre as curvas de resfriamento em relação à do soro fisiológico encontrada em cada teste.

Do Gráfico 4.5 pode-se apreender que para todos os testes, inclusive quando os corpos-de-prova foram resfriados no mesmo fluido (soro e soro), houve diferença entre as temperaturas. Isso implica, principalmente baseando-se nos Testes 7, 8 e 9, que a diferença é devido a não homogeneidades construtivas dos mesmos.

A justificativa dos resultados está apresentada na Tab. 4.2, na qual se tem uma análise estatística de variância com 95% de confiabilidade para os resultados de diferença

de temperaturas. Dela pode-se compreender que não existe diferença significativa entre os valores do tratamento ($p \gg 0,05$). E isso quer dizer que os fluidos testados trabalharam resfriando o corpo-de-prova da mesma maneira.

Tabela 4.2: Quadro de Anova (análise de variância).

Anova One Way					
	SQ	G.L.	QM	F	p
Média	52,5915	1	52,5915	224,2843	0,000006
Tratamento	0,97013	2	0,48506	2,0686	0,207344
Erro	1,40692	6	0,23449		

4.1.3. Resultado do ensaio de oxidação

Quanto aos resultados do ensaio de oxidação, a Fig. 4.1, apresenta os resultados obtidos. Cada linha da disposição, conforme citado no Capítulo 3 – Procedimento Experimental, representa o período de tempo de 2 até 24 horas de exposição das amostras aos fluidos, no sentido de cima para baixo, respectivamente. E cada coluna representa os fluidos testados, da esquerda para a direita, água, soro fisiológico, fluido de arrefecimento (FA) na proporção de 20% e 40%, respectivamente.

A água e o soro (coluna 1 e 2) reagiram com o material das amostras causando uma acentuada oxidação de cor laranja, provavelmente óxido de ferro (Fe_2O_3), como era previsto.

O fluido de arrefecimento a 20% ou a 40% em contato com o aço de livre corte não promoveu sinais de oxidação e as manchas azuis são referentes ao corante do fluido e podem ser facilmente removidas.

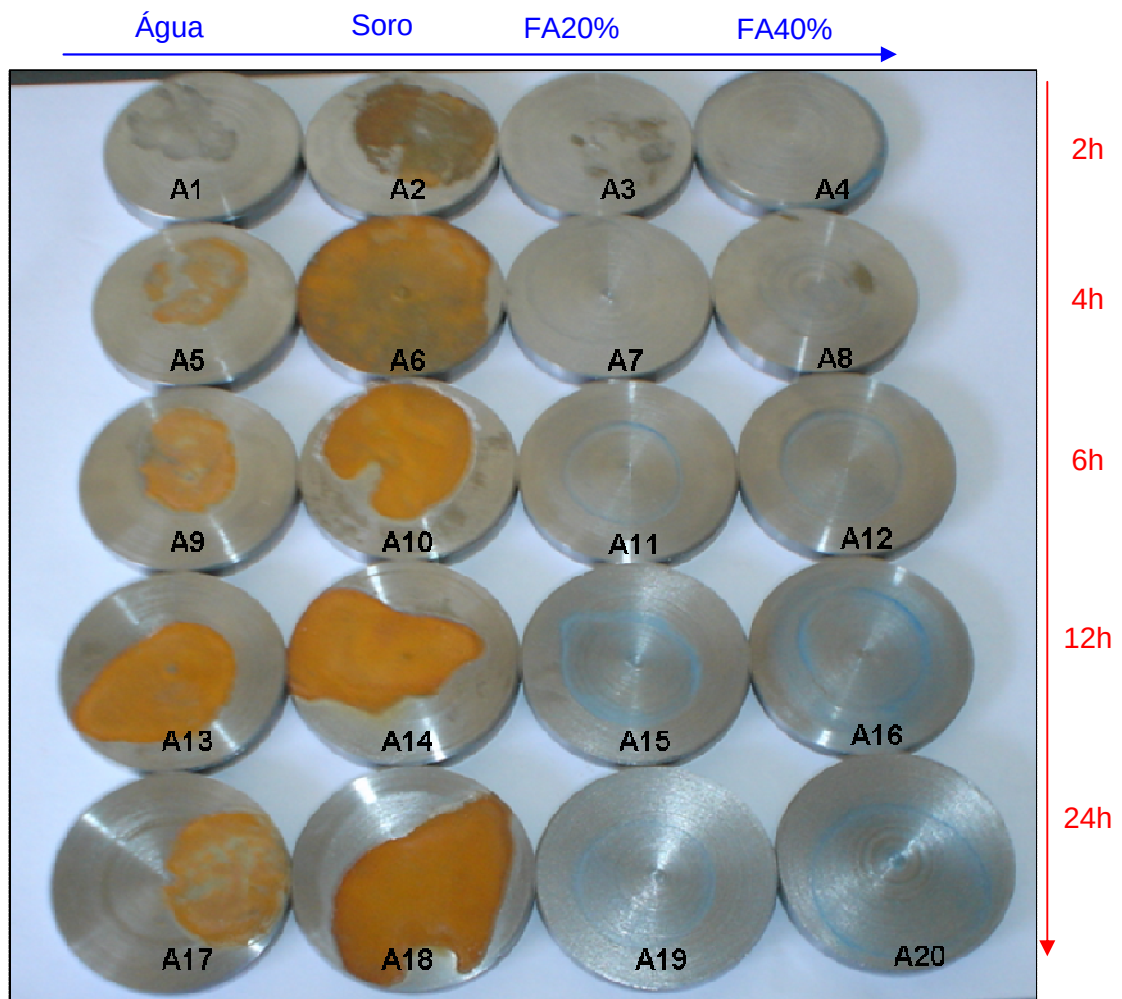


Figura 4.1: Resultado final das amostras expostas aos fluidos.

Portanto, baseando nos resultados dos ensaios de refrigeração e de oxidação, a concentração da mistura do fluido de arrefecimento selecionada para a irrigação nas etapas de Pré-Testes e de Ensaio de Usinagem foi de 20%, por ter se mostrado suficiente para prevenir a oxidação.

4.2. Resultados dos Pré-Testes

A Tabela 4.3 apresenta os resultados das máximas temperaturas desenvolvidas durante o corte para cada ferramenta em seus respectivos testes.

Tabela 4.3: Resultados de máxima temperatura para cada ferramenta.

Testes	Temperatura nas Ferramentas [°C]			
	Lança	BH2	Piloto	BH3
1 (vf24 e n1000)	28,61	72,22	27,95	39,10
2 (vf45 e n1000)	28,00	42,87	27,71	30,47
3 (vf24 e n2500)	29,63	49,12	28,57	33,21
4 (vf45 e n2500)	24,98	30,85	25,91	28,07

A Tabela 4.4 mostra os valores de força de avanço obtidos nos testes para todas as ferramentas. Estes dados foram analisados em histogramas e filtrados até se obter um conjunto de pontos de máximo, em seguida foi calculado um intervalo de confiança de 95% e admitido que o valor máximo do intervalo fosse à força de avanço máxima.

Tabela 4.4: Resultados de força de avanço máxima para cada ferramenta.

Testes	Forças de Avanço Máxima nas Ferramentas [N]			
	Lança	BH2	Piloto	BH3
1	20,18	116,32	11,80	9,74
2	65,84	150,41	14,19	8,06
3	8,24	23,07	4,58	5,74
4	11,38	30,87	8,32	5,74

A partir dos resultados das Tabs. 4.3 e 4.4 apreende-se que os maiores valores de temperatura e força de avanço foram observados para a broca helicoidal de 2 mm de diâmetro (BH2). Significa dizer que do modo como os testes foram realizados esta foi a ferramenta mais solicitada. Isto era esperado, uma vez que é com esta ferramenta que se observa a maior profundidade de corte efetiva (corta em cheio e sem pré-furo). Dessa forma, os Gráficos de superfície de resposta 4.6 e 4.7 mostram, sintaticamente, um mapa da influência das condições de corte na temperatura e na força de avanço para esta ferramenta, respectivamente. E as Tabelas 4.5 e 4.6 mostram quais as variáveis que mais influenciam as respostas e os seus efeitos.

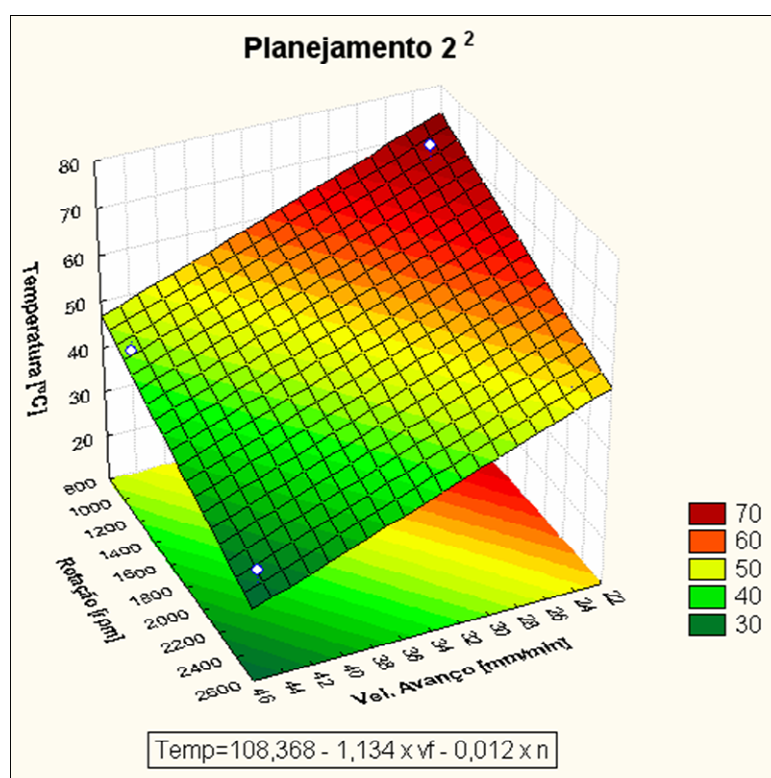


Gráfico 4.6: Superfície de resposta para os ensaios de temperatura (planejamento 2²).

Do Gráfico 4.6 se verifica que para maiores valores de velocidade de avanço e rotação, têm-se as menores temperaturas ao redor da parede óssea, e em oposição a isso, para menores velocidades de avanço e rotação, se têm as maiores temperaturas.

A Tabela 4.5 apresenta uma análise de significância com $\alpha = 15\%$ e intervalo de confiança (IC) de 95%. Dela pode-se compreender que, nas condições testadas, a velocidade de avanço é a variável que mais influencia na diminuição da temperatura.

Tabela 4.5: Análise de significância (Temperatura/Pré-Testes).

Fatores	Efeito	Err. Pad.	p	IC -95%	IC +95%
Média	48,7650	2,770000	0,036123	13,5688	83,96119
Vel. Avanç.	-23,8100	5,540000	0,145536	-94,2024	46,58237
Rotação	-17,5600	5,540000	0,194555	-87,9524	52,83237

Na sequência, o Gráfico 4.7 apresenta a superfície de resposta para os resultados dos ensaios de força de avanço. Nota-se que os menores valores de força ocorreram, principalmente, à alta rotação e baixa velocidade de avanço e à alta rotação e alta velocidade de avanço. E os maiores valores de força ocorreram à baixa rotação e alta velocidade de avanço e à baixa rotação e baixa velocidade de avanço.

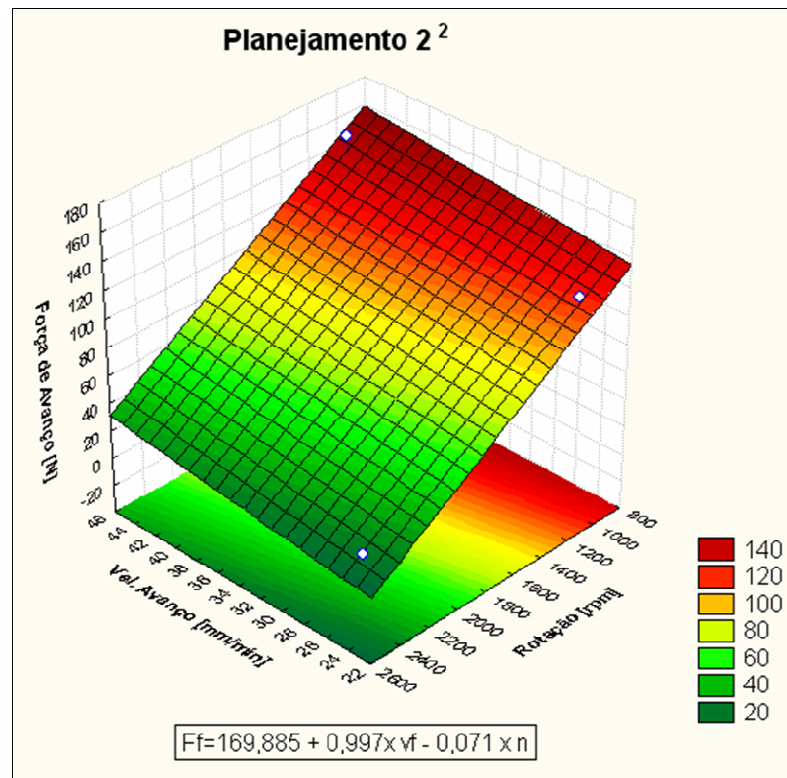


Gráfico 4.7: Superfície de resposta para os ensaios de força de avanço (planejamento 2²).

A Tabela 4.6, apresenta uma análise de significância com $\alpha = 8\%$ e intervalo de confiança (IC) de 95%. Verifica-se que a rotação é a variável que mais influencia na diminuição da força de avanço.

Tabela 4.6: Análise de significância (Força de Avanço/Pré-Testes).

Fatores	Efeito	Err. Pad.	p	IC -95%	IC +95%
Média	80,168	6,57250	0,052077	-3,344	163,6790
Vel. Avanç.	20,945	13,14500	0,356802	-146,078	187,9681
Rotação	-106,395	13,14500	0,078257	-273,418	60,6281

Uma maior discussão sobre a influência das condições de corte nas variáveis de saída será feita no próximo item, Ensaio de Usinagem.

4.3. Resultados dos Ensaios de Usinagem

Este item é dividido em Primeiro Planejamento Experimental 2³, Segundo Planejamento Experimental 2³ e Planejamento Composto Central.

4.3.1. Primeiro planejamento experimental 2³

Neste planejamento foram explorados os materiais de ferramenta AISI 316L (aço inoxidável austenítico, nível -1) e M340 (aço inoxidável martensítico, nível +1).

4.3.1.1. Análise do número de furos (temperatura)

A Tabela 4.7 apresenta os resultados para o primeiro planejamento experimental proposto. A variável de saída analisada é o número de furos realizados em cada teste, pois está intimamente relacionada com o monitoramento da temperatura como critério de fim de vida (47°C).

Tabela 4.7: Primeiro planejamento experimental 2³ – Resposta em Número de Furos.

Testes	Material	Vel. Avanço [mm/min]	Rotação [rpm]	Nº Furos
1	316L	24	1000	2
2	M340	24	1000	1
3	316L	45	1000	3
4	M340	45	1000	40
5	316L	24	2500	1
6	M340	24	2500	30
7	316L	45	2500	40
8	M340	45	2500	70

O Gráfico de colunas 4.8 ilustra qualitativamente a tabela anterior. Pode-se deduzir previamente que o material M340 possui um comportamento superior ao AISI 316L, ou seja, maior vida de ferramenta.

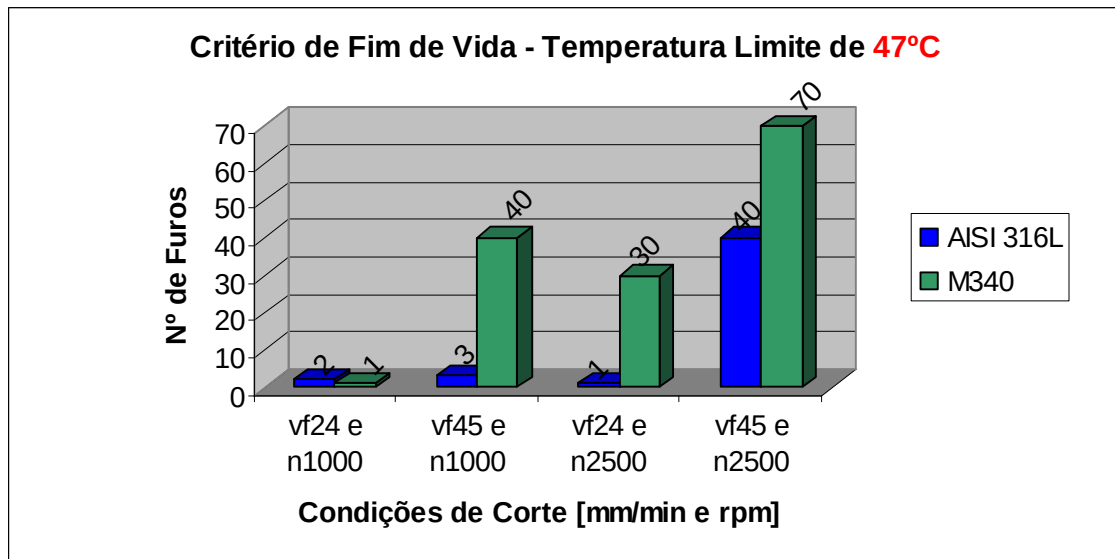


Gráfico 4.8: Número de furos realizados (AISI 316L e M340).

A partir desses resultados foi feita uma análise de significância com intervalo de confiança de 95% e nível de significância de 6% (ou 0,06) através do software STATISTICA 6.0 da StatSoft® (Tulsa/USA). A Tabela 4.8 apresenta essa análise.

Tabela 4.8: Análise de significância do primeiro planejamento quanto ao número de furos.

Fatores	Efeito	Err. Pad.	p	IC -95%	IC +95%
Média	23,37500	4,392821	0,006001	11,17857	35,57143
Material	23,37500	8,785642	0,053911	-0,64285	48,14285
Vel. Avanç.	29,75000	8,785642	0,027627	5,35715	54,14285
Rotação	23,75000	8,785642	0,053911	-0,64285	48,14285

Pela Tabela 4.8 observa-se que existe diferença significativa nos resultados, quando se altera as variáveis de entrada (principais) de um nível inferior para um superior, pois o nível de significância (p) foi menor do que 6%.

Além disso, ao estudar os efeitos dos fatores sobre a resposta observa-se que ao passar do nível -1 para o +1, tem-se um aumento em média na capacidade de fazer furos de 23 para o material M340, de aproximadamente 30 furos ao aumentar a velocidade de avanço e de 24 furos ao aumentar a rotação.

Dessa forma, analisando os níveis de significância e os efeitos conclui-se que a velocidade de avanço é a principal variável na diminuição da temperatura ao redor da parede óssea, assim como verificado nos ensaios de pré-testes.

O Gráfico 4.9 ilustra a influência desta variável sobre a capacidade de se fazer furos, para os dois níveis de rotação e para cada material de ferramenta.

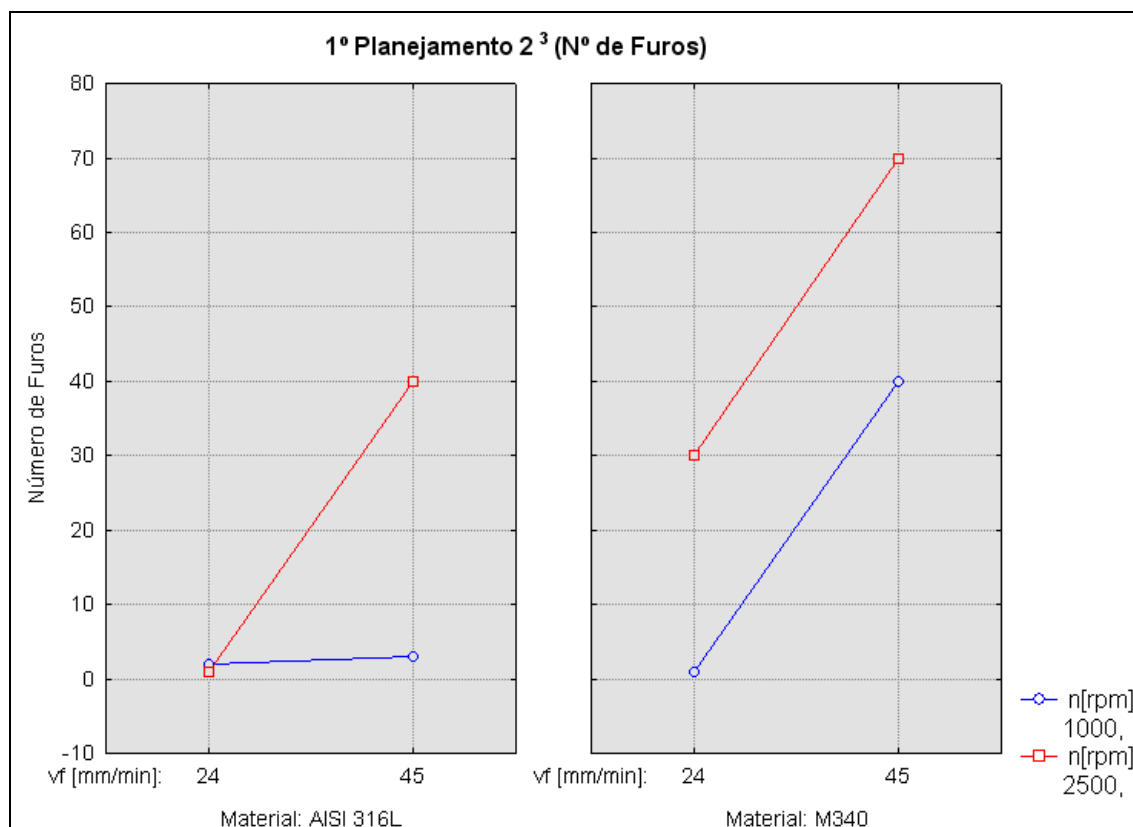


Gráfico 4.9: Influência da variação da velocidade de avanço sobre a capacidade de se fazer furos.

Verifica-se que ao aumentar a velocidade de avanço para ambas as rotações, tem-se um aumento na capacidade de se fazer furos, ou seja, os níveis de temperatura foram menores ao redor da parede óssea. Assim, quanto mais rápido a fonte de calor (ferramenta) realizar o corte, menor será o tempo para que haja dissipação de calor ao osso. O gráfico também mostra a superioridade do material M340.

No Gráfico 4.10 tem-se a influência da variação da rotação sobre a variável de saída (Nº de Furos), para os dois níveis de velocidade de avanço e para cada material de ferramenta.

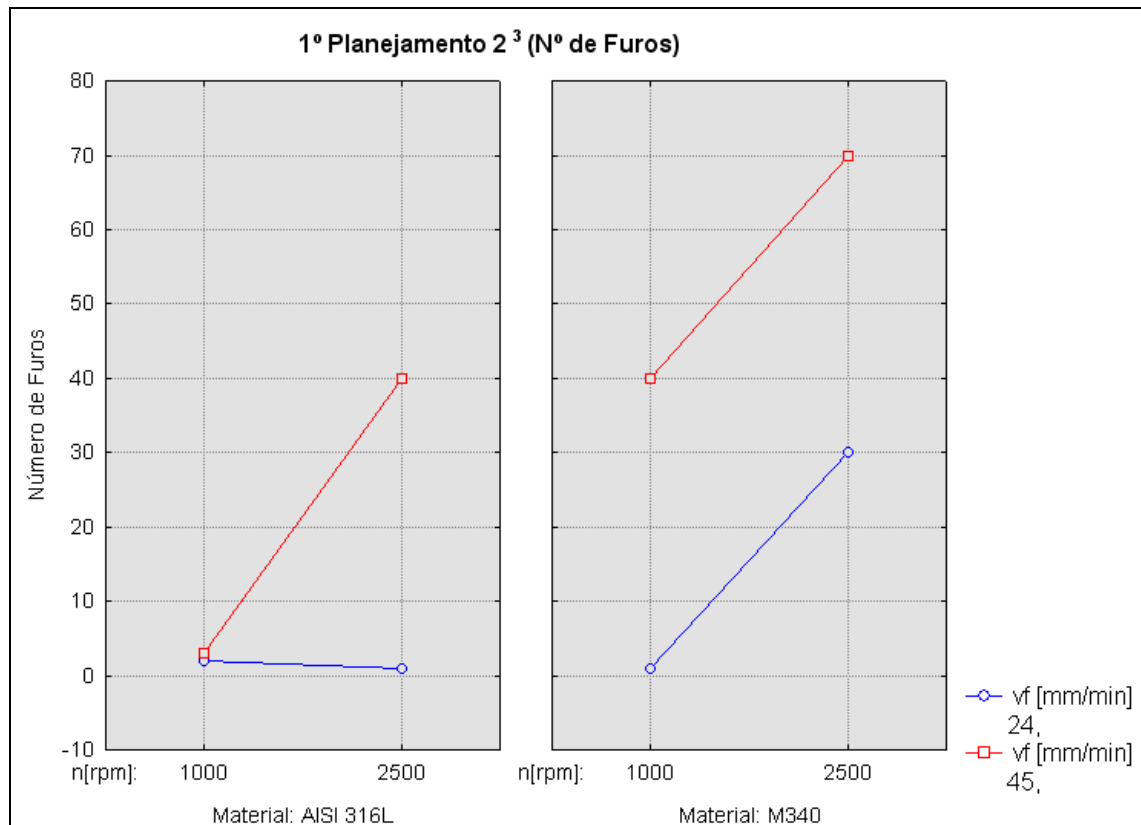


Gráfico 4.10: Influência da variação da rotação sobre a capacidade de se fazer furos.

O Gráfico 4.10 mostra que o aumento da rotação fez com que a capacidade de se fazer furos fosse aumentada, isto é, ao passar esta variável para um nível superior os valores máximos de temperatura ao redor da parede óssea também diminuiram. A hipótese de Salomon (Longbottom e Lanham, 2006) pode ajudar a explicar estes resultados. Ela preconiza que a temperatura gerada durante a usinagem aumenta até certo ponto, então começa a diminuir conforme a velocidade de corte aumenta. Embora, essa teoria seja controversa, ela pode ser verdadeira para as variações de temperatura na peça em processos de usinagem. O'Sullivan e Cotterell (2001 e 2002) observaram a diminuição da temperatura na superfície da peça usinada para maiores velocidades de corte e avanço. Dagiloke et al. (1995) sugerem como explicação para este fato que para maiores velocidades de corte, menor é o tempo disponível para que o calor gerado seja conduzido à peça. Ou seja, maiores rotações implicam em aumento de temperatura na ferramenta e no cavaco, mas não necessariamente na peça (osso).

Analisando os valores de temperatura do último furo para todas as ferramentas de cada teste, ver Tab. 4.9, observa-se que a BH2 é em geral a ferramenta que mais gera calor durante a furação (osteotomia), mesmo os termoelementos estando a 0,5 mm mais

distantes do que para a BH3. Esta observação também foi verificada durante todo o período de execução dos testes, sendo que os termopares 2 e 3 mediram a maioria dessas temperaturas. A justificativa para a maior geração de calor é que esta ferramenta realiza mais trabalho, ou seja, ela retira mais material do que as outras.

Tabela 4.9: Resultados de temperatura para todas as ferramentas e condições de corte, conforme a Tab. 4.7.

Testes	Temperatura [°C]			
	Lança	BH2	Piloto	BH3
1	23,45	47,00	25,18	33,27
2	23,28	52,14	27,01	29,98
3	29,21	84,02	26,00	38,21
4	27,93	47,93	25,53	33,04
5	30,78	42,21	29,50	47,39
6	27,94	48,26	29,26	47,37
7	27,20	49,93	27,68	49,86
8	24,95	50,76	24,90	31,14

4.3.1.2. Análise da força de avanço

Os valores de força de avanço obtidos nos testes para todas as ferramentas foram analisados em histogramas e filtrados até se obter um conjunto de pontos de máximo, em seguida foi calculado um intervalo de confiança de 95% e admitido que o valor máximo do intervalo fosse à força de avanço máxima.

A Tabela 4.10 mostra o valor médio da força de avanço máxima monitorada entre o primeiro e o último furo para todas as ferramentas em cada teste.

Tabela 4.10: Resultados médios de força de avanço máxima para todas as ferramentas e condições de corte, conforme a Tab. 4.7.

Testes	Força de Avanço Máxima Média [N]			
	Lança	BH2	Piloto	BH3
1	30,18	65,47	8,08	10,83
2	24,51	94,21	7,83	7,36
3	257,63	128,97	8,52	6,46
4	74,66	133,55	9,88	9,25
5	138,13	87,85	4,97	12,67
6	9,28	39,05	5,16	7,31
7	69,03	38,45	5,74	10,60
8	39,33	56,83	8,85	6,69

Pela Tabela 4.10 observa-se que a ferramenta mais exigida é a BH2, principalmente, para o material M340 (Testes 2, 4, 6 e 8) que possuiu maior capacidade de fazer furos. Além

disso, esta ferramenta também se mostrou crítica durante o monitoramento de temperatura. A broca Lança para o aço inoxidável austenítico apresentou grande deformação plástica na ponta, por isso algumas vezes se verificou maior valor de força para ela do que para a BH2. A Lança também pode ter apresentado maior valor de força de avanço, apesar do seu pequeno percurso de avanço ($L_f = 5 \text{ mm}$), devido a sua geometria desfavorável para o corte, ver Anexo I, com três arestas com ângulo de cunha (β) de 120° , ângulo de saída (γ_0) -60° e ausência de ângulo de hélice. Figuras ilustrativas de destruição das ferramentas serão mostradas no próximo item.

A Tabela 4.11 apresenta a estrutura de dados para o primeiro planejamento, quanto à força de avanço para a ferramenta BH2. A resposta está baseada no valor médio da força de avanço máxima monitorada entre os furos de cada teste.

Tabela 4.11: Primeiro planejamento experimental 2^3 – Resposta em Força de Avanço Máxima.

Testes	Material	Vel. Avanço [mm/min]	Rotação [rpm]	Forç. Avanç. Máx. [N]
1	316L	24	1000	65,47
2	M340	24	1000	94,21
3	316L	45	1000	128,97
4	M340	45	1000	133,55
5	316L	24	2500	87,85
6	M340	24	2500	39,05
7	316L	45	2500	38,45
8	M340	45	2500	56,83

O Gráfico de colunas 4.11 ilustra qualitativamente esta tabela.

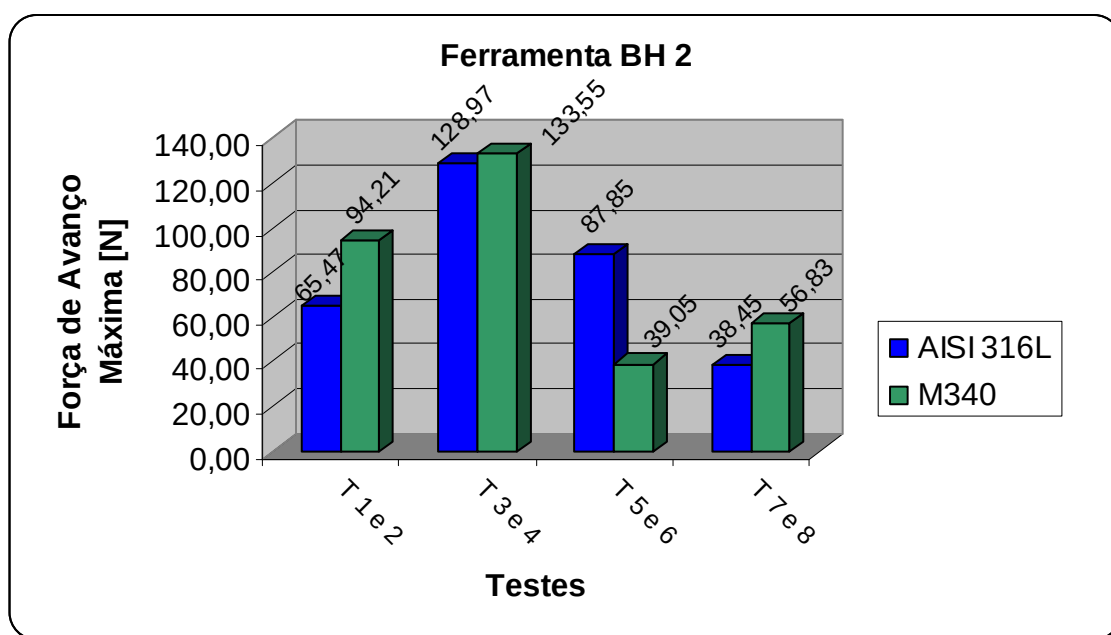


Gráfico 4.11: Força de avanço máxima em média para os testes (AISI 316L e M340).

Os resultados foram analisados pelo software STATISTICA 6.0, através de uma análise de significância com intervalo de confiança de 95% e nível de significância de 9% (ou 0,09). A Tabela 4.12 apresenta esta análise.

Tabela 4.12: Análise de significância do primeiro planejamento quanto à força de avanço máxima.

Fatores	Efeito	Err. Pad.	P	IC -95%	IC +95%
Média	80,5489	7,46447	0,000418	59,8242	101,2736
Vel. Avanç.	17,8054	14,92893	0,298908	-23,6440	59,2548
Rotação	-50,0043	14,92893	0,028582	-91,4536	-8,5549
vf x n	-33,6168	14,92893	0,087472	-75,0661	7,8326

Pela Tabela 4.12 verifica-se que a rotação é a variável de entrada mais significativa na diminuição da força de avanço máxima, embora o efeito desta não possa ser analisado separadamente, devido à interação com a velocidade de avanço. Esta interação torna-se importante porque existe significância na diferença média entre o efeito médio da velocidade de avanço com o nível superior de rotação e o efeito médio da velocidade de avanço com o nível inferior de rotação, de forma que, ao aumentar a rotação tem-se uma queda na força de avanço em média de aproximadamente 34 N.

O Gráfico 4.12 ilustra a influência da rotação sobre a força de avanço máxima, para os dois níveis de velocidade de avanço e para cada material de ferramenta.

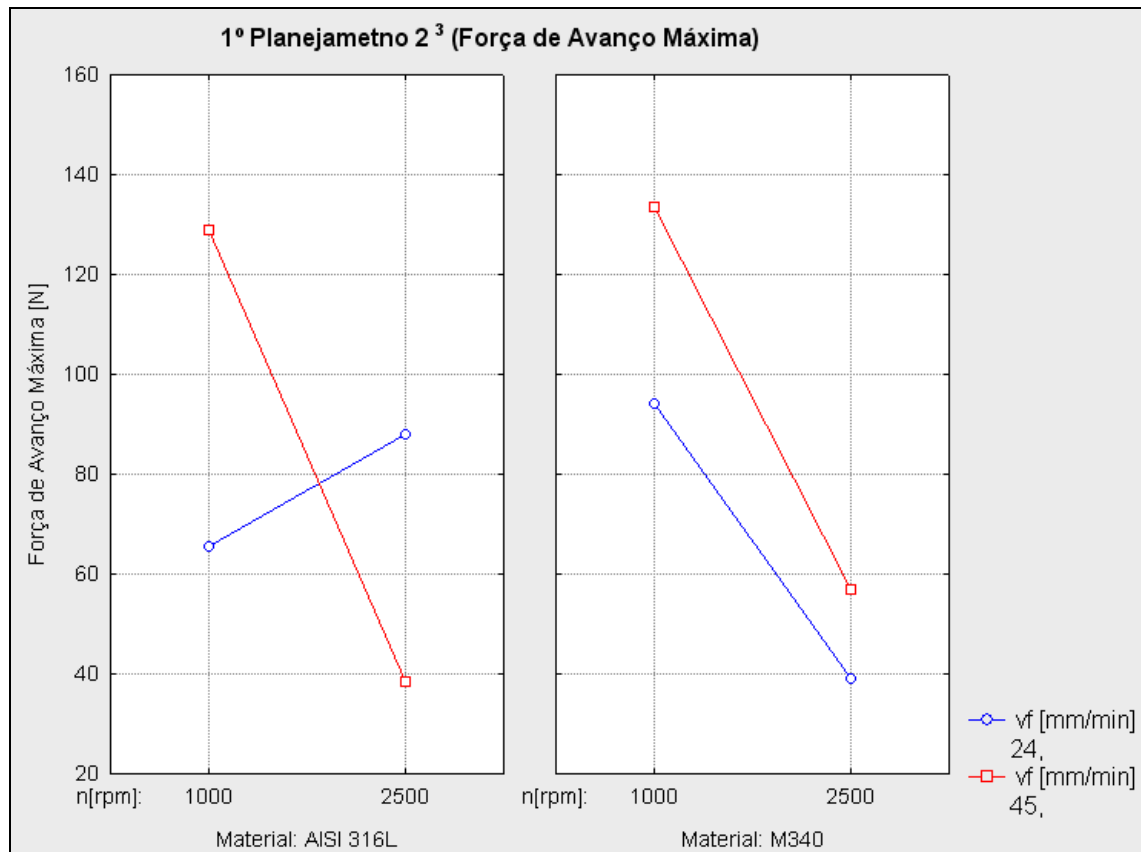


Gráfico 4.12: Influência da rotação sobre a força de avanço máxima.

O gráfico evidencia a diminuição da força de avanço com o aumento da rotação. Isso pode ser explicado, devido a uma diminuição da área de contato cavaco-ferramenta com o aumento da mesma. Observa-se também que o aumento da rotação faz com que os valores da força de avanço atinjam o que era esperado clinicamente (situação de conforto ao paciente entre 4 e 6 kgf), principalmente para o material de ferramenta M340. O comportamento do AISI 316L é atípico para baixa velocidade de avanço (Testes 1 e 5) e será comentado no próximo item.

No Gráfico 4.13 tem-se a influência da velocidade de avanço sobre a força de avanço máxima, para os dois níveis de rotação e para cada material de ferramenta.

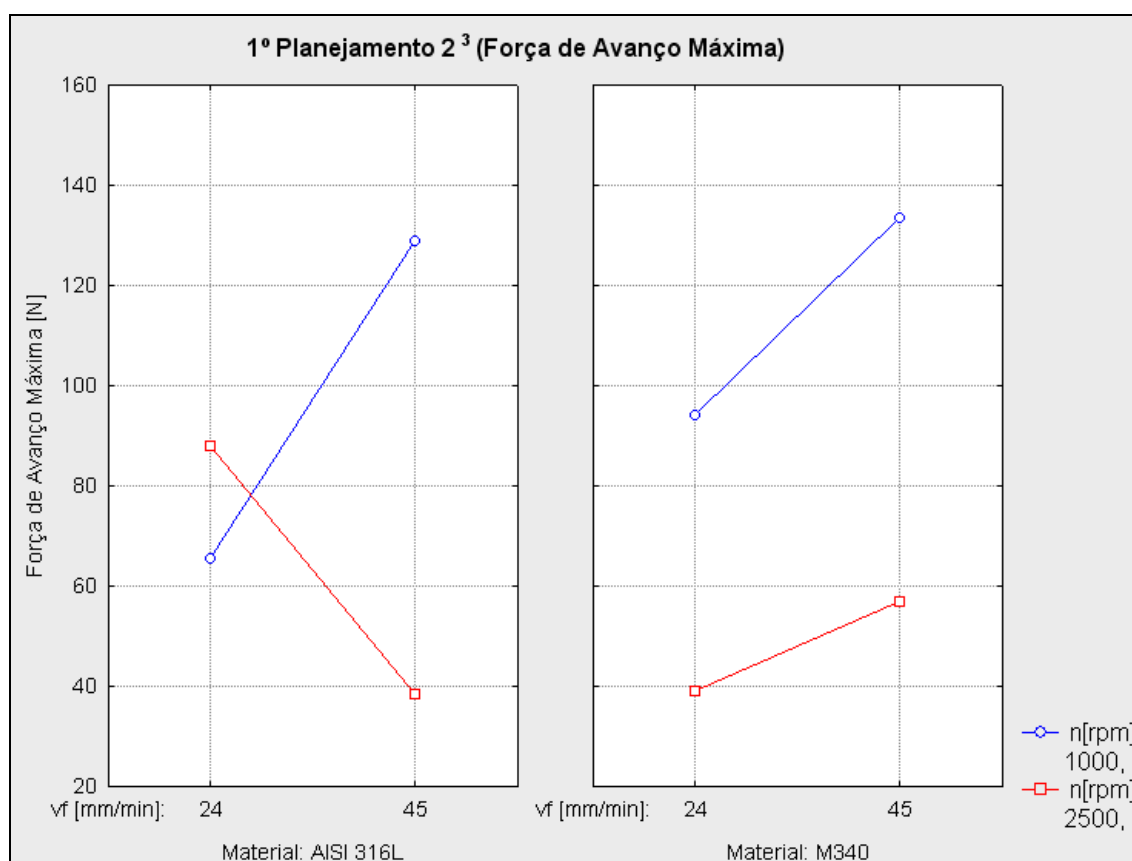


Gráfico 4.13: Influência da velocidade de avanço sobre a força de avanço máxima.

Justificam-se os resultados do Gráf. 4.13 da seguinte forma, ao aumentar a velocidade de avanço têm-se maiores áreas nos planos de cisalhamento primário e secundário de remoção de material, ver Fig. 2.21, de forma a causar uma maior força de usinagem, e consequentemente, uma maior força de avanço e de corte (Machado et al., 2009). Esta consideração se baseia em observação experimental e em fotos de tipos de cavaco de osso apresentadas por Mora (2000), ver Fig. 2.18, que nos leva a crer em zonas de cisalhamento na usinagem deste material. Pelo Gráfico 4.13 ainda se verifica que furar um osso com rotações em torno de 1000 rpm, velocidade de avanço baixa ou alta e mesmo com um maior número de intermitências, implicará em maior força de avanço (desconforto ao paciente), ao contrário do que se estiver furando com maior rotação. A discrepância no resultado para rotação elevada observada para o material AISI 316L (Teste 5 e 7) será discutida no próximo item.

4.3.1.3. Comportamento dos materiais AISI 316L e M340

A seguir será apresentado e comentado, o comportamento de cada material de ferramenta frente às condições de corte testadas, em relação às variáveis monitoradas, tomando, principalmente, a broca mais exigida (BH2), a base dos comentários. Nos Gráficos

4.14 e 4.15 têm-se a evolução da temperatura e a variação da força de avanço máxima ao longo da vida da ferramenta para os materiais ASI 316L e M340, respectivamente.

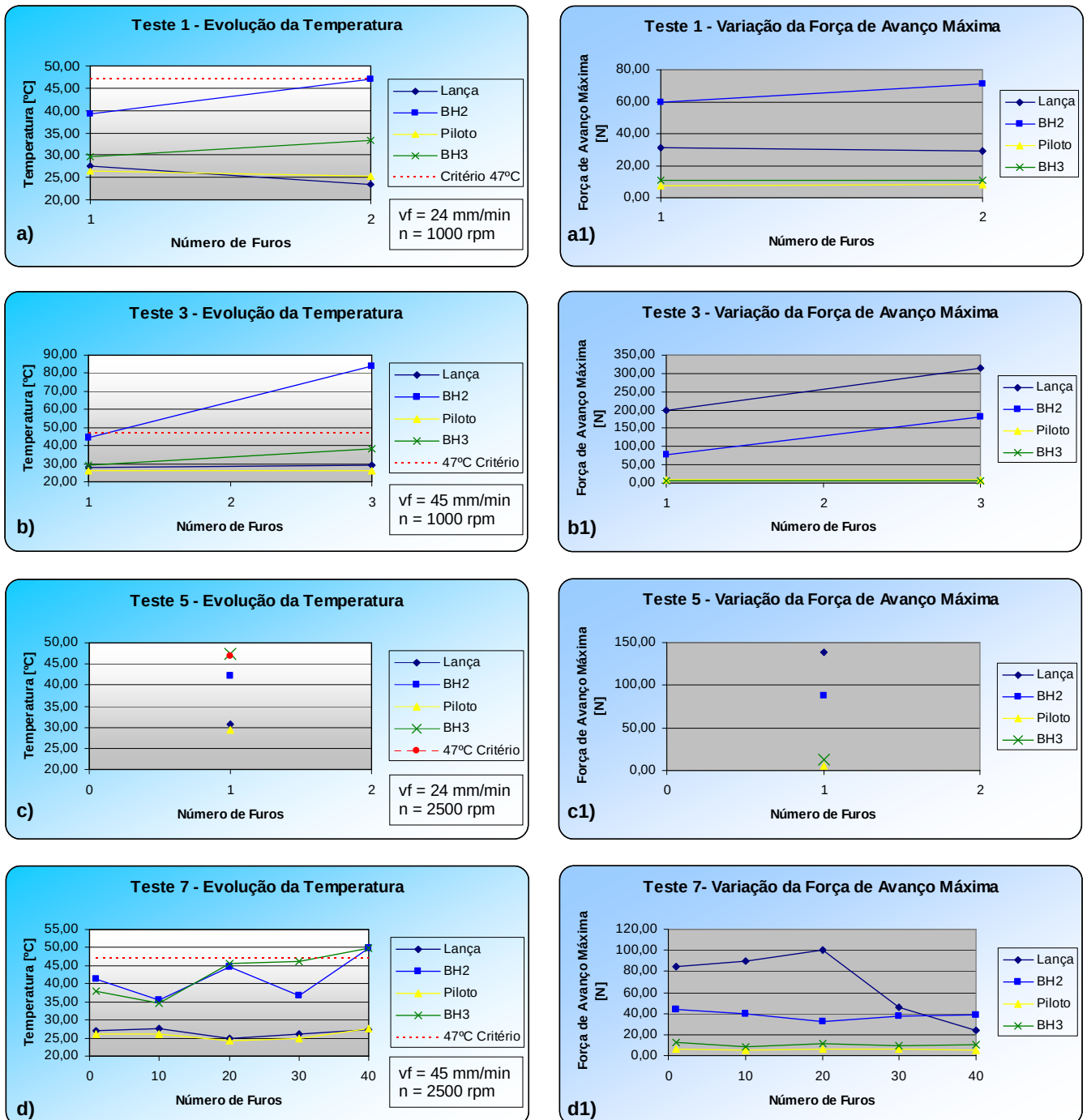


Gráfico 4.14: Evolução das temperaturas e variação das forças de avanço máximas para o material de broca AISI 316L, Gráfico 4.14 a) a d) e Gráfico 4.14 a1) a d1), respectivamente.

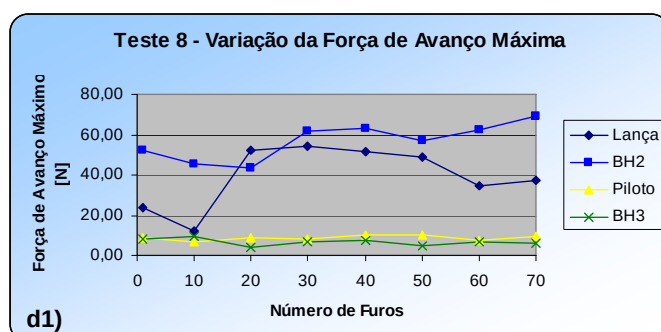
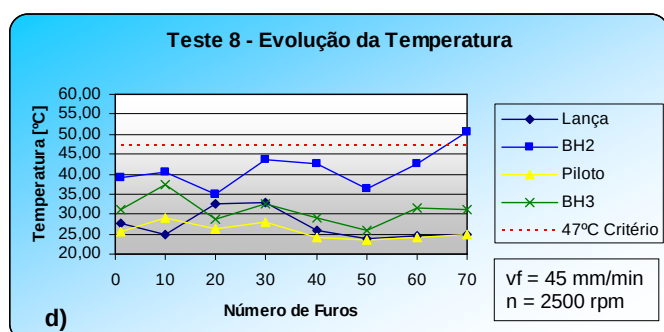
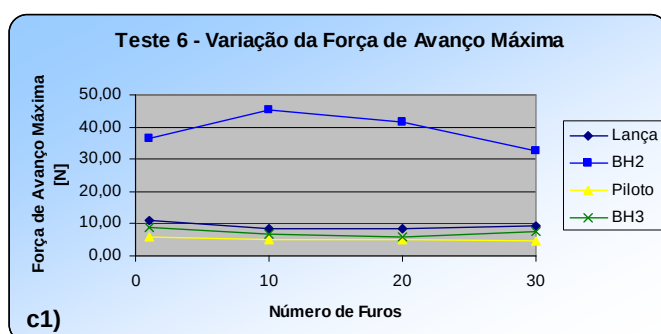
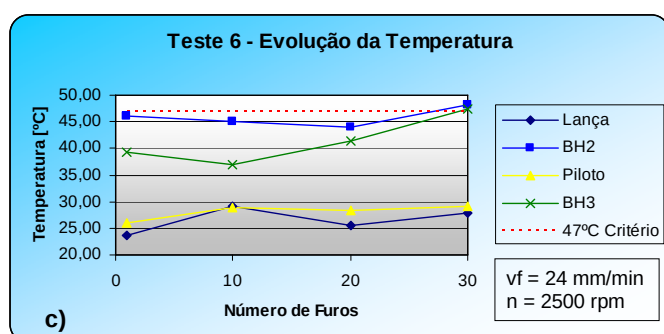
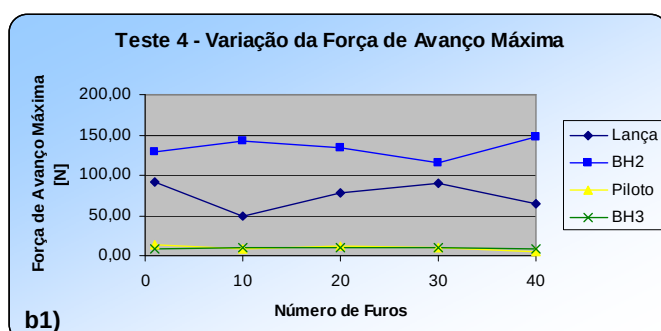
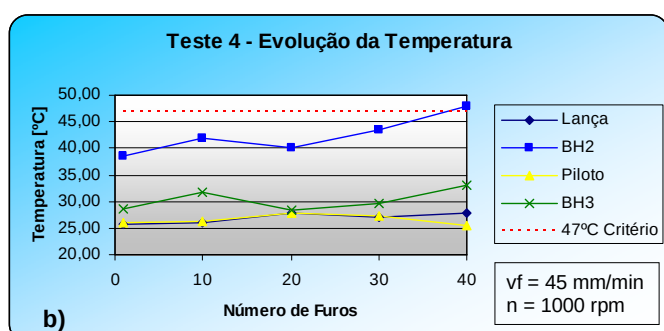
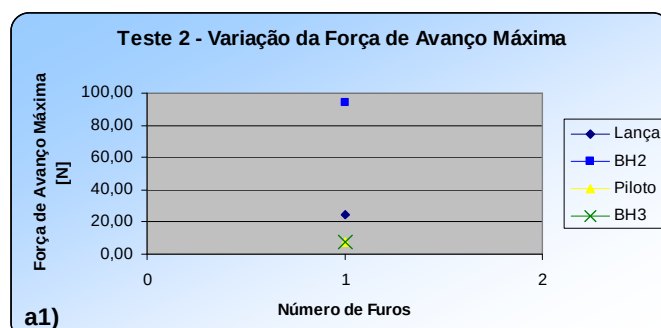
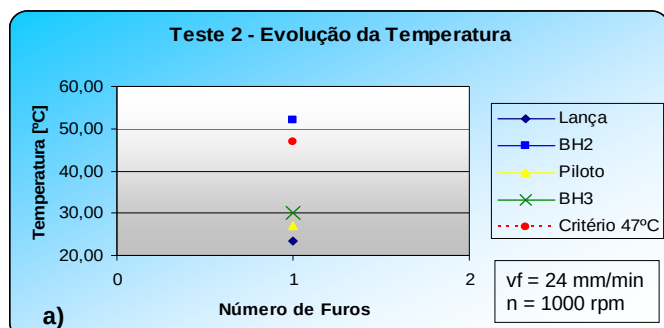


Gráfico 4.15: Evolução das temperaturas e variação das forças de avanço máximas para o material de broca M340, Gráfico 4.15 a) a d) e Gráfico 4.15 a1) a d1), respectivamente.

As comparações e os comentários entre os testes serão abordados na sequência:

➤ **Teste 1 (vf 24 e n 1000) x Teste 3 (vf 45 e n 1000) → AISI 316L**

Ao aumentar a velocidade de avanço (vf) a ferramenta realizou o furo em menos tempo, por isso era esperado que a temperatura na parede óssea fosse menor, gerando uma maior capacidade de fazer furos, devido ao menor tempo para a dissipação de calor. Também era esperado que a força de avanço (Ff) fosse maior, por causa da relação direta com o vf.

Todavia, no Teste 3 a BH2 teve uma deformação plástica impressionante, com Ff bem superior ao do Teste 1. Devido a isso, os resultados de temperatura no Teste 3 foram superiores ao do Teste 1, e não apresentaram a conformidade esperada. Desse modo, vale ressaltar que o material da broca, por ser austenítico, não tem boas propriedades mecânicas, e por isso, não respondeu bem as variações das condições de usinagem. Ver Gráfico 4.14 a), a1) e b), b1) e Fig. 4.2 e 4.3.

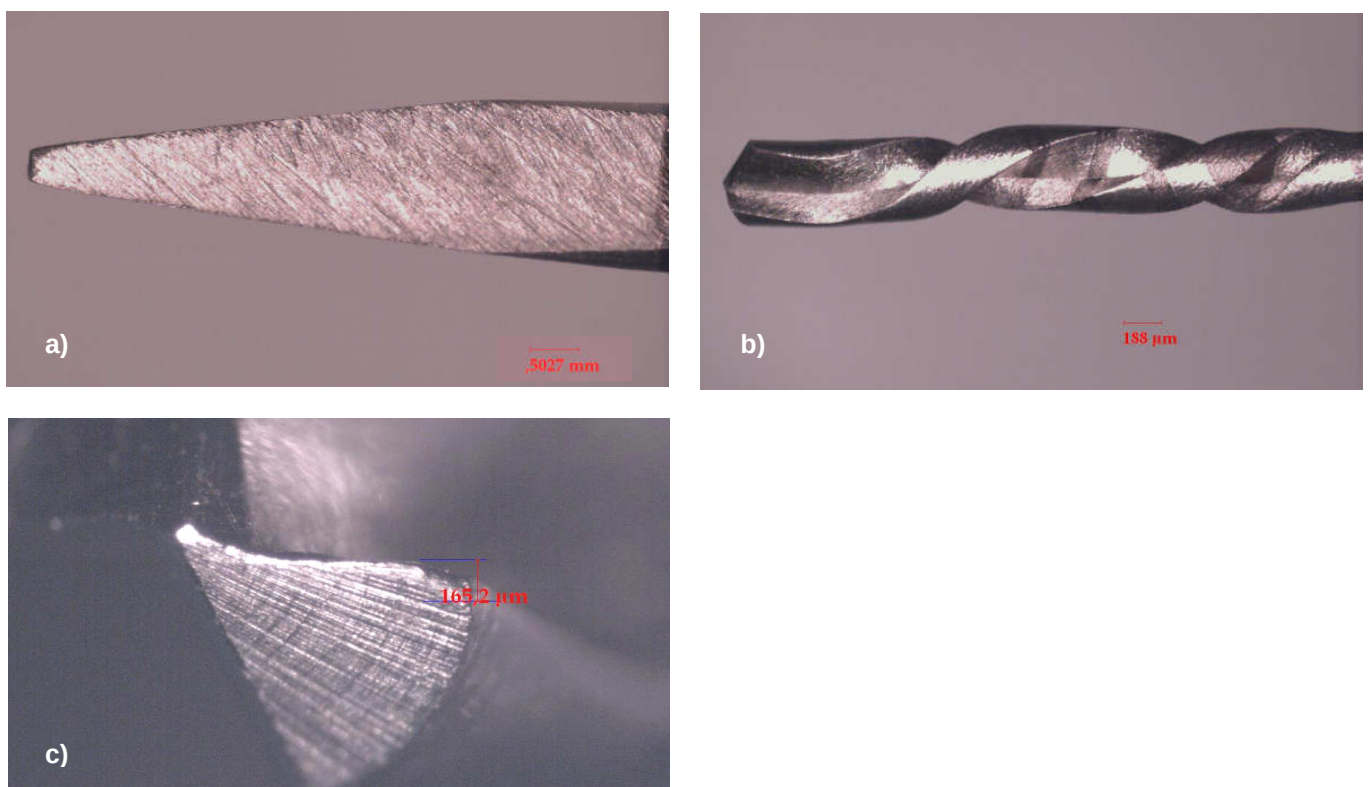


Figura 4.2: Desgaste Teste 1 a) Lança 20x; b) BH2 10x; c) BH2 VB_{Bmax} 45x.

Na Figura 4.2 b) observa-se o perfil de hélice da BH2 deformada plasticamente (torcida).

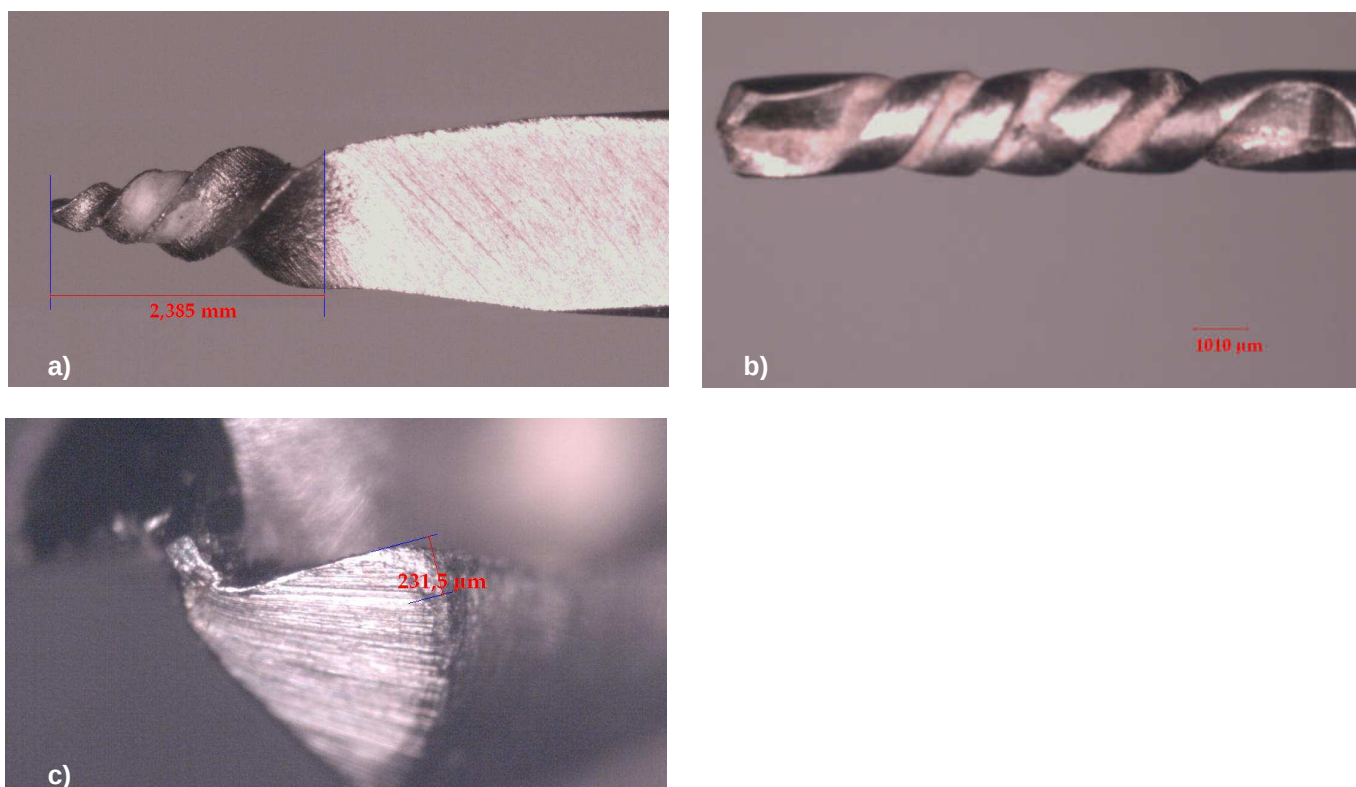


Figura 4.3: Desgaste Teste 3 a) Lança 20x; b) BH2 10x; c) BH2 VB_{Bmax} 45x.

Na sequência a Fig. 4.3 a) e b) apresentam uma intensa deformação na ponta da Lança e no perfil de hélice da BH2, respectivamente, devido à baixa resistência do material austenítico e ao aumento da velocidade de avanço.

➤ **Teste 1 (vf 24 e n 1000) x Teste 5 (vf 24 e n 2500) → AISI 316L**

Ao aumentar a rotação (n) era esperado que a força de avanço (F_f) diminuísse e isso iria refletir inclusive em uma diminuição da temperatura na parede da loja, possibilitando a realização de mais furos.

No Teste 5 foi detectado que a ferramenta mais crítica na geração de calor foi a BH3. Era possível que nestas condições isto ocorresse, porque esta broca possui maior diâmetro, o que conduz a maiores velocidades de corte (vc), conseqüentemente maiores temperaturas. Além disso, esta broca estava a 0,5 mm dos termopares, ao contrário da BH2 que estava a 1 mm. Também foi verificado que a BH2 sofreu uma grande deformação plástica na ponta da broca, devido somente ao aumento da rotação, o que gerou uma F_f um pouco superior a do Teste 1. Novamente, a não conformidade do teste é devido ao material da broca. Ver Gráfico 4.14 a), a1) e c), c1) e Fig. 4.2 e 4.4.

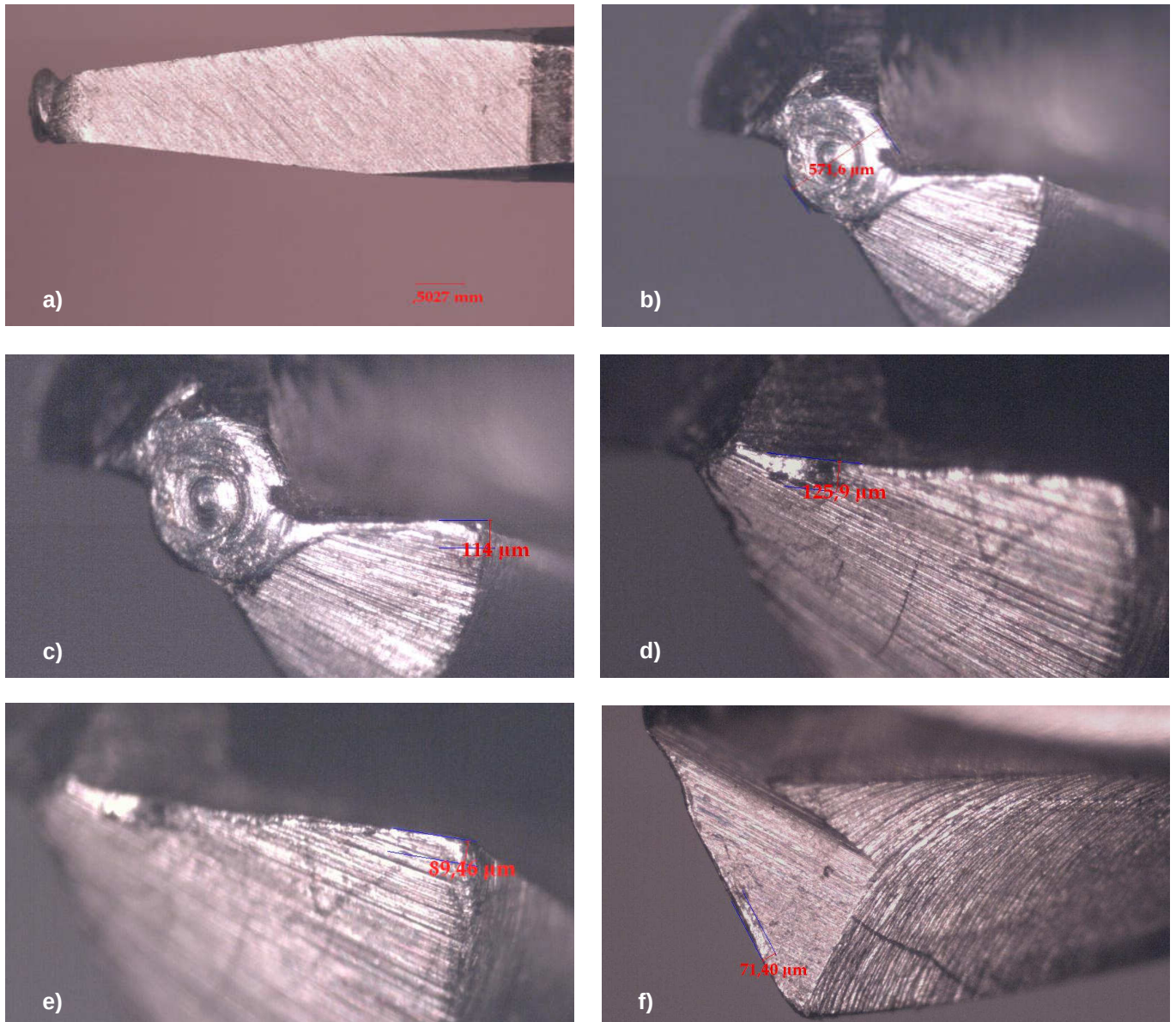


Figura 4.4: Desgaste Teste 5 a) Lança 20x; b) BH2 ponta 45x; c) BH2 VB_{Bmax} 45x; d) BH3 VB_{Bmax} 45x; e) BH3 VB_B 45x e f) BH3 superfície de saída 45x.

A Lança e a BH2 tiveram um grande achatamento na ponta da ferramenta, Fig. 4.4 a) e b), causada pelo material da broca associado com altas rotações do corte.

➤ **Teste 5 (vf 24 e n 2500) x Teste 7 (vf 45 e n 2500) → AISI 316L**

Até o momento nenhuma condição de corte apresentou, realmente, a realização segura de alguma quantidade de furos relevante, porém isso muda no Teste 7. Ao aumentar a velocidade de avanço com uma rotação alta, era esperado que a ferramenta realizasse o furo em menos tempo, devido ao vf maior, e a temperatura na parede óssea fosse menor, dando longevidade à broca. Também era esperado que a força de avanço (F_f) fosse maior do que as do Teste 5.

No Teste 7 foram realizados 30 furos, enquanto que no Teste 5 apenas 1 furo. Ou seja, a condição de corte permitiu realizar mais furos antes que a temperatura atingisse o critério de fim de vida de 47°C. Em relação às Ff, os valores do Teste 7 para BH2 foram inferiores a do Teste 5, suponha-se, que seja devido a grande deformação da ferramenta neste teste. Ver Gráfico 4.14 c), c1) e d), d1) e Fig. 4.4 e 4.5.

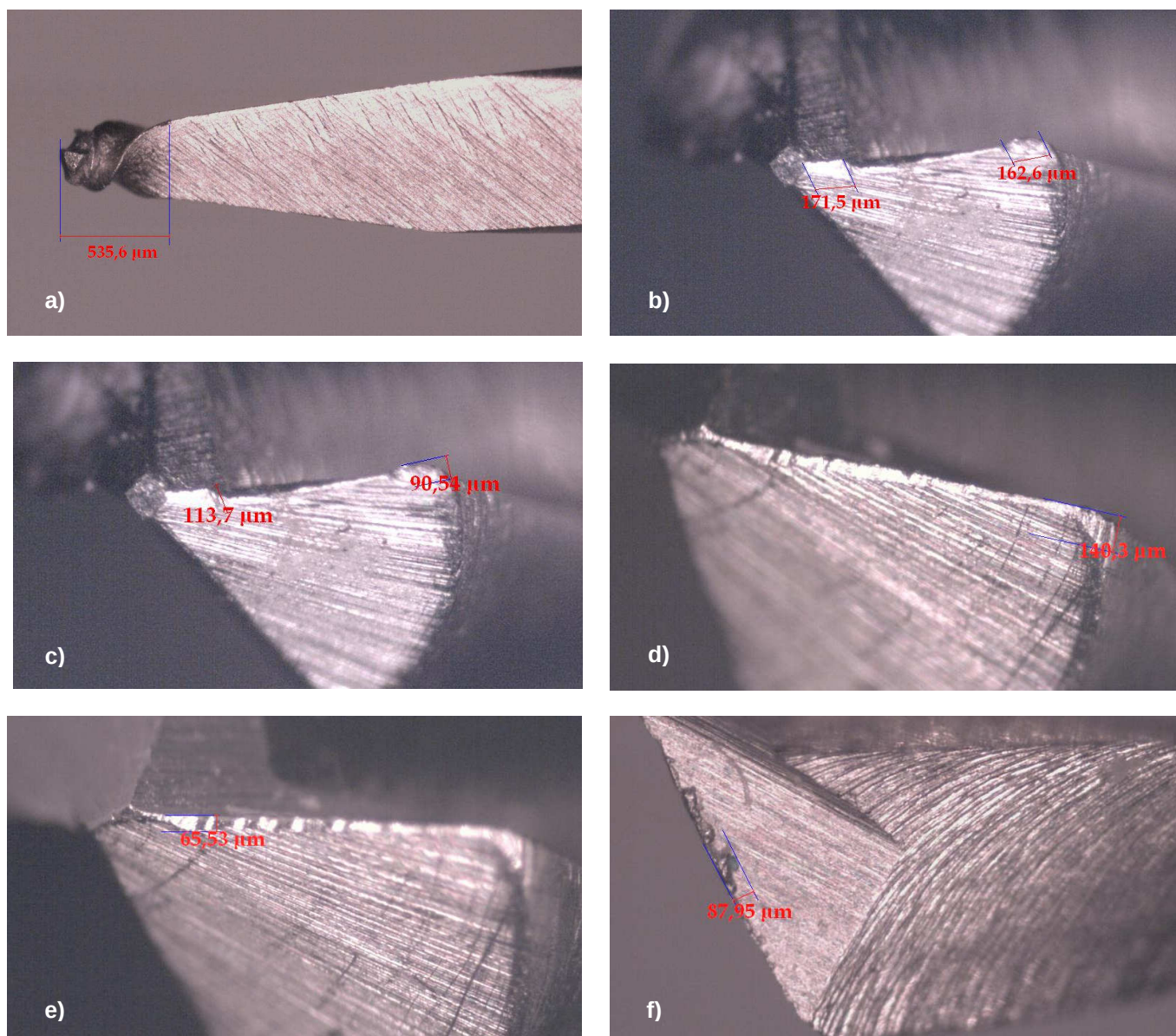


Figura 4.5: Desgaste Teste 7 a) Lança 20x; b) BH2 largura 45x; c) BH2 VB_{Bmax} 45x; d) BH3 VB_{Bmax} 45x; e) BH3 VB_B 45x; f) BH3 superfície de saída 45x.

Na Figura 4.5 a), b) e c) verifica-se respectivamente, a ponta da Lança deformada e marcas de deformação na aresta de corte da BH2. Na sequência, Figura 4.5 d), e) e f), tem-

se desgaste de flanco máximo, médio e deformação na superfície de saída da ferramenta BH3.

➤ **Teste 3 (vf 45 e n 1000) x Teste 7 (vf 45 e n 2500) → AISI 316L**

Ao aumentar a rotação era esperado que a força de avanço (F_f) diminuísse, e isso iria refletir inclusive em uma diminuição da temperatura na parede da loja, aumentando a vida da ferramenta.

Realmente, ao aumentar a rotação os valores da F_f diminuíram em relação às do Teste 3. Essa condição de corte permitiu temperaturas inferiores a 45°C na maior parte do experimento. Além disso, se faz a ressalva de que, no Teste 7, as temperaturas desenvolvidas pelas brocas BH2 e BH3 foram muito parecidas, então para este material, rotações elevadas, tanto no Teste 7 quanto no Teste 5, tornam a BH3 uma broca perigosa, embora esta esteja mais próxima do termopar. Ver Gráfico 4.14 c), c1) e e), e1) e Fig. 4.3 e 4.5.

➤ **Teste 2 (vf 24 e n 1000) x Teste 4 (vf 45 e n 1000) → M340**

Ao aumentar a velocidade de avanço (vf) verificou-se, que enquanto no Teste 2 fez-se apenas 1 furo, no Teste 4 obteve-se 40 furos. A temperatura na parede da loja foi inferior a 45°C durante a maior parte do teste, o que mostra que vf alta é importante para minimizar danos de origem térmica às células ósseas adjacentes ao implante, além disso, as forças de avanço no Teste 4 foram superiores as do Teste 2, como esperado. Ver Gráfico 4.15 a) e b) e Fig. 4.6 e 4.7.

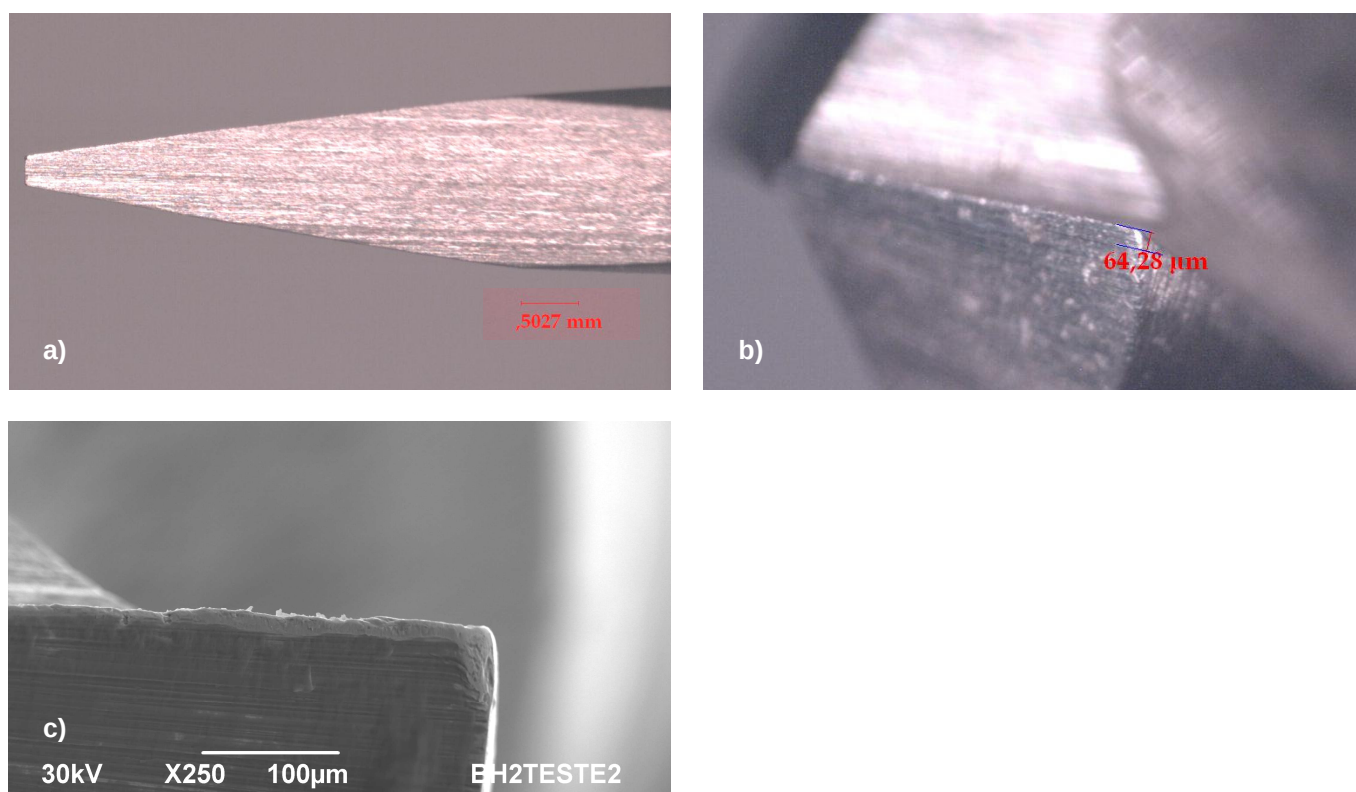


Figura 4.6: Desgaste Teste 2 a) Lança 20x; b) BH2 VB_{Bmax} 45x; c) BH2 VB 250x MEV.

Embora, as ferramentas do Teste 2 tenham feito apenas 1 furo observa-se desgaste na BH2, Fig. 4.6 b) e c) em MEV. Contudo, não se verificou deformação na Lança Fig. 4.6 a), o que evidencia a superioridade deste material.

Na Figura 4.7 b) observa-se desgaste de flanco máximo na BH2. Porém, não se verificou deformação, mesmo com alta velocidade de avanço.

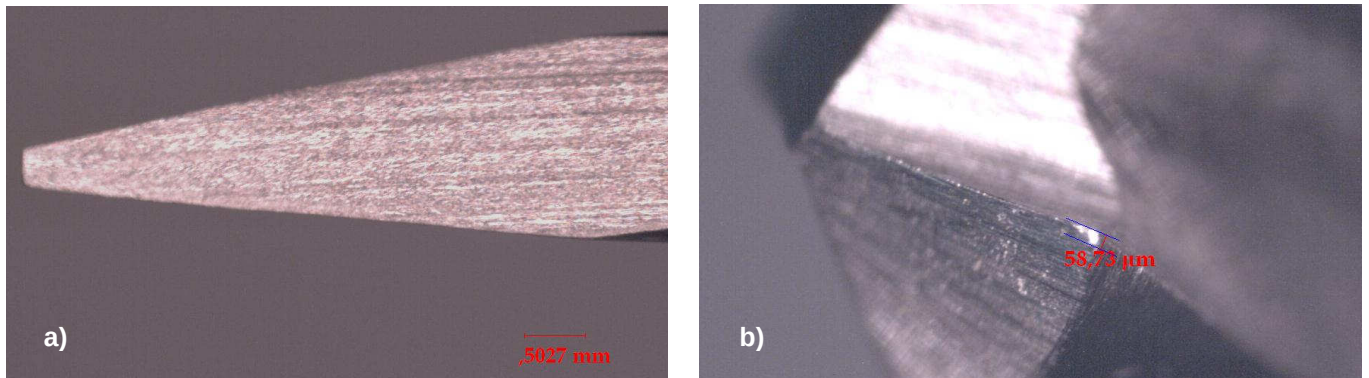


Figura 4.7: Desgaste Teste 4 a) Lança 20x; b) BH2 VB_{Bmax} 45x.

➤ **Teste 2 (vf 24 e n 1000) x Teste 6 (vf 24 e n 2500) → M340**

Como esperado ao aumentar a rotação no Teste 6 a força de avanço diminuiu, isso refletiu inclusive em uma diminuição da temperatura na parede do sítio ósseo, mantendo-se em torno de 45°C, e possibilitando um aumento na capacidade de fazer furos (30 furos realizados, ao invés de 1). Ver Gráfico 4.15 a), a1) e c), c1) e Fig. 4.6 e 4.8.

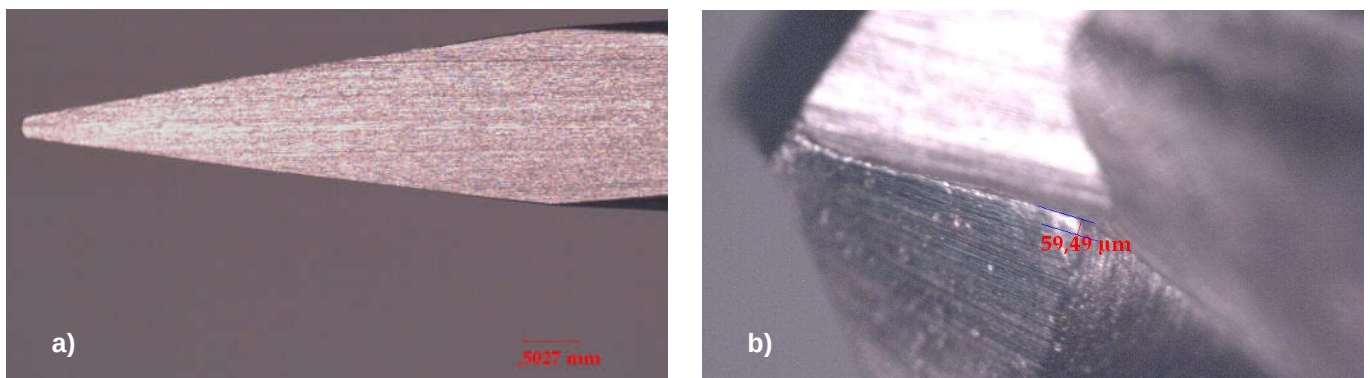


Figura 4.8: Desgaste Teste 6 a) Lança 20x; b) BH2 VB_{Bmax} 45x.

No Teste 6, embora, a rotação fosse elevada não se verificou deformação plástica nas ferramentas, Fig. 4.8.

➤ **Teste 6 (vf 24 e n 2500) x Teste 8 (vf 45 e n 2500) → M340**

Ao aumentar a velocidade de avanço com rotação em nível superior obteve-se um aumento maior que o dobro na capacidade de fazer furos em relação ao Teste 6. No Teste 8 foram realizados 70 furos, sendo que na maior parte do ensaio as temperaturas permaneceram bem inferiores a 45°C. As forças de avanço deram em torno de 20 N a mais do que no Teste 6. Embora, esse resultado vá contra ao conforto do paciente, essas forças não são tão altas assim, e podem ser minimizadas com maiores ciclos de intermitência

(paradas). No Teste 6 foram executados 30 furos. Ver Gráfico 4.15 c), c1) e d), d1) e Fig. 4.8 e 4.9.

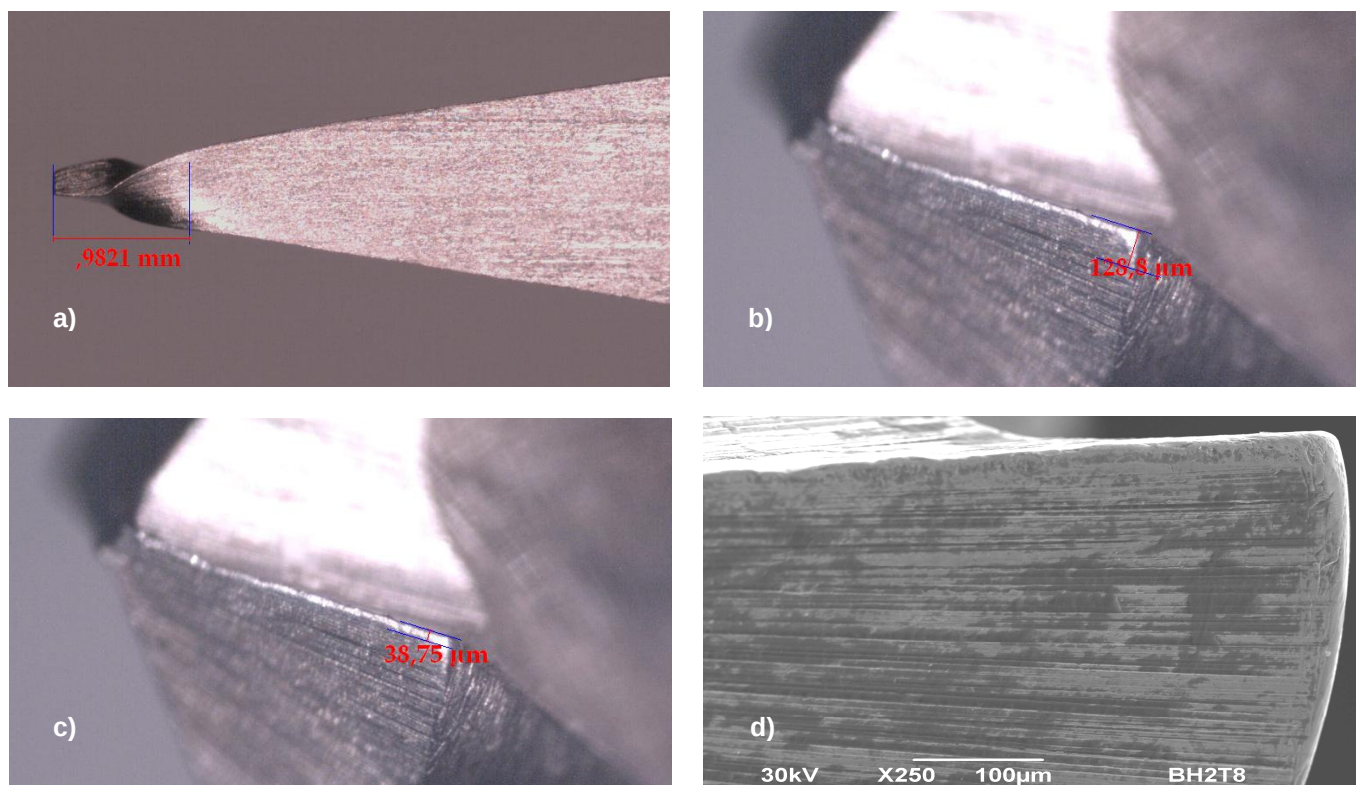


Figura 4.9: Desgaste Teste 8 a) Lança 20x; b) BH2 VB_{Bmax} 45x; c) BH2 VB_{B} 45x; d) BH2 VB 250x MEV.

Finalmente, no Teste 8 verificou-se deformação plástica na ponta da Lança, desgaste de flanco máximo e médio na BH2, Fig. 4.9 a), b), c) e d) em MEV.

➤ Teste 4 (vf 45 e n 1000) x Teste 8 (vf 45 e n 2500) → M340

Quando se utilizou o maior avanço, ao aumentar a rotação observou-se a queda na força de avanço (F_f). Enquanto no Teste 4 a F_f estava acima de 100 N, no Teste 8 a F_f atingiu no máximo 70 N. Também era esperada uma maior capacidade em fazer furos, 70 para o Teste 8 e 40 furos para o Teste 4. Ver Gráfico 4.15 b), b1) e d), d1) e Fig. 4.7 e 4.9.

4.3.2. Segundo planejamento experimental 2³

Nesta etapa foram explorados os materiais de ferramenta zircônia (cerâmica/nível -1) e M340 (aço inoxidável martensítico/nível +1), sendo este último o melhor material de aço inoxidável testado.

4.3.2.1. Análise do número de furos (temperatura)

A Tabela 4.13 apresenta os resultados para o segundo planejamento experimental. A variável de resposta monitorada é o número de furos realizados em cada teste, tendo como critério de fim de vida temperatura igual ou superior a 47°C.

Tabela 4.13: Segundo planejamento experimental 2³ – Resposta em Número de Furos.

Testes	Material	Vel. Avanço [mm/min]	Rotação [rpm]	Nº Furos
1	ZrO ₂	24	1000	1
2	M340	24	1000	1
3	ZrO ₂	45	1000	30
4	M340	45	1000	40
5	ZrO ₂	24	2500	2
6	M340	24	2500	30
7	ZrO ₂	45	2500	3
8	M340	45	2500	70

A seguir o Gráfico 4.16 ilustra qualitativamente a tabela anterior. Novamente, se verifica que as ferramentas feitas do material M340 possui maior capacidade de fazer furos (vida).

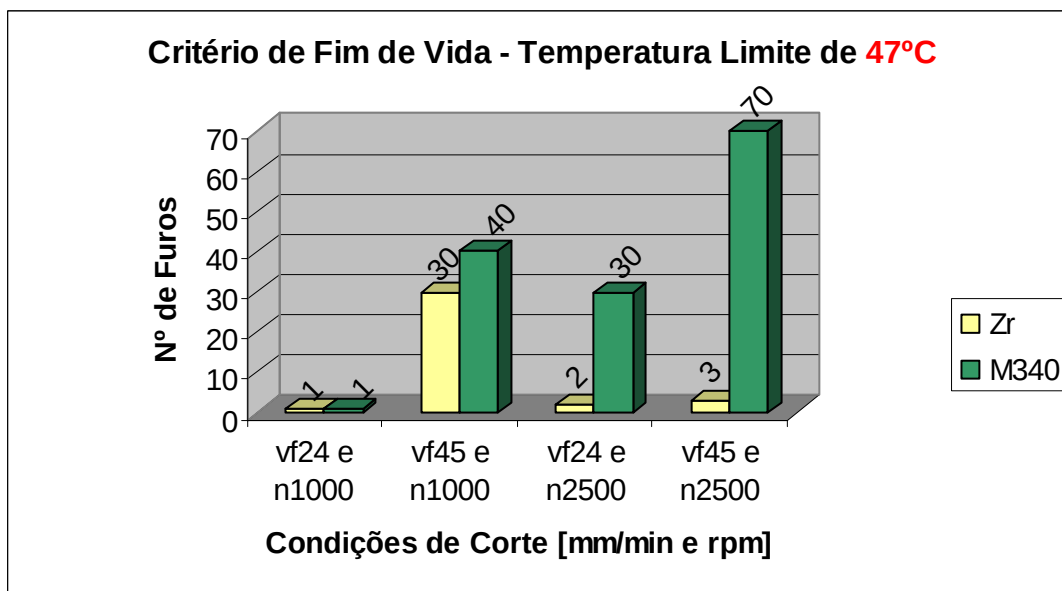


Gráfico 4.16: Número de furos realizados (ZrO₂ e M340).

Estes resultados foram submetidos à análise estatística com intervalo de confiança de 95% e nível de significância de 8% (ou 0,08) e os fatores que apresentaram influências significativas são apresentadas na Tab. 4.14.

Tabela 4.14: Análise de significância do segundo planejamento quanto ao número de furos.

Fatores	Efeito	Err. Pad.	p	IC -95%	IC +95%
Média	22,12500	4,445855	0,007616	9,78133	34,46867
Material	26,25000	8,891710	0,041878	1,56266	50,93734
Vel. Avanç.	27,25000	8,891710	0,037488	2,56266	51,93734
Mat. x n	21,25000	8,891710	0,075179	-3,43734	45,93734

Verifica-se que as variáveis de entrada velocidade de avanço (vf) e material da ferramenta (Mat.) são as mais significativas no aumento da capacidade de se fazer furos. Observa-se que ao variar a vf e o Mat. de um nível -1 para +1 tem-se o efeito de aumentar essa capacidade em média de 27 e 26 furos, respectivamente. Todavia, devido à interação entre o material e a rotação o efeito desta variável não pode ser analisado separadamente. Assim, se verifica o efeito de interação de aumentar em média a quantidade de furos em 21, ao variar a rotação de um nível inferior para um superior.

No Gráfico 4.17 tem-se a influência da variação da velocidade de avanço sobre a variável de saída (Nº de Furos), para os dois níveis de rotação e para cada material de ferramenta.

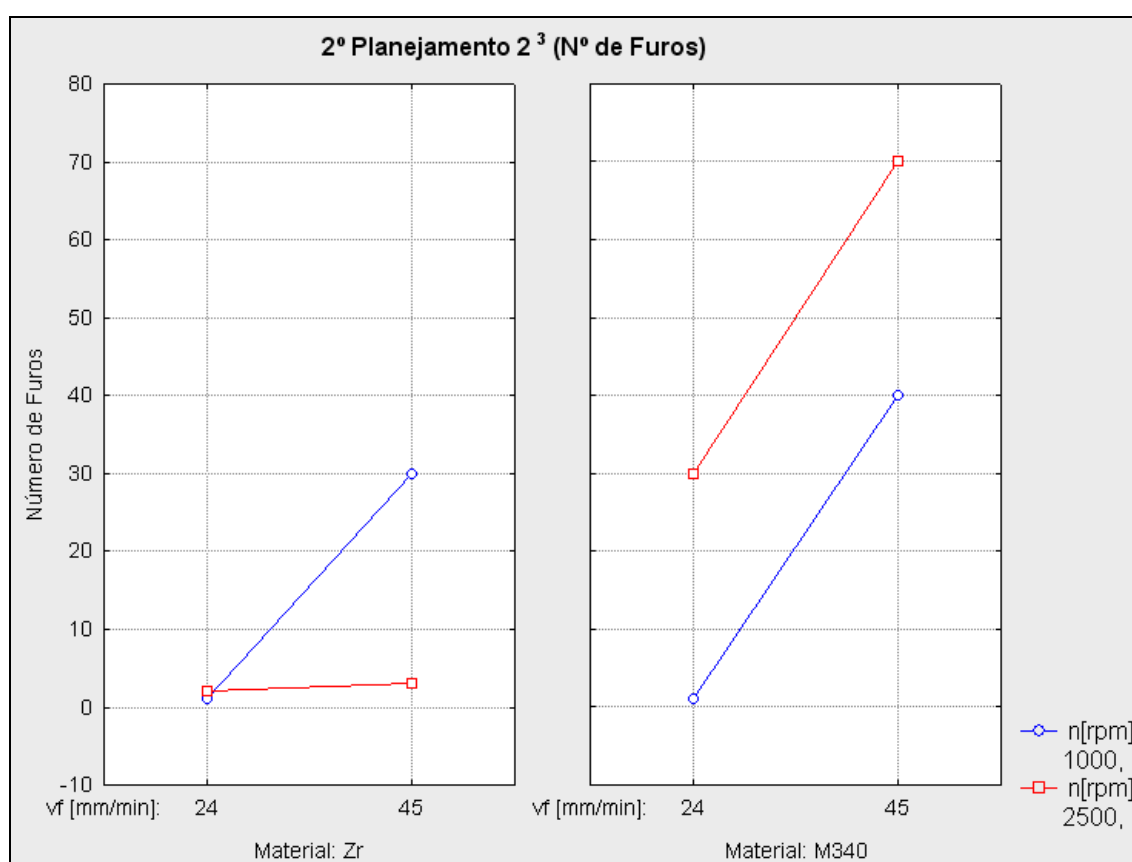


Gráfico 4.17: Influência da variação da velocidade de avanço sobre a capacidade de se fazer furos (ZrO₂ e M340).

Pelo Gráfico 4.17 observa-se que a ferramenta de cerâmica teve um aumento na capacidade de fazer furos, quando a velocidade de avanço foi aumentada ao nível superior, e para uma rotação de 1000 rpm. Isso ocorreu porque o tempo para a dissipação de calor entre a ferramenta (fonte de calor) e a parede óssea foi menor. No entanto, o mesmo comportamento não foi verificado para a rotação mais elevada, de forma que o resultado foi bem inferior em relação ao material M340.

Na seqüência, o Gráfico 4.18 apresenta a influência da variação da rotação sobre o Nº de Furos, para os dois níveis de velocidade de avanço e para os dois materiais de ferramenta.

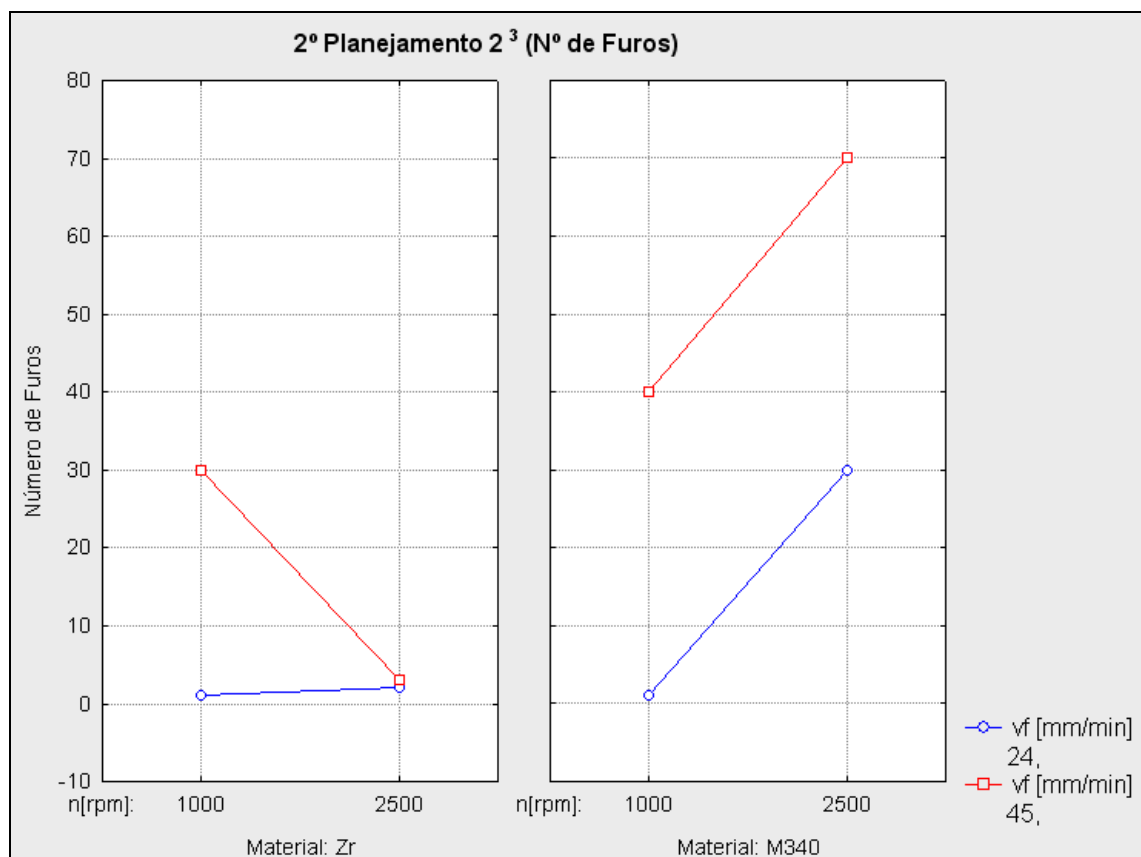


Gráfico 4.18: Influência da variação da rotação sobre a capacidade de se fazer furos (ZrO_2 e M340).

Observa-se pelo Gráf. 4.18 que o material de ferramenta cerâmico teve uma queda relevante na capacidade de corte a 2500 rpm em relação ao M340. Em todos os testes nesta rotação, a ferramenta, simplesmente, falhou catastróficamente. A justificativa para tal resultado pode ser dada baseada em um relatório tribológico do material realizado pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN, 2008). A partir deste pôde se

constatar a ocorrência de fase monoclinica, que não deveria existir por causa da ação do agente estabilizador, que atuaria inibindo-a devido à grande alteração de volume que esta estrutura causa. Também se verificou defeitos na microestrutura decorrentes da presença de aglomerados nos pós de partida (Fig. 4.10), falhas no processo de compactação e sinterização da cerâmica (Fig. 4.11) e elevado tamanho de grão em algumas regiões da cerâmica.

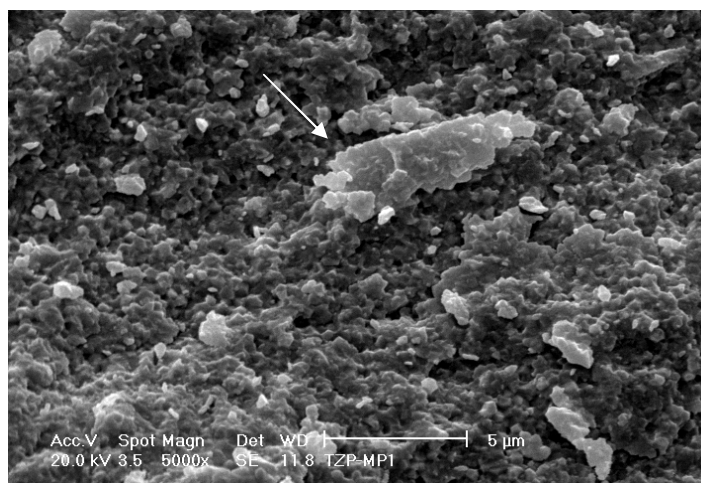


Figura 4.10: Indicação de aglomerado no pó de partida – metalografia (MEV 5000x) (IPEN, 2008).

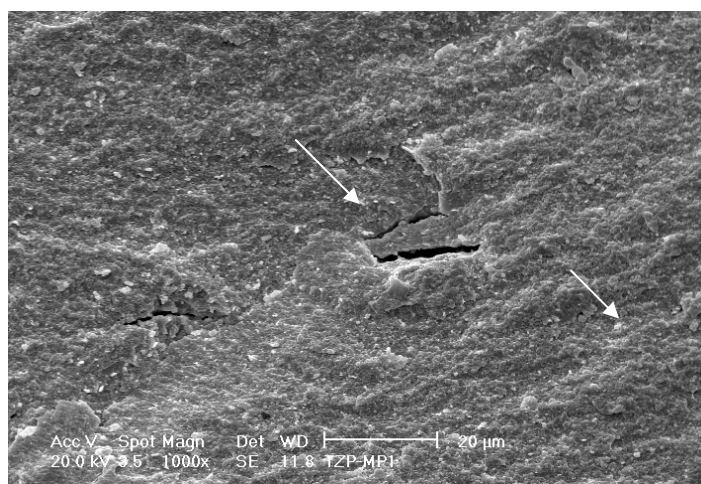


Figura 4.11: Vazio decorrente de falha do processo de fabricação-compactação – metalografia (MEV 1000x) (IPEN, 2008).

Além disso, a zircônia pode sofrer transformação alotrópica de estrutura tetragonal para monoclinica (fragilização) por tensão induzida durante a fabricação da ferramenta por usinagem. Embora, seja um fenômeno de tenacificação, não deve ser tão intenso na

ferramenta em processo de fabricação (Pierre et al., 2005 e Trunec e Chlup, 2009). Finalmente, Hutchings (1992) cita que a zircônia em ambiente úmido sofre envelhecimento que é a fragilização do material, também por transformação de fase. Tudo isso age como intensificadores na propagação de trincas fragilizando a estrutura.

4.3.2.2. Análise de força de avanço

Os valores de força de avanço obtidos nos testes para todas as ferramentas também foram analisados em histogramas, filtrados até se obter um conjunto de pontos de máximo e em seguida foi calculado um intervalo de confiança de 95% e admitido que o valor máximo deste intervalo fosse à força de avanço máxima.

A Tabela 4.15 mostra os valores médios de força de avanço máxima entre o primeiro e o último furo para todas as ferramentas em cada teste.

Tabela 4.15: Resultados médios de força de avanço máxima para todas as ferramentas.

Testes	Força de Avanço Máxima Média [N]			
	Lança	BH2	Piloto	BH3
1	36,43	98,45	13,22	5,84
2	24,51	94,21	7,83	7,36
3	46,66	204,77	32,37	12,05
4	74,66	133,55	9,88	9,25
5	22,49	111,24	3,44	7,21
6	9,28	39,05	5,16	7,31
7	19,45	136,30	10,83	7,36
8	39,33	56,83	8,85	6,69

Observa-se, novamente, que a ferramenta mais exigida é a BH2. Também se verifica elevados valores de força de avanço para a ferramenta Lança, devido a sua geometria desfavorável para o corte, como já mencionado.

A Tabela 4.16 apresenta a estrutura de dados para o segundo planejamento, quanto à força de avanço para a ferramenta BH2. A análise foi feita baseada no valor médio da força de avanço máxima entre os furos de cada teste.

Tabela 4.16: Segundo planejamento experimental 2^3 – Resposta em Força de Avanço Máxima.

Testes	Material	Vel. Avanço [mm/min]	Rotação [rpm]	Forç. Avanç. Máx. [N]
1	ZrO ₂	24	1000	98,45
2	M340	24	1000	94,21
3	ZrO ₂	45	1000	204,77
4	M340	45	1000	133,55
5	ZrO ₂	24	2500	111,24
6	M340	24	2500	39,05
7	ZrO ₂	45	2500	136,30
8	M340	45	2500	56,83

O Gráfico de colunas 4.19 ilustra qualitativamente a tabela anterior.

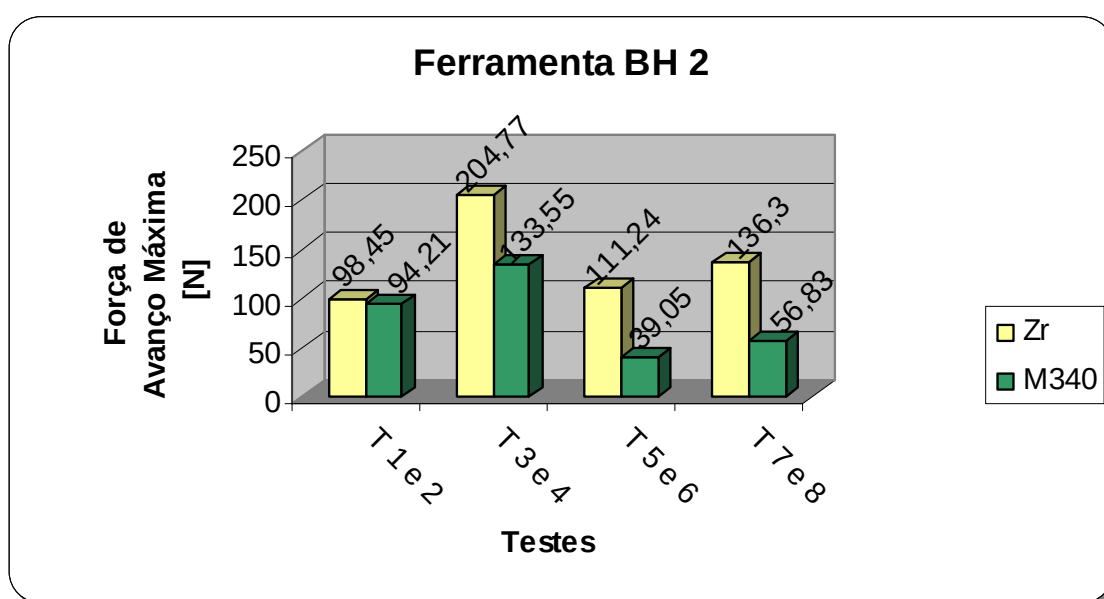


Gráfico 4.19: Força de avanço máxima em média para os testes (ZrO₂ e M340).

Estes resultados foram submetidos à análise com intervalo de confiança de 95% e nível de significância de 8% (ou 0,08) e os fatores que apresentaram influencias significativas são apresentadas na Tab. 4.17.

Tabela 4.17: Análise de significância do segundo planeamento quanto a força de avanço máxima.

Fatores	Efeito	Err. Pad.	p	IC -95%	IC +95%
Média	109,3000	8,80491	0,001126	81,279	137,3212
Material	-56,7800	17,60982	0,048424	-112,822	-0,7377
Vel. Avanç.	47,1250	17,60982	0,075301	-8,917	103,1673
Rotação	-46,8900	17,60982	0,076162	-102,932	9,1523

Verifica-se que a variável de entrada material foi a mais significativa, sendo que ao passar do nível -1 (ZrO_2) para o +1 (M340) tem-se uma diminuição no efeito da força de avanço máxima de aproximadamente 57 N. As variáveis velocidade de avanço e rotação também foram significativas, de modo que ao passar do nível -1 para o +1, tem-se um aumento no efeito da força de avanço para a primeira de 47 N, como esperado, e para a segunda uma importante queda na força de avanço, de aproximadamente 47 N, resultado semelhante ao do primeiro planeamento.

No Gráfico 4.20 apresenta-se a influência da variação da velocidade de avanço sobre a variável de saída (Força de Avanço Máxima), para os dois níveis de rotação e para cada material de ferramenta.

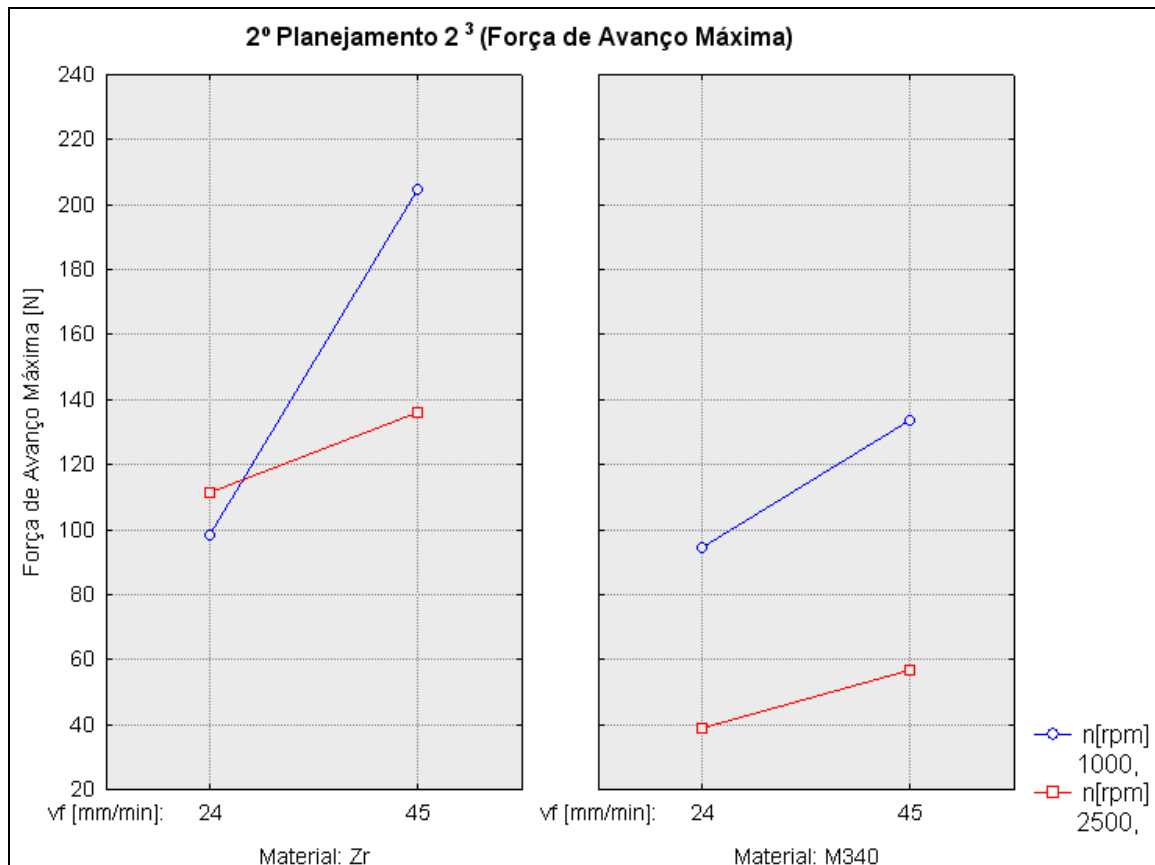


Gráfico 4.20: Influência da velocidade de avanço sobre a força de avanço.

Nota-se pelo gráfico que com o aumento da velocidade de avanço a ferramenta cerâmica também apresentou valores maiores de força de avanço, devido às maiores áreas nos planos de cisalhamento primário e secundário. Porém, se observa diferença nos resultados entre os materiais, na qual se obteve para o aço inoxidável menores valores de força. Isto demonstra que a broca de aço inoxidável teve melhor comportamento durante a formação do cavaco ósseo, oferecendo possivelmente menor adesividade e menores áreas de contato. Uma possível diferença na densidade dos corpos-de-prova (ossos) usinados também pode ter contribuído com estes resultados.

Em seguida, no Gráf. 4.21 apresenta-se a influência da variação da rotação sobre a variável de saída (Força de Avanço Máxima), para os dois níveis de velocidade de avanço e para cada material de ferramenta.

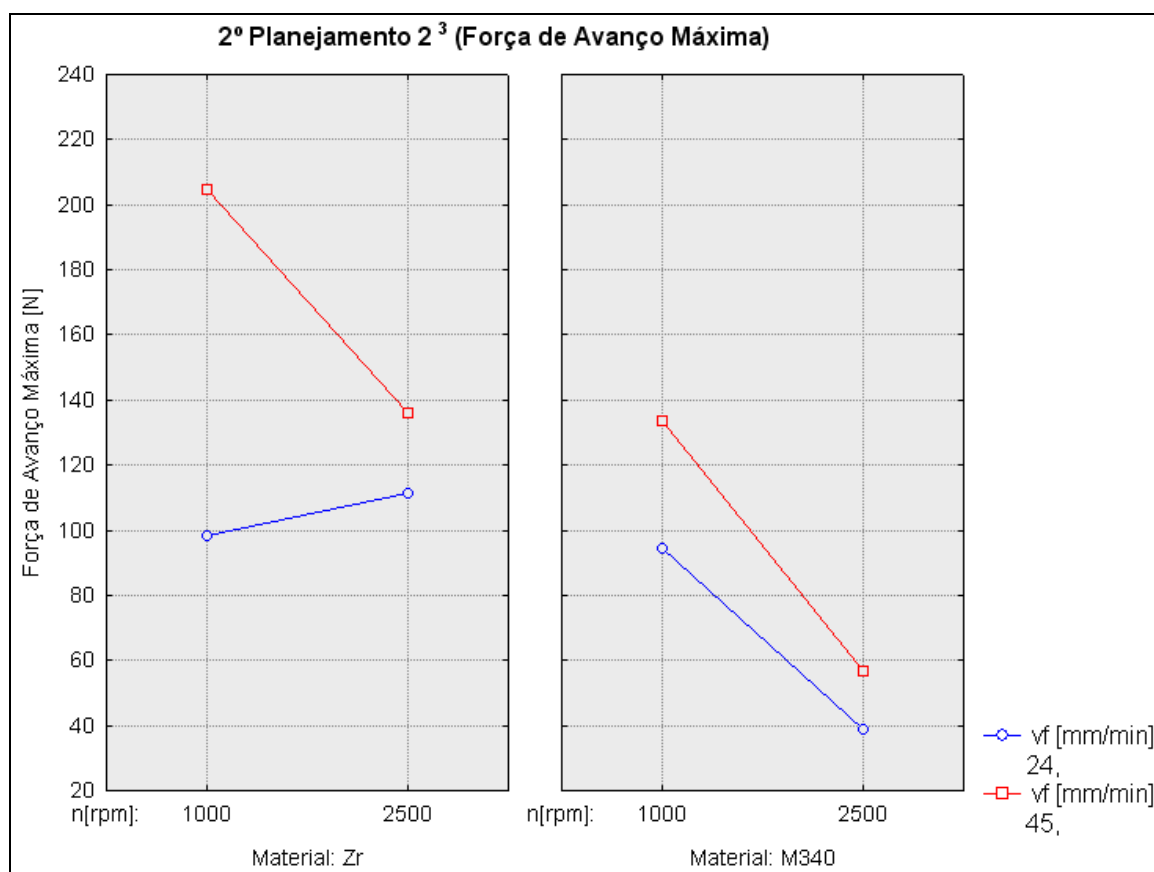


Gráfico 4.21: Influência da rotação sobre a força de avanço.

Para velocidades de avanços superiores e variando a rotação, observa-se queda na força de avanço, Gráf. 4.21. Todavia, como dito anteriormente, a ferramenta de zircônia não teve um comportamento satisfatório quando utilizada em rotações de nível superior (2500 rpm), pois com poucos furos ela fraturava. O mesmo problema pode ser observado

por diversos fabricantes deste tipo de ferramenta, que recomendam não utilizá-las com rotações maiores do que 1000 rpm. Problemas de tenacidade, principalmente, envolvendo presença de fase monoclinica (propagação de trincas) pode ser a explicação para esta restrição.

4.3.1.3. Comportamento do material ZrO_2 (Y-TZP)

Neste item será feito uma breve consideração sobre o material cerâmico em cada teste executado. No Gráfico 4.22 tem-se a evolução da temperatura e a variação da força de avanço máxima ao longo da vida da ferramenta para cada teste executado.

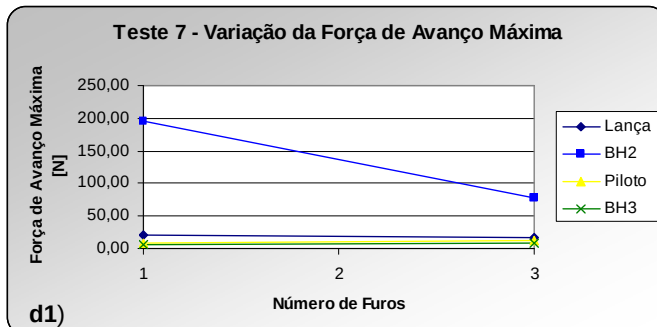
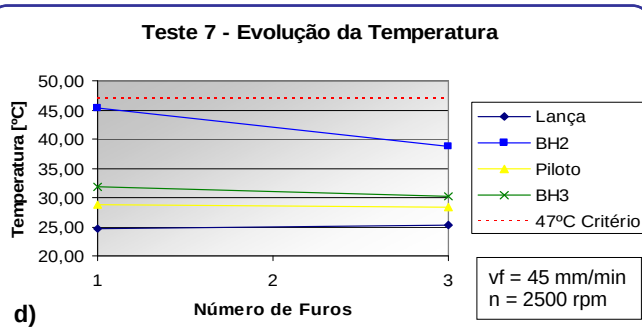
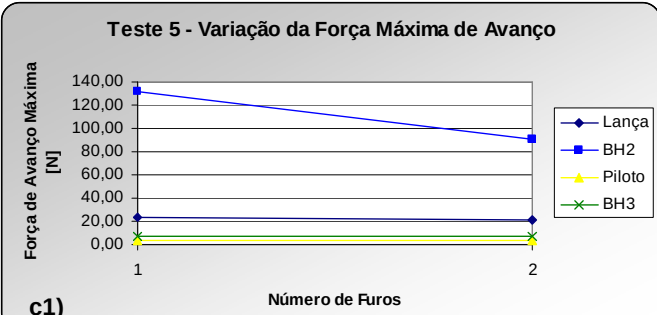
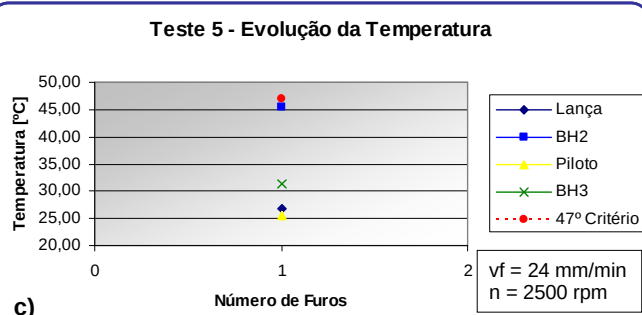
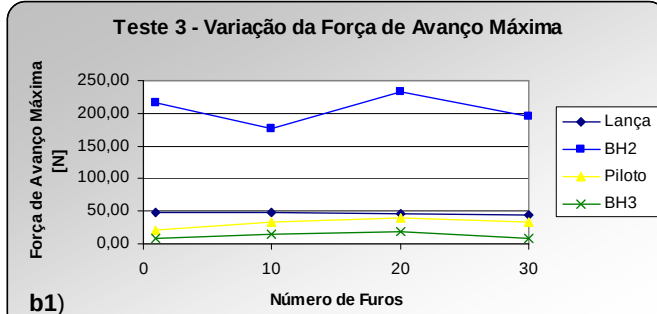
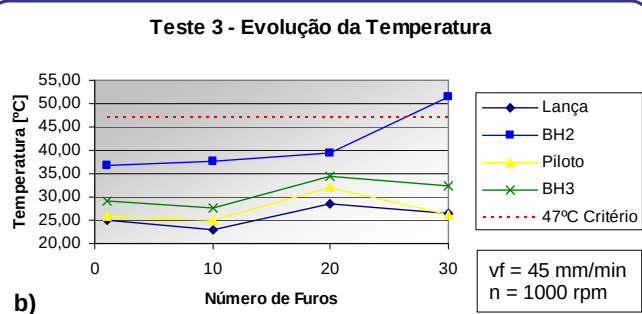
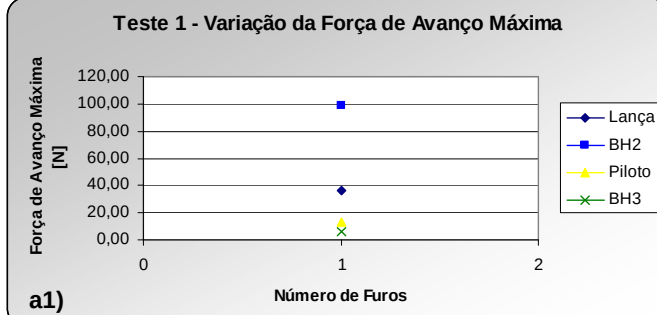
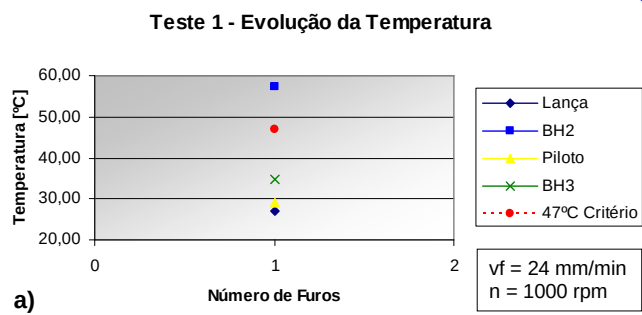


Gráfico 4.22: Evolução das temperaturas e variação das forças de avanço máximas para o material de broca ZrO_2 , Gráfico 4.22 a) a d) e Gráfico 4.22 a1) a d1), respectivamente.

➤ **Teste 1 (vf 24 e n 1000)**

Como nos outros testes esta condição de corte não possibilitou a usinagem (ou a osteotomia) do alvéolo ósseo, sem uma grande dissipação de calor à parede óssea adjacente, podendo ter como consequência danos irreversíveis às células que promovem a osseointegração. Ver Gráfico 4.22 a), a1) e Fig. 4.12.

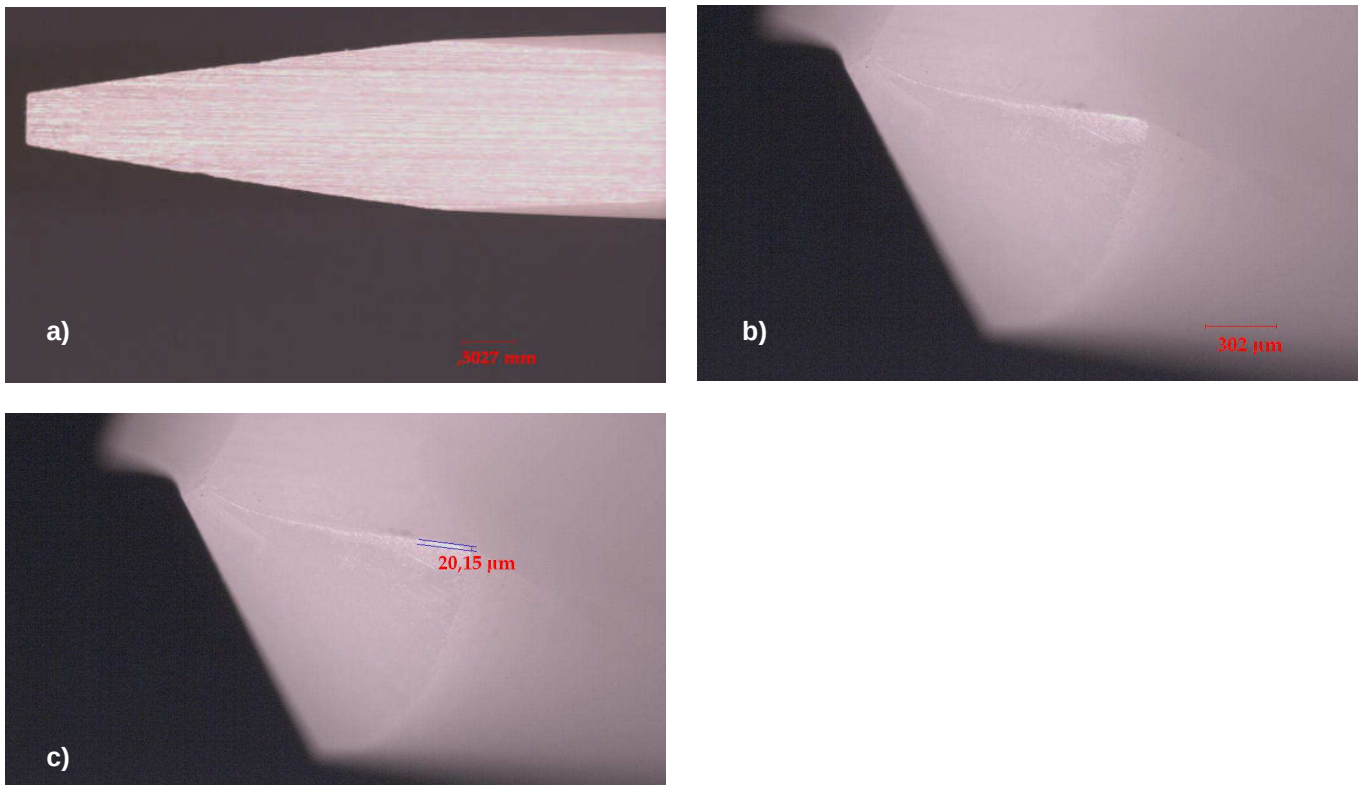


Figura 4.12: Desgaste Teste 1-ZrO₂ a) Lança 20x; b) BH2 45x e c) BH2 VB_B 45x.

Na Figura 4.12 a), b) e c) têm-se, respectivamente, a ferramenta Lança sem evidências de desgaste, uma imagem do flanco da BH2 sem cotar e cotada com um pequeno desgaste.

➤ **Teste 3 (vf 45 e n 1000)**

Novamente, verificou-se para esta condição de corte, que ao aumentar a velocidade de avanço tem-se um aumento na capacidade de fazer furos, devido ao menor tempo para a dissipação de calor. Além disso, este material se mostrou bastante resistente sobre altas cargas de compressão, com resultado muito próximo ao material M340 quanto ao número de furos executado. Ver Gráfico 4.22 b), b1) e Figura 4.13.

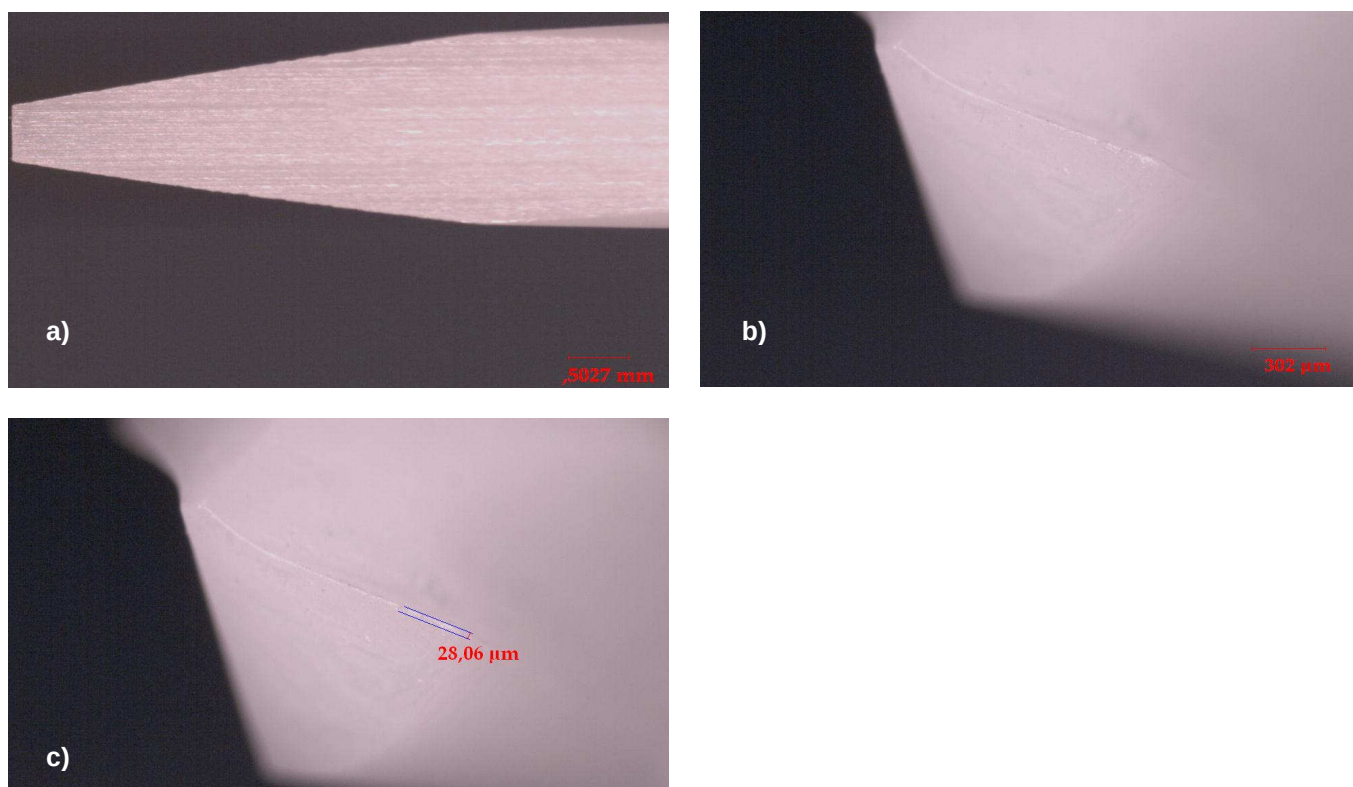


Figura 4.13: Desgaste Teste 3-ZrO₂ a) Lança 20x, b) BH2 VB 45x e c) BH2 VB_B 45x.

Na Figura 4.13 a), b) e c) verifica-se as ferramentas Lança e BH2, na qual se observa novamente um pequeno desgaste para a última broca.

➤ **Teste 5 (vf 24 e n 2500) e Teste 7 (vf 45 e n 2500)**

Em ambos os testes a ferramenta falhou catastroficamente, ficando evidenciada pelos comentários já feitos a influência negativa de elevadas rotações sobre a vida da ferramenta. Ver Gráfico 4.22 c), c1) e d), d1) e Fig. 4.14 e 4.15.

Na Figura 4.14 a), b) e c) observa-se a ferramenta Lança sem evidências de desgaste, na sequência tem-se uma imagem da ferramenta BH2 fraturada, e finalmente, uma imagem da fratura, na qual se pode observar possíveis marcas de praia (seta) o que indica movimento de discordância e falha por fadiga.

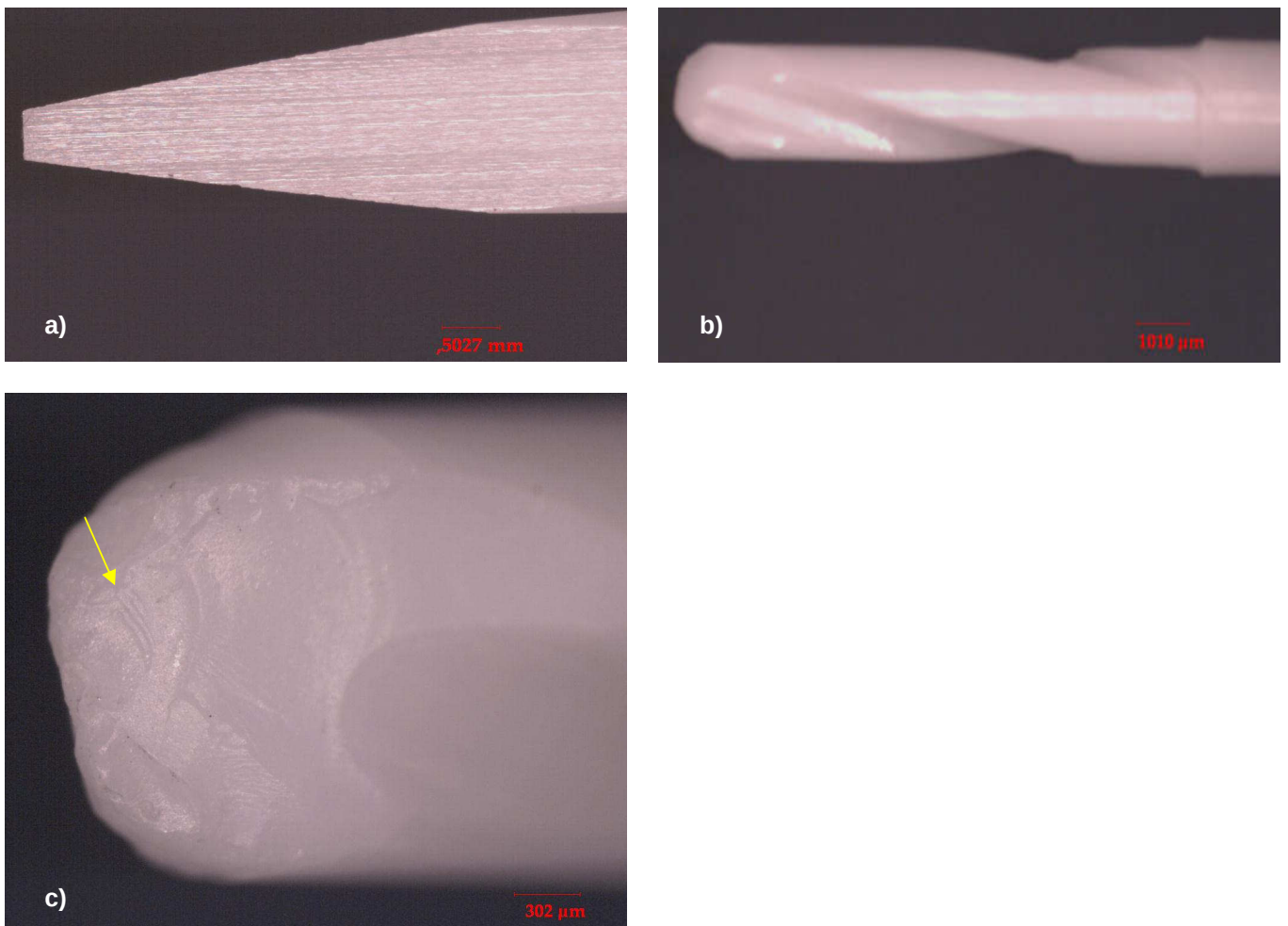


Figura 4.14: Desgaste Teste 5-ZrO₂ a) Lança 20x, b) BH2 10x e c) BH2 45x.

Finalmente, as Figura 4.15 a), b) e c) mostram algumas ferramentas do Teste 7, sendo que a Lança não possui evidências de desgaste, na sequência tem-se a imagem da ferramenta BH2 fraturada, e uma imagem da fratura, na qual também se observa possíveis marcas de praia em toda a região indicada pela seta.

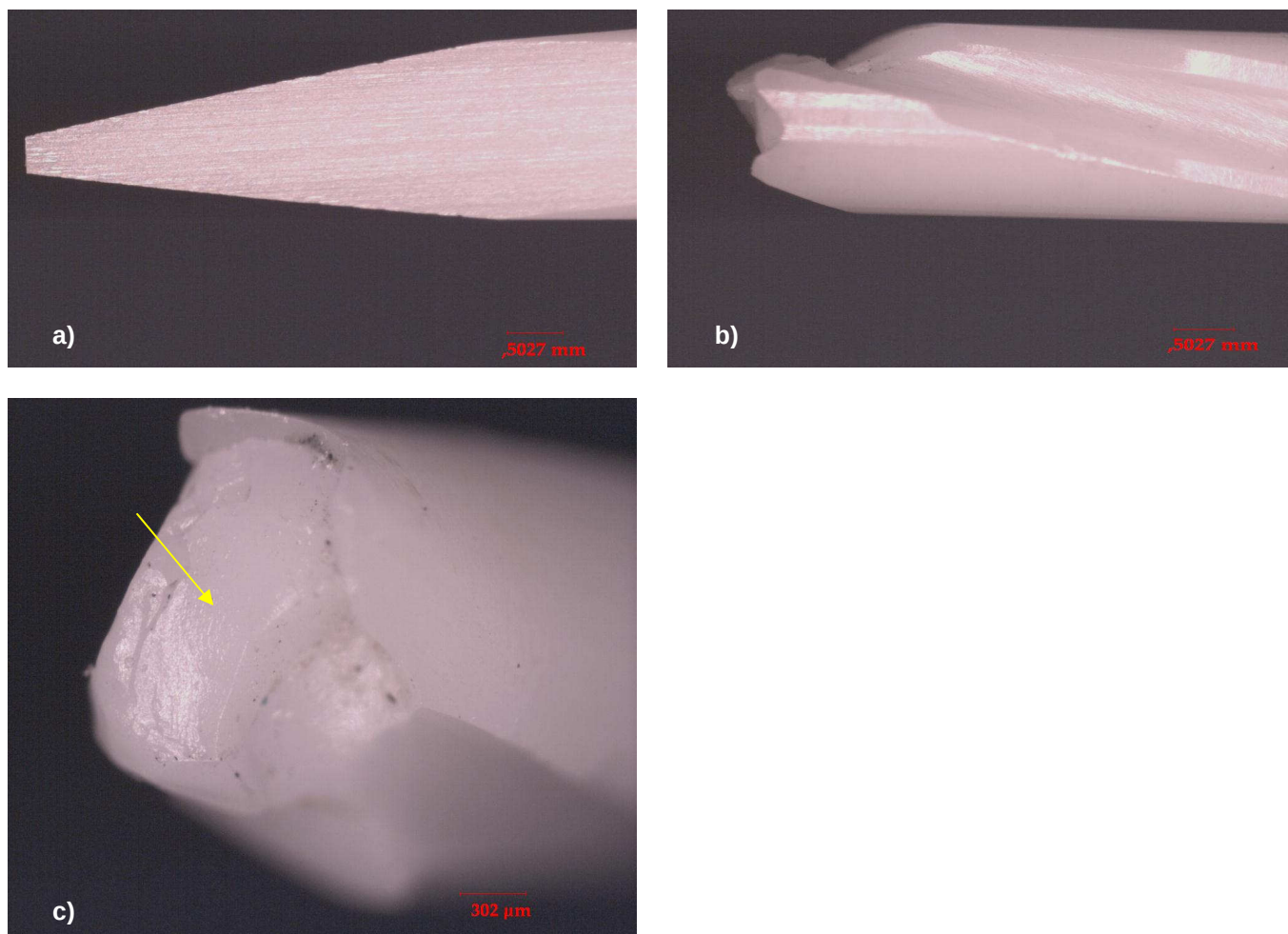


Figura 4.15: Desgaste Teste 7-ZrO₂ a) Lança, b) BH2 20x e c) BH2 45x.

4.3.3. Planejamento composto central (PCC)

Neste planejamento serão explorados os resultados da broca mais exigida para o melhor material de ferramenta testado, ou seja, a BH2 para o aço inoxidável martensítico M340, com o objetivo de levantar superfícies de resposta que possam indicar a maximização ou a minimização das variáveis de saída monitoradas. O estudo foi realizado fazendo uso do software STATISTICA 6.0.

4.3.3.1. PCC para análise do número de furos (temperatura)

A Tabela 4.18 mostra o planejamento com as variáveis originais e codificadas, além da resposta em número de furos, tendo como critério de fim de vida a temperatura. Observa-se que foram realizadas três réplicas no centro (C) para melhor ajuste da superfície.

Tabela 4.18: PCC resposta em número de furos.

Testes	Variáveis Originais		Variáveis Codificadas		Nº Furos
	Vel. Avanço [mm/min]	Rotação [rpm]	X ₁	X ₂	
1	24	1000	-1	-1	1
2	24	2500	-1	+1	30
3	45	1000	+1	-1	40
4	45	2500	+1	+1	70
5	22,5	1750	-1,14744	0	1
6	46,5	1750	+1,14744	0	30
7	34,5	889	0	-1,14744	1
8	34,5	2611	0	+1,14744	20
9 (C)	34,5	1750	0	0	20
10 (C)	34,5	1750	0	0	1
11 (C)	34,5	1750	0	0	10

O Gráfico 4.23 apresenta qualitativamente a tabela acima, na sequência faz-se toda a elaboração e análise do planejamento composto central.

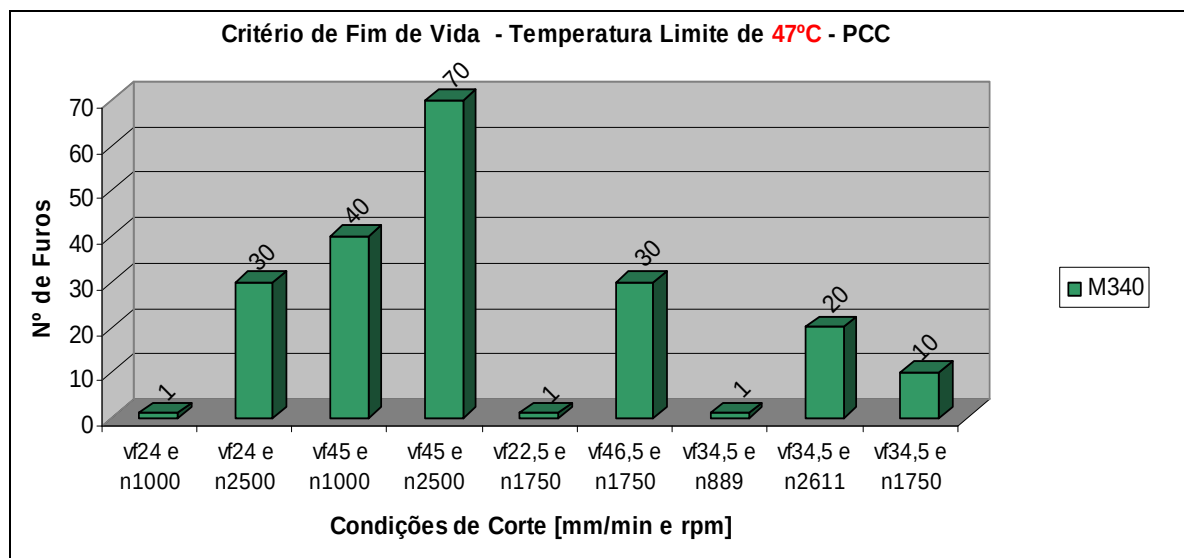


Gráfico 4.23: Número de furos realizados no PCC.

A Equação 4.4 representa a superfície de resposta de segunda ordem ajustada por mínimos quadrados para o número de furos realizados em cada teste.

$$y = 6,395 + 16,926x_1 + 12,181x_2 + 13,481x_1^2 + 9,683x_2^2 + 0,25x_1x_2 \quad (4.4)$$

Cálculos matriciais foram realizados a partir da Equação (4.5), seguindo o modelo da Equação 4.4, para a determinação das raízes características que indicam a natureza do

ponto estacionário se é de máximo, mínimo ou sela, e a própria determinação do ponto estacionário que revela os valores dos códigos que são utilizados na superfície de resposta para mostrar o resultado.

$$y = b_0 + x'b + x'Bx \quad (4.5)$$

Para, $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$; $b = \begin{pmatrix} 16,926 \\ 12,181 \end{pmatrix}$ e $B = \begin{pmatrix} 13,481 & 0,25/2 \\ 0,25/2 & 9,683 \end{pmatrix}$ e o símbolo (') significando

transposta.

A determinação das raízes características (λ) foi calculada a partir da Matriz (M 4.1) que se desdobra na Equação (4.6).

$$\begin{bmatrix} 13,481 - \lambda & 0,125 \\ 0,125 & 9,683 - \lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (M 4.1)$$

$$\lambda^2 - 23,164\lambda + 130,521 = 0 \quad (4.6)$$

Portanto, as raízes características foram:

$$\lambda_1 = 13,485$$

$$\lambda_2 = 9,679, \text{ sendo } \lambda > 0, \text{ implica que o ponto estacionário } (x_0) \text{ é um ponto de}$$

mínimo, ou seja, a condição em que a capacidade de se fazer furos é mínima.

Isto pode ser evidenciado ajustando a superfície de resposta para a forma canônica, Equação (4.7), na qual se verifica que se movendo nos eixos w_1 ou w_2 tem-se um aumento na resposta (Nº de furos), sendo y_0 a resposta estimada no ponto estacionário.

$$y = y_0 + 13,458w_1^2 + 9,679w_2^2 \quad (4.7)$$

O ponto estacionário foi calculado da seguinte forma, Matriz (M 4.2).

$$x_0 = -\frac{1}{2}B^{-1}b \quad (M 4.2)$$

$$x_{10} = -0,622$$

$$x_{20} = -0,621, \text{ são os valores codificados calculados e dentro da região experimental}$$

testada.

As variáveis originais (ε) foram traduzidas a partir das variáveis codificadas no ponto estacionário (x_{i0}) através da seguinte Equação (4.8).

$$x_{i0} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\frac{(\varepsilon_{+1} - \varepsilon_{-1})}{2}} \quad (4.8)$$

Sendo, ε_0 , ε_{+1} e ε_{-1} os valores das variáveis originais nos seus níveis de codificação.

Assim, se obtiveram as seguintes condições de corte, na qual se tem a minimização da resposta:

$$vf_0 = -0,622 \frac{(45 - 24)}{2} + 34,5 \rightarrow vf_0 = 28 \text{ mm/min}$$

$$n_0 = -0,621 \frac{(2500 - 1000)}{2} + 1750 \rightarrow n_0 = 1284 \text{ rpm.}$$

Finalmente, o Gráfico 4.24 traz a superfície de resposta plotada para o número de furos, na qual fica evidenciado que as regiões próximas ao ponto estacionário diminuem muito a capacidade de se fazer furos para a ferramenta BH2, pois são condições de corte que promovem uma geração de calor muito mais intensa do que as de nível superior +1 ou + α .

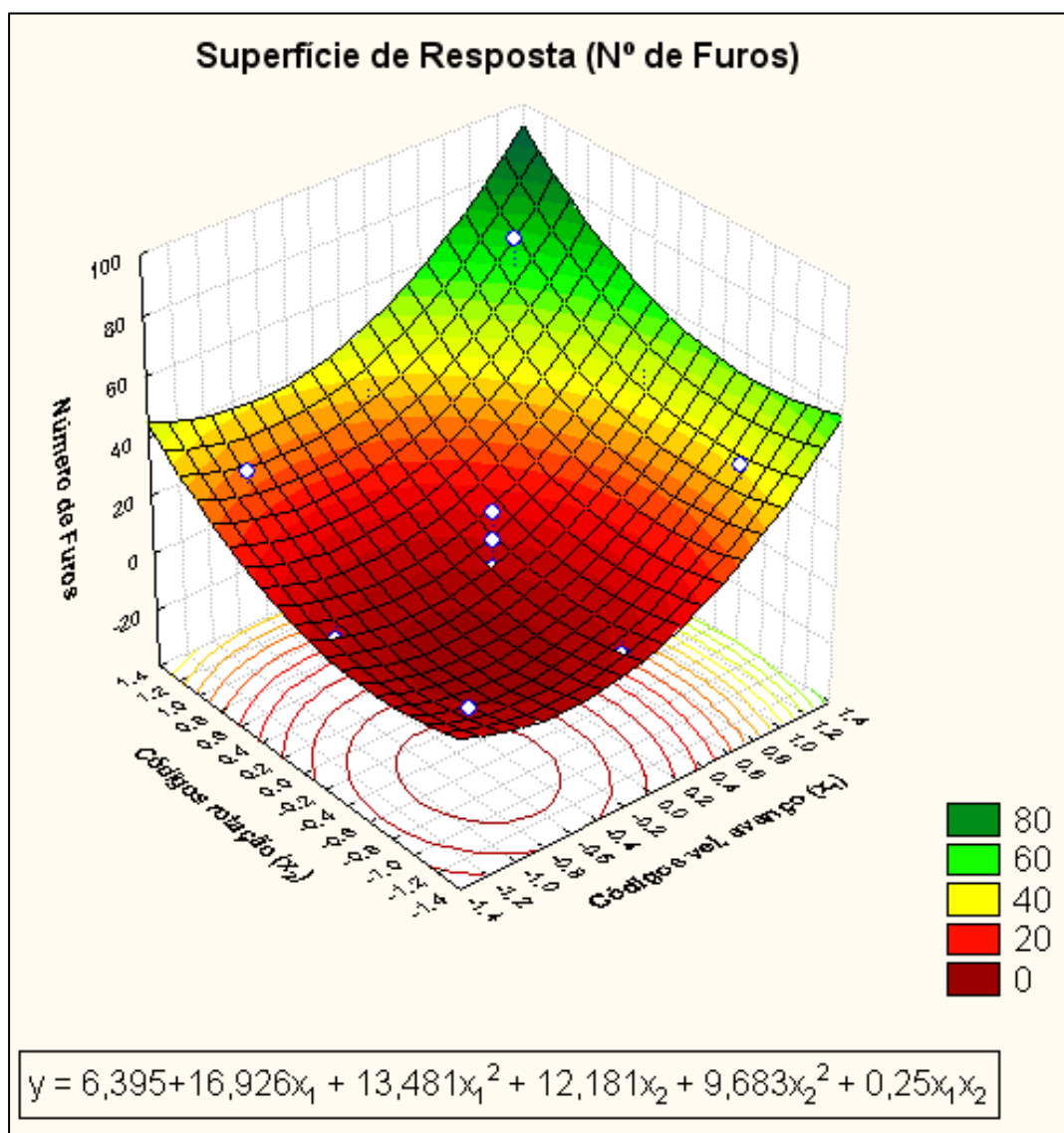


Gráfico 4.24: Superfície de resposta para o número de furos.

A representação da superfície de resposta ajustada para as variáveis originais pode ser vista no Gráf. 4.25.

Todavia, se torna necessário citar que a parte negativa do eixo z (Número de Furos) nos Gráfs. 4.24 e 4.25, não tem sentido físico, apenas indica que em condições de corte inferiores não se consegue fazer furos sem que o critério de fim de vida de 47°C seja alcançado.

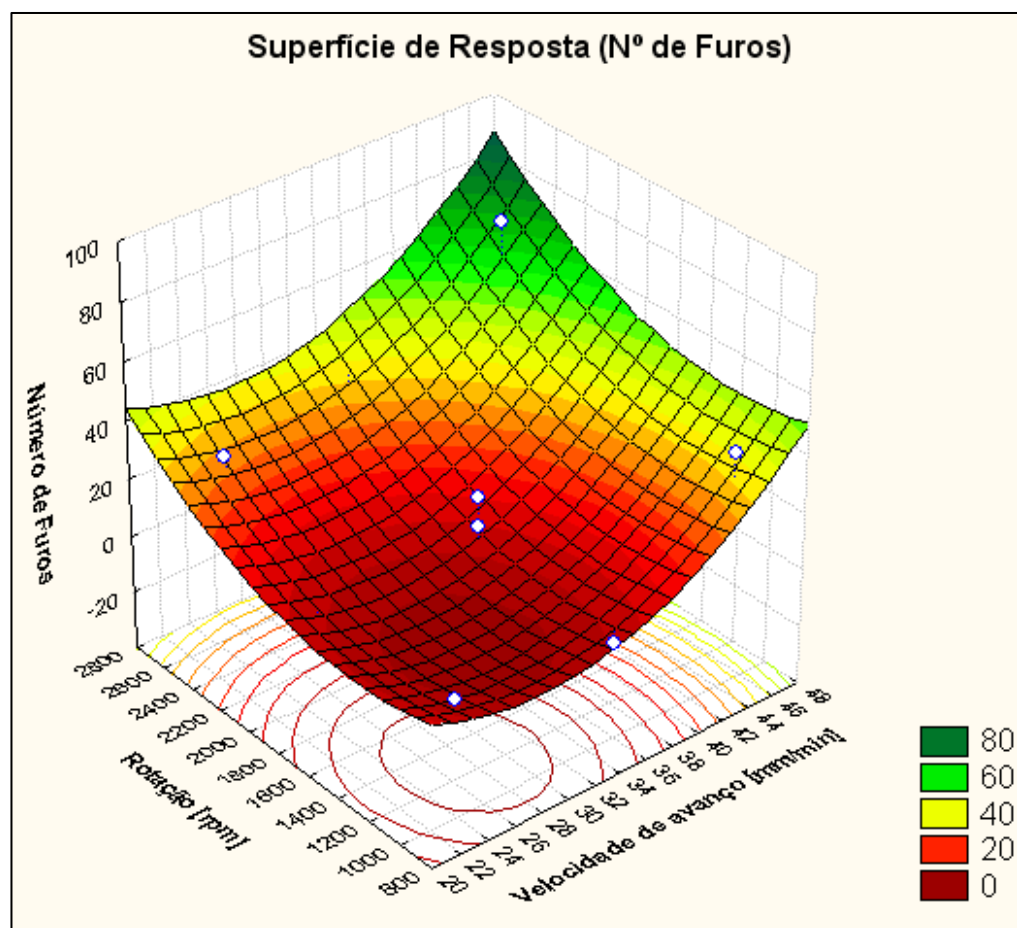


Gráfico 4.25: Representação gráfica da superfície de resposta (Nº de Furos) ajustada para as variáveis originais.

4.3.3.2. PCC para força de avanço máxima

A Tabela 4.19 apresenta o planejamento com as variáveis originais e codificadas, além da resposta em Newtons para força de avanço máxima média, calculada a partir dos valores obtidos durante cada teste. Observa-se que foram realizadas três réplicas no centro (C).

Tabela 4.19: PCC resposta em força de avanço máxima.

Testes	Variáveis Originais		Variáveis Codificadas		F. Av. Máx. [N]
	Vel. Avanço [mm/min]	Rotação [rpm]	X ₁	X ₂	y
1	24	1000	-1	-1	94,21
2	24	2500	-1	+1	39,05
3	45	1000	+1	-1	133,55
4	45	2500	+1	+1	56,83
5	22,5	1750	-1,14744	0	86,30
6	46,5	1750	+1,14744	0	124,55
7	34,5	889	0	-1,14744	187,43
8	34,5	2611	0	+1,14744	45,01
9 (C)	34,5	1750	0	0	69,85
10 (C)	34,5	1750	0	0	76,80
11 (C)	34,5	1750	0	0	80,84

O Gráfico 4.26 apresenta qualitativamente a tabela acima, na sequência tem-se toda a elaboração e análise do planejamento composto central para a força de avanço máxima.

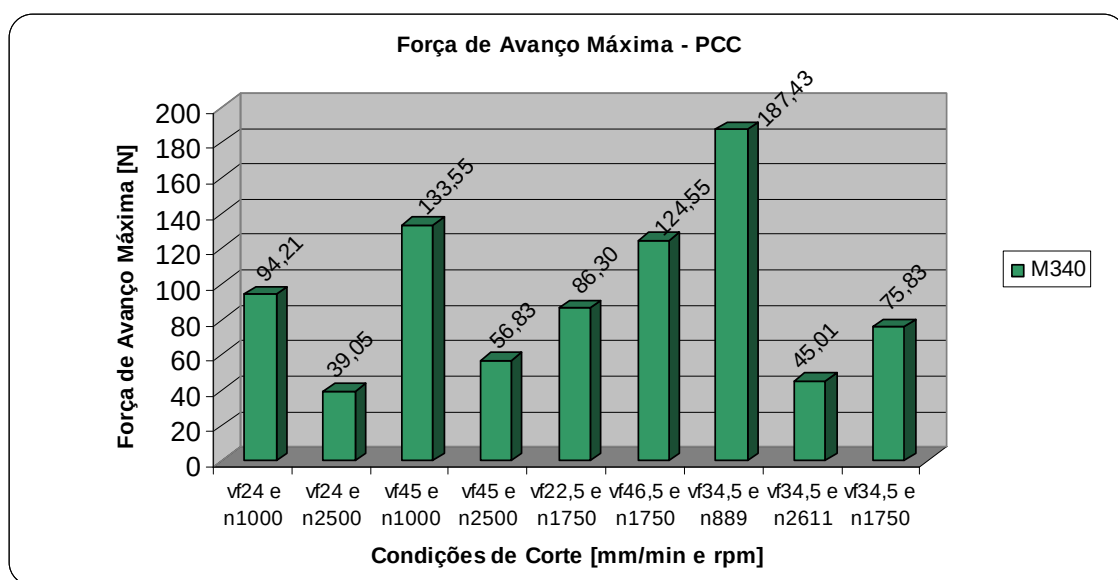


Gráfico 4.26: Força de avanço máxima no PCC.

A Equação 4.9 representa a superfície de resposta de segunda ordem ajustada por mínimos quadrados para a força de avanço máxima.

$$y = 84,903 + 15,228x_1 - 44,518x_2 + 0,460x_1^2 + 8,657x_2^2 - 5,390x_1x_2 \quad (4.9)$$

A determinação das raízes características e do ponto estacionário foi realizada por cálculos matriciais, a partir da Equação (4.5) citada no item anterior, porém agora seguindo o modelo da Equação (4.9).

$$\text{Para, } x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}; \quad b = \begin{pmatrix} 15,228 \\ -44,518 \end{pmatrix} \quad \text{e} \quad B = \begin{pmatrix} 0,460 & -5,390/2 \\ -5,390/2 & 8,657 \end{pmatrix} \quad \text{e o símbolo } (')$$

significando transposta.

A determinação das raízes características (λ) foi calculada a partir da Matriz (M 4.3) que se desdobra na Equação (4.10).

$$\begin{bmatrix} 0,460 - \lambda & -2,695 \\ -2,695 & 8,657 - \lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{M. 4.3})$$

$$\lambda^2 - 9,117\lambda - 3,281 = 0 \quad (4.10)$$

Portanto, as raízes características calculadas foram:

$$\lambda_1 = -0,347 \quad \lambda_2 = 9,464, \quad \text{como } \lambda \text{ possui sinais diferentes, significa que o ponto estacionário}$$

(x_0) não é um ponto de máximo nem um ponto de mínimo, ou seja, é um ponto de sela.

Calculando o ponto estacionário verifica-se que este também está fora da região experimental para as duas variáveis estudadas.

$$\begin{aligned} x_{10} &= 1,806 \\ x_{20} &= 3,134 \end{aligned}, \text{ maior do que } +\alpha = +1,14744$$

Estes resultados eram esperados, são coerentes e a interpretação pode ser feita a partir do Gráf. 4.27 de superfície de reposta para força de avanço máxima. Pelo gráfico apreende-se que aumentando a velocidade de avanço e mantendo a rotação em torno de valores de mínimo tem-se uma elevação da força de avanço tendendo ao infinito. Ao contrário, a diminuição da velocidade de avanço conduz a valores mínimos de força. O mesmo se verifica para a rotação, na qual o seu aumento provoca a diminuição da força de avanço indefinidamente, do contrário se tem o aumento desta.

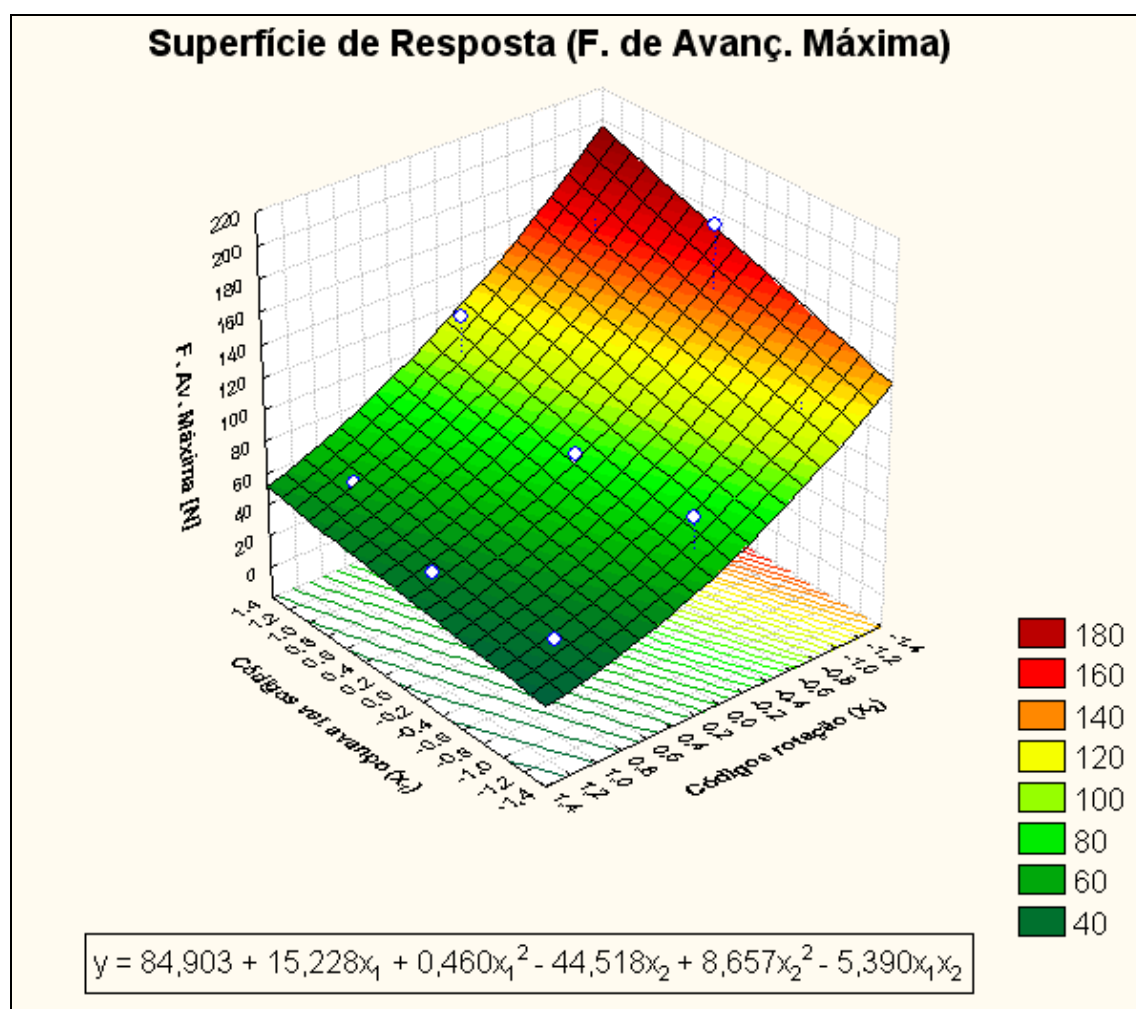


Gráfico 4.27: Superfície de resposta para a força de avanço máxima.

O Gráfico 4.28 representa a superfície de resposta ajustada para as variáveis originais.

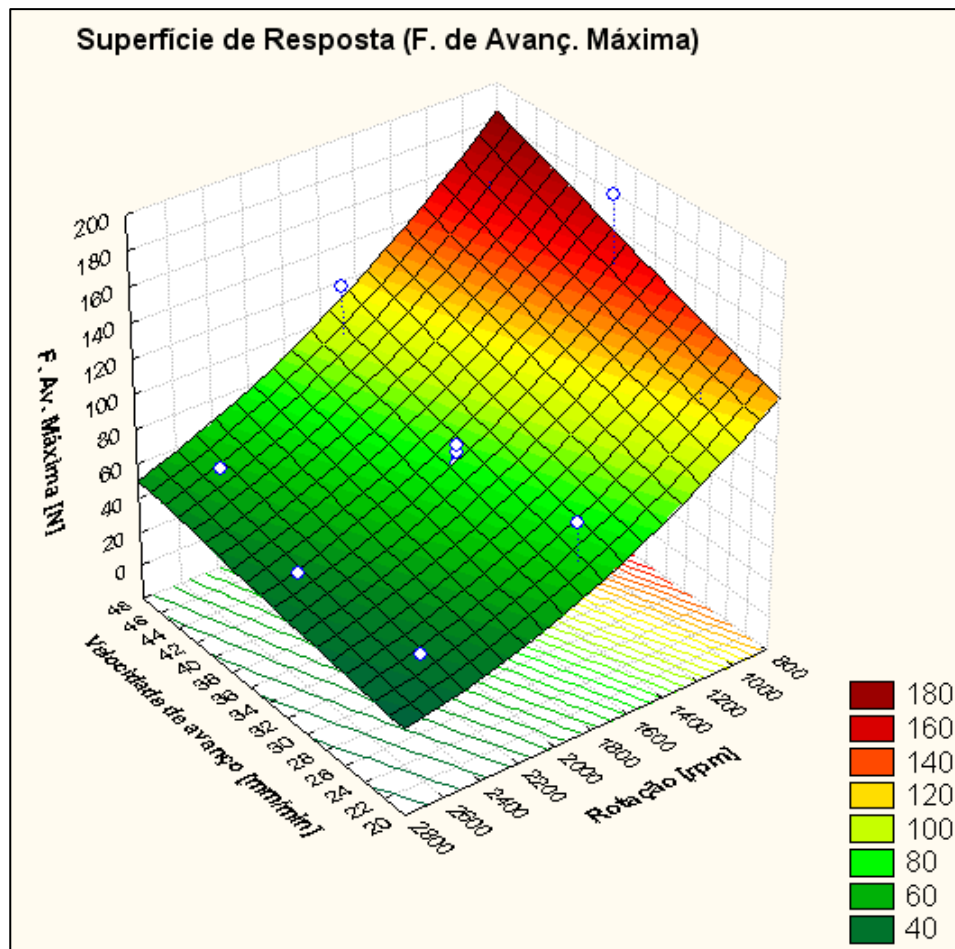


Gráfico 4.28: Representação gráfica da superfície de resposta (F. de Avanç. Máxima) ajustada para as variáveis originais.

4.3.4. Resultados complementares

Neste item serão apresentados os resultados quanto às propriedades do osso de tíbia bovina e do ensaio de inserção de implante.

4.3.4.1. Propriedades do osso de tíbia bovina

Na Tabela 4.20 tem-se duas propriedades mecânicas e uma física do osso de tíbia bovina. São propriedades relevantes neste tipo de estudo e servem para relacionar materiais.

Tabela 4.20: Propriedades relevantes do osso de tíbia bovina.

Testes	Densidade Aparente [g/mm ³]	Resistência a Compressão [MPa]	Módulo de Elasticidade [MPa]
1	2,05	90,33	622
2	1,97	93,14	490
3	1,98	75,99	622
4	2,01	68,41	567
5	1,91	77,36	621
Média ± Desv. Pad.	1,98 ± 0,05 (1,95)	81,05 ± 10,39 (193)	584,4 ± 57,84 (17000)

Comparando estes resultados com os apresentados em relação ao fêmur humano, no item 2.3 da Revisão Bibliográfica, entre parênteses na tabela, verifica-se uma notável diferença entre os resultados para as propriedades mecânicas, que podem ser justificados por serem ossos diferentes e de espécies diferentes ou por diferença no modo de executar o ensaio. Contudo, se observa correlação quanto aos valores de densidade.

4.3.4.2. Teste de inserção de implantes

Os resultados deste teste são apresentados em duas tabelas em função da profundidade de inserção dos implantes em tíbia bovina com sítios realizados por um kit de brocas desgastadas (em fim de vida) e por um kit de brocas novas, nas mesmas condições de corte.

Na Tabela 4.21 tem-se os resultados para o kit de brocas desgastadas.

Tabela 4.21: Resultados de inserção para brocas desgastadas.

Brocas Velhas: vf45 n2500 vazão 160 ml/min			
Nº Furo	Profundidade [mm]	Torque Aperto [N.cm]	Torque Desaperto [N.cm]
1	1,5	50	60
2	1,5	50	60
3	3	50	60

Na Tabela 4.22 tem-se os resultados para o kit de brocas novas.

Tabela 4.22: Resultados de inserção para brocas novas.

Brocas Novas: vf45 n2500 vazão 160 ml/min			
Nº Furo	Profundidade [mm]	Torque Aperto [N.cm]	Torque Desaperto [N.cm]
1	1,5	50	60
2	1,5	50	50
3	2	50	50

Pelas duas tabelas nota-se que não houve diferença nos resultados de inserção de implantes entre os kits de brocas. Também é importante ressaltar que devido a grande espessura da cortical óssea e pelo conjunto de ferramentas utilizadas de diâmetros padronizados, não foi possível alcançar uma maior profundidade de inserção dos mesmos, sem que estes travassem junto à parede óssea.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo tem como objetivo apresentar as conclusões, além de propor sugestões para trabalhos futuros.

5.1. Conclusões

Do modo como os testes foram executados verificou-se que o melhor material de ferramenta testado foi o aço inoxidável martensítico M340 da Böhler. Com este material foi possível obter uma maior quantidade de furos (vida) para praticamente todas as condições de corte testadas, quando comparado com as brocas do aço AISI 316L, devido a sua baixa resistência mecânica, e com as de zircônia, por causa da sua baixa tenacidade.

Observou-se que a broca helicoidal de 2 mm de diâmetro (BH2) foi a ferramenta mais exigida, proporcionando os maiores níveis de temperatura e de força de avanço. A Lança devido a sua geometria desfavorável ao corte com ângulos de saída bem negativos e ausência de ângulo de hélice, fizeram com que a força monitorada também fosse alta, apesar do pequeno percurso de corte.

Analisando os níveis de significância e os efeitos conclui-se que a velocidade de avanço é a principal variável na diminuição da temperatura ao redor da parede óssea. Isto porque, quanto mais rápido a ferramenta realizar o corte, menor será o tempo para que haja dissipação de calor ao osso. O aumento da rotação também fez com que a capacidade de se fazer furos fosse aumentada, porém sua influência mais relevante foi na diminuição da força de avanço. Deste modo, o aumento desta variável fez com que houvesse uma diminuição da área de contato cavaco-ferramenta, diminuindo a força de usinagem e como consequência a força de avanço. Tudo isso conduz a um maior conforto cirúrgico ao paciente.

De forma geral, o Planejamento Composto Central para Número de Furos conseguiu ilustrar, que usinando com baixas velocidades de avanço e rotação, a capacidade de se fazer furos foi bastante reduzida, devido à maior geração de calor.

Finalmente, quando se usinou com os maiores parâmetros de corte (45 mm/min e 2500 rpm) foram obtidos os menores valores de temperatura e um estado de conformidade aos padrões clínicos utilizados para valores de força de avanço. Significa dizer, que foi obtido um maior número de furos realizados, ou seja, uma maior vida de ferramenta do que em relação às condições de corte usando parâmetros menores. Isto nos leva a crer em uma possível quebra de paradigma, na qual ainda se acredita em alguns meios da odontologia que existe um menor trauma ósseo, quando se trabalha com condições inferiores.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Explorar mais os resultados encontrados neste trabalho buscando maior validação dos mesmos;
- Fazer um estudo de aplicabilidade prática dos resultados encontrados e suas conseqüências na rotina de implantodontia nos consultórios odontológicos.
- Conhecer quais serão as conseqüências das altas temperaturas sobre o cavaco ósseo, quando reutilizado como enxerto ósseo;
- Padronizar a densidade da matéria-prima através de densidade radiográfica das amostras neste tipo de estudo, de modo a minimizar erros sistemáticos;
- Prover modelos que consigam prever a temperatura na interface da parede óssea após a usinagem;
- Verificar a aplicabilidade dos fundamentos de usinagem no corte de tecidos ósseos;
- Explorar ferramentas cerâmicas, devido a sua inércia química e alta resistência a compressão, porém com substratos diferentes (cerâmicas a base de Al_2O_3 e a base de Si_3N_4).

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexsander, L. G. **Análise do Comportamento de Ferramentas de Corte com Diferentes Revestimentos e seu Efeito Sobre a Geração de Calor no Osso**. 2005. 103f. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba/PR.

Allan, W. A.; Williams, E. D. e Kerawala, C. J. Effects of Repeated Drill Use on Temperature of Bone During Preparation for Osteosynthesis Self-Tapping Screws. **British J. of Oral and Maxillofacial Surgery**. v. 43, p. 314-319. 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1977, “Norma TB-111 - Brocas Helicoidais – Terminologia”, Rio de Janeiro, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1982, “Norma NBR 6163 – Ferramentas de Usinagem – Geometria da Cunha Cortante”, Rio de Janeiro, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1999, “NBR ISO 13356 – Implantes para Cirurgia – Materiais cerâmicos a base de zircônia tetragonal estabilizada com ítria (Y-TZP)”, Rio de Janeiro, Brasil.

Bachus, K. N.; Rondina, M. T. e Hutchinson, D. T. The Effects of Drilling Force on Cortical Temperatures and Their Duration: an in Vitro Study. **Medical Engineering & Physics**. vol. 22, p. 685-691, 2000.

Bauer, J. R. O. **Propriedades Mecânicas do Titânio Comercialmente Puro e da Liga Ti-6Al-4V Fundidos em Diferentes Ambientes**. 2007. Tese de Doutorado. São Paulo: Faculdade de Odontologia da USP.

Benington, I. C.; Biagioni, P. A.; Crossey, P. J.; Hussey, D. L.; Sheridan, S. and Lamey, P. J. Temperature Changes in Bovine Mandibular Bone During Implant Site Preparation: an Assessment Using Infra-Red Thermography. **Journal of Dentistry**, V. 24, Nº. 4, p. 263-267. 1996.

Bezerra, F. J. e Lenharo, A. **Terapia Clínica Avançada em Implantodontia**. São Paulo: Artes Médicas, 2002. 329p.; 28 cm. ISBN 85-7404-059-2.

Brånemark, P. I.; Zarb, G. A. e Albrektsson, T. **Prótesis Tejido – Integradas. La Oseointegración en la Odontología Clínica**. Quintessence Books, 1987. 350p.

Box, G. E. P.; Hunter, W. G. and Hunter, J. S. **Statistics for Experimenters**. John Wiley & Sons. 1978. 653p. ISBN 0-471-09315-7.

Callister, W. D. J. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7ª Edição. Rio de Janeiro/RJ: LTC, 2008. 705p. ISBN 978-85-216-1595-8.

Cardoso, P. R. **Capacidade de Corte das Brocas do Sistema 3i – Estudo Histológico em Cães**. 2000. 57p. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade de Brasília. Brasília.

Cáritas. Prece de Cáritas. **Rayonnements de la Vie Espirituelle**. 1875. Bordeaux.

Chiaverini, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª Edição. São Paulo/SP: ABM, 2002. 599p. ISBN 85-86778-48-6.

Childs, T. H. C. Rake Face Action of Cutting Lubricants: Analysis of and Experiments on the Machining of Iron by Carbon Tetrachloride. **Proc. Inst. Mech. Engr.** 186, p 717-727. 1972.

Chelule, K. L.; Coole, T. J. e Cheshire, D. G. An investigation into the machinability of hydroxyapatite for bone restoration implants. **Journal of Materials Processing Technology**, 135v, p 242–246. 2003.

Comar, K. A. **Relação Entre o Desgaste das Brocas e o Aumento de Temperatura e Carga Durante a Perfuração Óssea em Implantodontia**. 2006. 142 f. Dissertação

apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Odontologia da Universidade de Santo Amaro. São Paulo/SP.

Costa, É. S. **Furação de aços Microligados com Aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de Corte – (MQF)**. 2004. 311 f. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia/MG.

Dagiloke, I. F.; Kaldos, A.; Douglas, S. and Mills, B. High-speed machining: an approach to process analysis. **Journal of Materials Processing Technology**. V. 54, p. 82–87. 1995.

da Silva, R. B. **Performance of Different Cutting Tool Materials in Finish Turning of Ti6Al4V with High Pressure Coolant Supply Technology**. 2006. 299 pgs. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia/MG.

de Castro, P. R. A. **Aspectos Tecnológicos da Usinagem a Seco e com Mínima Quantidade de Fluido de Corte na Furação com Broca Helicoidal**. 2001. 178p. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC,

Diniz, A; Marcondes, F. e Coppini, N. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 2ed. São Paulo/SP: Editora Artliber, 2000. 256p. ISBN 85-87296-01-9.

Donachie Jr., M. J., **Titanium A Technical Guide**. 2nd. Edition. Ohio, USA: ASM International, Metals Park, 1988. 469 p.

Eriksson, R. A. e Adell, R. Temperature During Drilling for The Placement Of Implants Using The Osseointegration Technique. **J. Oral Maxillofac. Surg.** 44:4-7. 1986.

Eriksson, R. A. e Albrektsson, T. Temperature Threshold Levels for Heat Induced Bone Tissue Injury: A Vital Microscopic Study in the Rabbit. **J. Prosthet. Dent.** 50:101-11. 1983.

Ezugwu, E. O.; da Silva, R. B.; Machado, A. R., Evaluation of the performance of Different Nano-Ceramic Tool Grades when Machining Nickel-Base, Incolonl 718, Alloy. **Journal of the**

Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering. vol. XXVI, Nº 1, January – March, pp 12-16. 2004.

Ezugwu, E. O.; da Silva, R. B.; Bonney, J.; Machado, A. R. The Effect of Argon-Enriched Environment in High-Speed Machining of Titanium Alloy, Tribology Transactions. **Society of Tribologists and Lubrication Engineers.** nº 48, ISSN 0569-8197, USA, 2005, pp 18-23.

DOI: 10.1080/05698190590890290, available on line at:
<<http://www.informaworld.com/smpp/content~content=a770939796~db=all~order=page>>

Faria, R.; Camargo, F. P.; de Vasconcelos, D. K.; Galhano, G. e Bottino, M. A. Eficiência de corte em fresas para implantes. **Implant News.** V. 4, Nº 1, p. 45-49, janeiro/fevereiro. 2007.

Ferraresi, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** 3ªed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 1981, 751p.

Ficha Técnica da Böhler – M340 ISOPLAST. Edição 3. 2005.

Frölke, J. P.; Peters, R.; Boshuizen K.; Patka, P.; Bakker, F. C. and Haarman, H. J. Th. M. The Assessment of Cortical heat During Intramedullary Reaming of Long Bones. **Injury, Int. J. Care Injured.** V. 32, p. 683-688. 2001.

Gomes, V. L.; Henry, N. M. D. E.; Magalhães, A. C. P.; Gomes, J. B.; Magalhães, L. A. P. Implantes inclinados e prótese provisória imediata em resina acrílica ativada quimicamente (RAAQ) para reabilitação de desdentados totais – Relato de caso. **Rev. INPEO de odontologia de Cuiabá/MT.** v. 2, n. 1, p. 1-76. 2008.

Hutchings, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering of Materials.** London: Arnold, 1992. 272p. ISBN 0-340-56184-X.

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Cerâmicas de Zircônia Aplicadas na Fabricação de Fresas Cirúrgicas. **Relatório Tribológico.** 6p. 2008.

ISO 3685:1977 Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools.

ISO 7153-1:1991 (E) Surgical Instruments – Metallic Materials (Part 1: Stainless steel).

ISO 7153-1:1991 /Amendments 1:1999 (E) Surgical Instruments – Metallic Materials (Part 1: Stainless steel).

Junqueira, L. C. & Carneiro, J. **Histologia Básica**. 8ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 1995. Pp. 100:108.

Kopperdahl, D. L. and Keaveny, T. M., Yield strain behavior of trabecular bone. **Journal of Biomechanics**. V. 31, 601-608p. 1998.

Kunkel, M. E.; Rollo, J. M. D. A.; Leivas, T. P.; Pereira, C. A. M; Neto, R. B.; Ozaki, W. M. e Lopes, A. D. S. **Correlação entre as propriedades do osso esponjoso analisado por ultra-sonometria e por ensaio mecânico de compressão**. Disponível em: <<http://www.eesc.usp.br/bioeng/Q517.pdf>>. Acesso em: 4 nov. 2008.

Lazzara, R., Prólogo. In: Aldecoa, E. A. **Um novo enfoque na cirurgia e prótese sobre implantes**. Vitória-Spain, Puesta al Dia Publicaciones, 1996. p 7-8.

Lenharo, A. **Implantes Dentais – Livro Prático de Orientação ao Paciente**. Disponível em: <<http://www.sinimplante.com.br/>>. Acesso em: 14 mar. 2007.

Lekholm, U. e Zarb, G. A. Selección y Preparación del Paciente. In: Brånemark, P. I.; Zarb, G. A. e Albrektsson, T. **Prótesis Tejido – Integradas. La Oseointegración en la Odontología Clínica**. Quintessence Books, 1987. 350p. Cap. 12.

Longbottom, J. M. e Lanham, J. D. A review of research related to Salomon's hypothesis on cutting speeds and temperatures", **I. J. of Machine Tools & Manufacture**. vol. 46, p 1740-1747. 2006.

Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; da Silva, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2009. 371 pgs. ISBN: 978-85-212-0452-7.

Machado, A. R. and Wallbank, J. Machining of Titanium and Its Alloys-A Review. **J. Eng. Manufacture**. Proc. of the Inst. Mech. Eng. Vol 204 Part B, pp. 53-60. 1990.

Machado, A. R. and Wallbank, J. The Effect of Extremely Low Lubricant Volumes in Machining. **Wear**. vol. 210, N 1-2, pp 76 – 82. 1997.

Manual Kistler. Instruction Manual – Rotating cutting Force Dynamometer Type 9123C...Winterthur/Schweiz. 2006.

Mikhael, M. M.; Huddleston, P. M.; Zobitz, M. E.; Chen, Q.; Zhao, K. D. and An, K. N. Mechanical strength of bone allografts subjected to chemical sterilization and other terminal processing methods. **Journal of Biomechanics**. Volume 41, Issue 13, Pages 2816-2820. 2008.

Mitsuishi, M.; Warisawa, S. e Sugita N. Determination of the Machining Characteristics of a Biomaterial Using a Machine Tool Designed for Total Knee Arthroplasty. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. Volume 53, Issue 1, Pages 107-112. 2004.

Mocellin, F. **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaio de Furação**. 2002. 94 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Modenesi, P. J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. Vol. 1. São Paulo: SENAI/SP, 2001. 100p. ISBN 85-88746-02-6.

Mora, F. J., **Fabricação de Implantes Ortopédicos a Partir da Usinagem de Osso Humano**. 2000. 249 p. Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC.

Motta, S. H. G. **Avaliação Clínica de Sobrevida de Três Sistemas de Implantes em Diferentes Densidades Ósseas**. 2002. 153 p. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Implantodontia da Unicastelo. São Paulo/SP.

Neto, B. B.; Scarminio, I. S. e Bruns, R. E. **Planejamento e Otimização de Experimentos**. Campinas: Editora da UNICAMP. 1995. 299p. ISBN 85-268-0336-0.

O'Sullivan, D. and Cotterell, M. Temperature measurement in single point turning. **Journal of Materials Processing Technology**. 118, p. 301–308, 2001.

O'Sullivan, D. and Cotterell, M. Workpiece temperature measurement in machining. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part H: **Journal of Engineering in Medicine**. 216 (Part B), p. 135–139, 2002.

Park, H. S.; Lee, Y. J.; Jeong, S. H. e Kwon, T. G. Density of Alveolar and Basal Bones of the Maxilla and the Mandible. **Am. J. Orthod. Dentofacial Orthopedics**. V. 133, Nº 1, Jan. 2008.

PDAMED. Disponível em:
<http://www.pdamed.com.br/diciomed/pdamed_0001_16514.php>. Acessado em 16 jun. 2009.

Penha, V. T. B. B. **Efeitos do Congelamento e Descongelamento Sucessivo nas Propriedades Mecânicas em Ossos Corticais**. 2004. 117p. Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação Interunidades em Bioengenharia, Escola de Engenharia de São Carlos, Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Instituto de Química de São Carlos, a Universidade de São Paulo. São Paulo/SP.

P-I Brånemark Institute, 2005. Brasil, Bauru/SP. Disponível em:
<<http://www.branemark.org.br>>. Acesso em: 8 ago. 2008.

Pierri, J. J.; Maestrelli, S. C.; Pallone, E. M. J. A.; Tomasi, R. Dispersão de nanopartículas de ZrO₂ visando produção de nanocompósitos de ZrO₂ em matriz de Al₂O₃. **Cerâmica**. 51, 08-12, 2005.

Ross, M. H.; Reith E. J. e Romrell L. J. **Histologia: Texto e Atlas**. 2ª ed. São Paulo: Panamericana, 1993. ISBN 85-303-0024-6.

Sales, W. F. **Influência das Características Refrigerantes e Lubrificantes de Fluidos de Corte**. 1999-a. 166f. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia/MG..

Shaw, M. C.; Ber, A. and Mamin, P. A. Friction Characteristics of Sliding Surfaces Undergoing Subsurface Plastic Flow. Trans ASMS. **J. Basic Eng.** vol. 82, June, pp. 342-346, 1960.

Shimano, M. M. **Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Ossos Cortical e Trabecular de Ratos, Após Período de Suspensão pela cauda e exercitação.** 2006. 154 p. Tese apresentada à Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto/USP. Ribeirão Preto/SP

Shin, H. C. e Yoon, Y. S. Bone Temperature Estimation During Orthopaedic Round Bur Milling Operations. **Journal of Biomechanics**. V. 39, p. 33-39, 2006.

Trent, E. M. Cutting Steel and Iron with Cemented Carbide Tools – Part II: Conditions of Seizure at the Tool/Work Interface. **Journal of the Iron and Steel Institute**. pp. 923-932, Nov. 1963.

Trent, E. M. Metal Cutting and the Tribology of Seizure: II-Movement of Work Material Over the Tool in Metal Cutting. **Wear**. vol. 128, pp. 47-64. 1988b.

Trent, E. M. "Metal Cutting and the Tribology of Seizure: III-Temperature in Metal Cutting", **Wear**, vol. 128, pp. 65-81. 1988c

Trent, E. M. and Wright, P. K. **Metal Cutting**. 4th edition. Butterworth-Heinemann. 2000. 446p. ISBN 0-7506-7069-X.

Trunec, M.; Chlup, Z. Higher fracture toughness of tetragonal zirconia ceramics through nanocrystalline structure. **Scripta Materialia**. 61, 56-59. 2009.

van Vlack, L. H. **Princípios de Ciência dos Materiais**, traduzido pelo Eng. Luiz Paulo Camargo Ferrão. São Paulo/SP: Editora Edgard Blücher LTDA, 1970. 427p.

Viana, R. **Desempenho de Brocas HSS Revestidas na Furação de Ligas Al-Si.** 2004. 85f. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia/MG.

Vilela, A. L. M. Anatomia & Fisiologia Humana. Disponível em: <<http://www.afh.bio.br>>. Acessado em: 15 set. 2007.

Watanabe, F.; Tawada, T.; Komatsu, S. e Hata, Y. Heat Distribution in Bone During Preparation of Implants Sites: Heat Analysis by Real-Time Thermography. **J. Oral Maxillofac. Implants**. vol. 7, p. 212-219. 1992.

Wikipédia. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Tecido_ósseo>. Acessado em: 15 out. 2007.

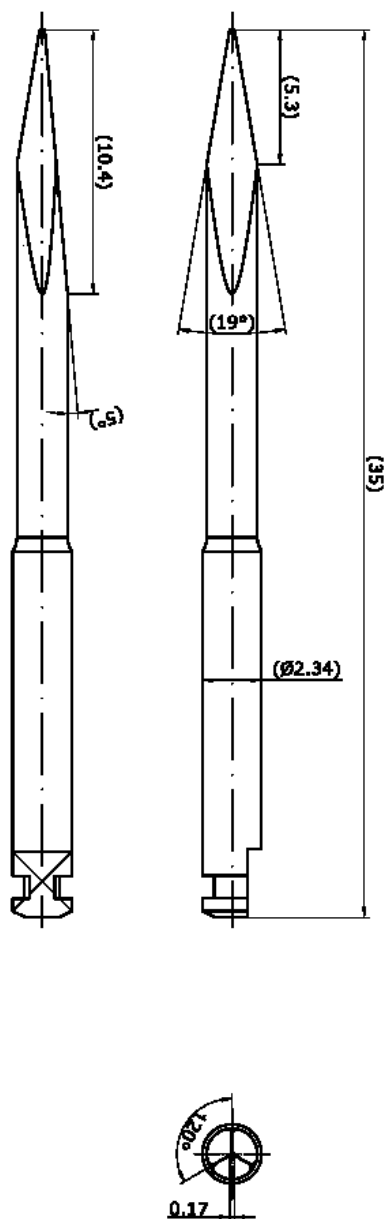
Wikipédia. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Tomografia_computadorizada>. Acessado em 16 jun. 2009.

Zorev, N. M. Interrelationship Between Shear Processes Occurring Along Tool Face and on Shear Plane in Metal Cutting. **Proc. Int. Prod. Eng. Res. Conf.** Pittsburgh, pp. 42-49. Sept. 1963.

CAPÍTULO 7

ANEXO I

Atenção Controle: Executar medição geral na peça de liberação de máquina. Após a liberação executar controle normal apenas nas dimensões com *, aspecto visual e funcional.



Rev. Nº:	Nota de Revisão:	Data:	Tubulações Gerais - Conforme NBR ISO 2768 GRau F/MK											
00	Emissão do desenho	01/11/04	46.10	46.3	46.5	46.8	46.9	46.10	46.125	46.150	46.175	46.200	46.225	
01	Mudança de Desenho Conforme APP 02/1/05	13/05/05	46.10	46.3	46.5	46.8	46.9	46.10	46.125	46.150	46.175	46.200	46.225	
Material 1 Norma			Escalas:											
App Inox			5:1											
Desenhista:	Revisado:	Aprovado:	FRL 2020											
Michal	Ricardo	Dr. Nelsa	Fresse longa Ø2.0 x 18mm											
Data:			Arquivo Cad:											
01/11/04			Desenho (Arquivo) FRL2020\FRL2020											
														

Figura 7.1: Lança Ø 2 mm (FRL 2020).

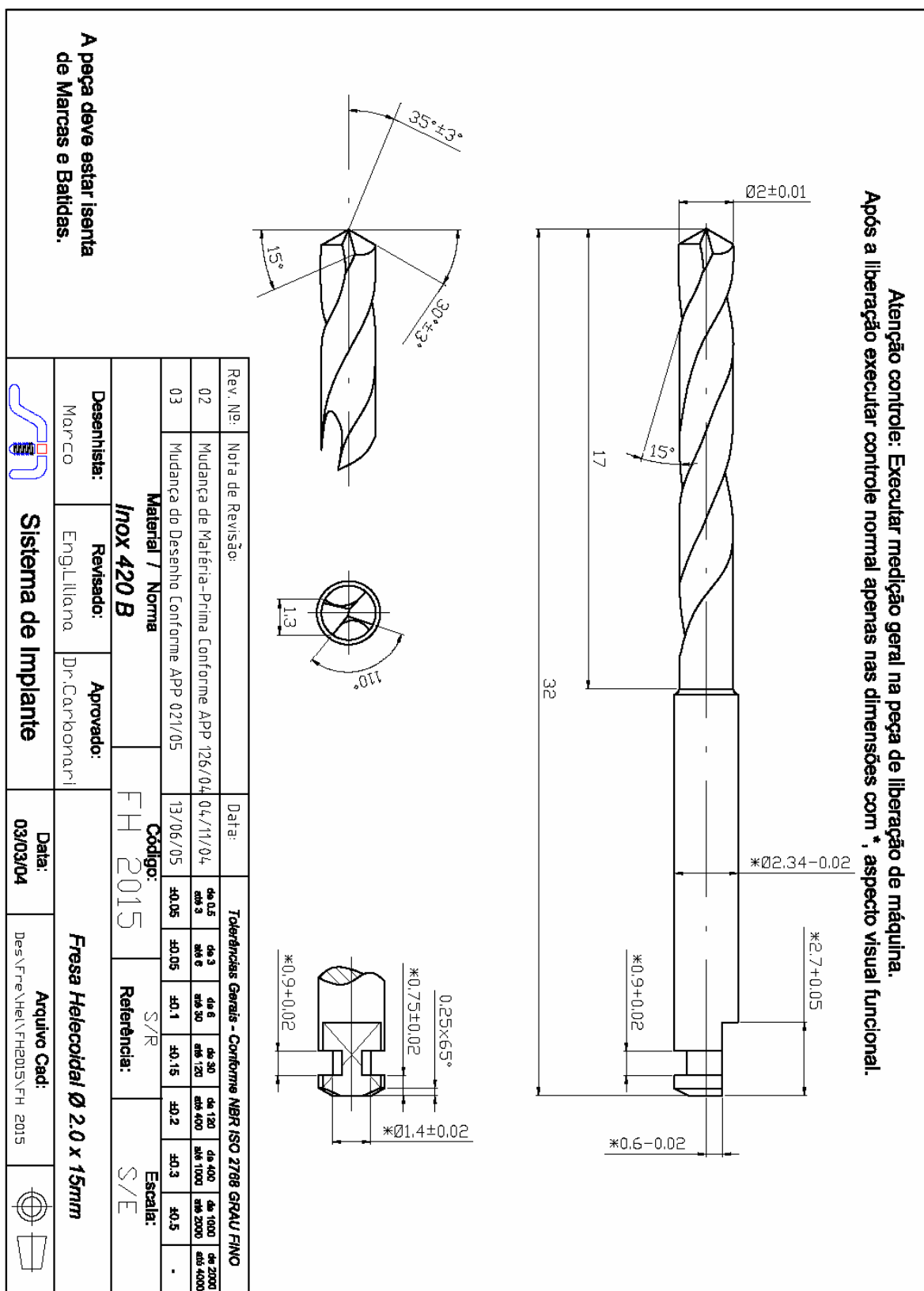
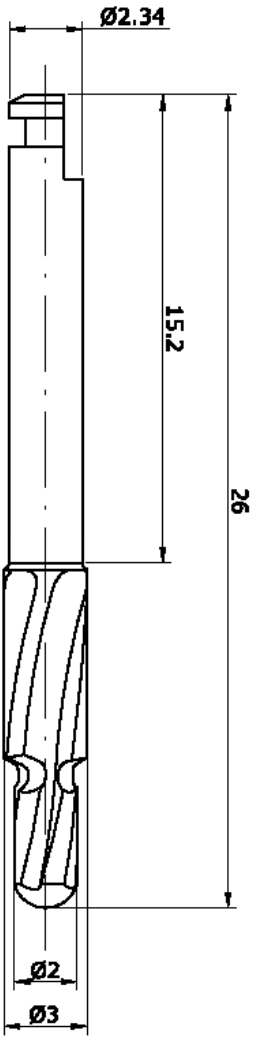


Figura 7.2: Broca Helicoidal Ø 2 mm ou BH2 (FH 2015).

Atenção Controle: Executar medição geral na peça de liberação de máquina.
Após a liberação executar controle normal apenas nas dimensões com *, aspecto visual e funcional.



Rev. Nº:	Nota de Revisão:		Data:		Tolerâncias Gerais - Conforme NBR ISO 2768 (CSAU FNO)									
03	Mudança do Desenho conforme APP 021/05		10/05/05		da 0,0 até 3	da 3 até 6	de 6 até 30	de 30 até 120	de 120 até 400	de 400 até 1000	de 1000 até 2000	de 2000 até 5000		
04	Mudança de Matéria-Prima conforme SP 016-05		19/09/05		±0,05	±0,06	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5	-		
Material / Norma Inox M340			Código: FP 2030		S/R		Escala: 5:1							
Desenhista: Michael		Revisado: Ricardo		Aprovado: Nelis		Fresa Piloto Ø2.0 x 3.0mm								
		Sistema de Implante		Data: 28/03/03		Arquivo Cad: Des\Fre\Pil\FP2030\FP 2030								

A peça deve estar isenta de Marcas e Batidas.

A peça deve estar isenta de
Marcas e Batidas.

Figura 7.3: Piloto Ø 2 e 3 mm (FP 2030).

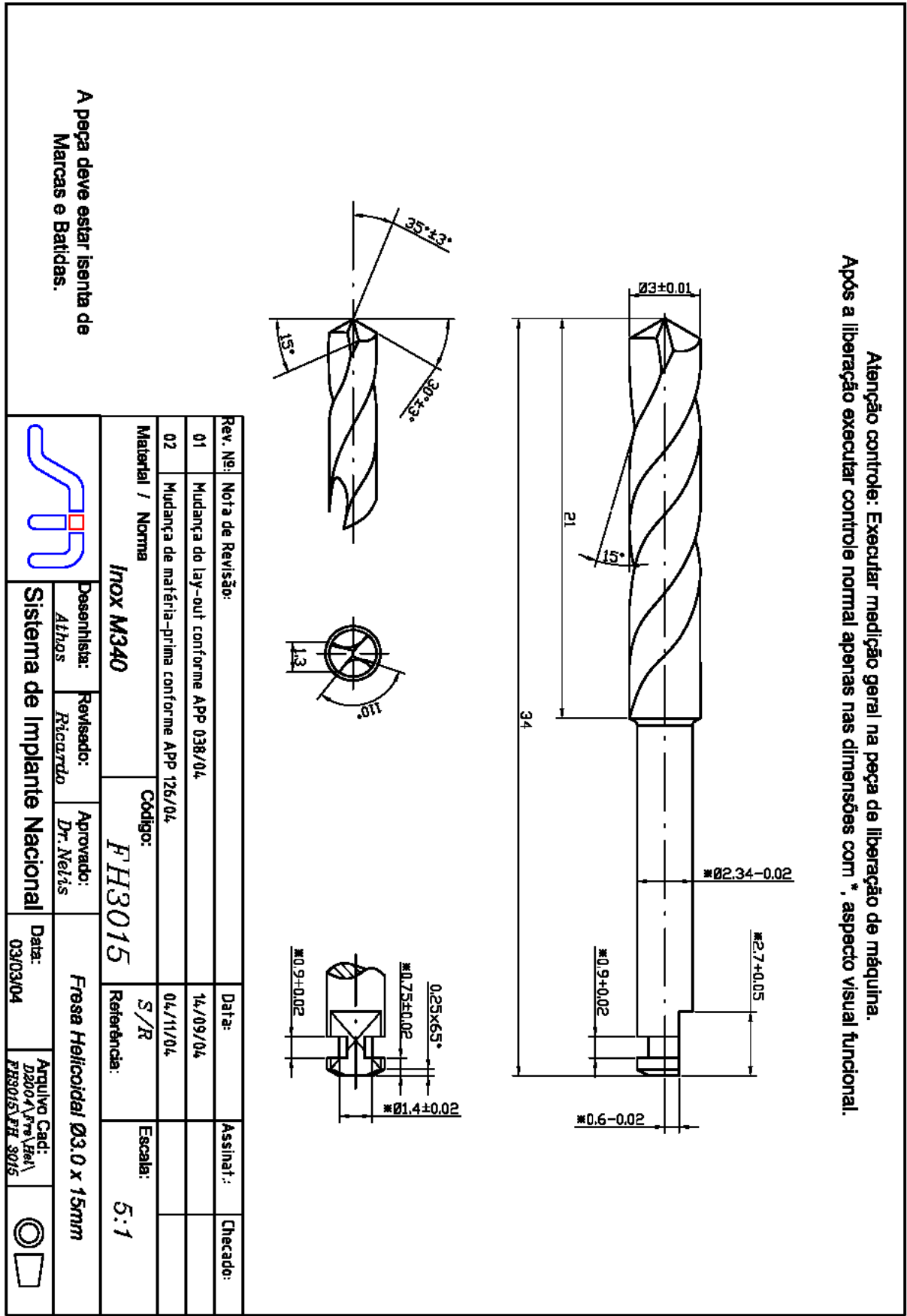


Figura 7.4: Broca Helicoidal $\varnothing 3$ mm ou BH3 (FH 3015).