

PROJETO E FABRICAÇÃO DE UM CABEÇOTE ANGULAR PARA USINAGEM DE RASGOS DE CHAVETAS INTERNOS EM FRESADORAS

Angelo Tasca Junior¹

Luiz Carlos de Cesaro Cavaler²

Resumo: Com o objetivo de reduzir custos na indústria metalúrgica, mais precisamente na usinagem de rasgos de chavetas e encanelados internos, que atualmente são feitos em plainas limadoras, que são geralmente máquinas gargalos do processo de usinagem. O presente estudo baseia-se no desenvolvimento de um cabeçote angular que possibilite a usinagem destes rasgos em furos maiores ou igual a 80 mm, em uma fresadora U30. Com a utilização deste cabeçote pequenas empresas não necessitariam investir na compra de uma plaina limadora para usinagem de rasgos internos. Custos como mão-de-obra, energia elétrica, área útil disponível, instalação e principalmente tempo de usinagem seriam reduzidos significativamente, e assim aumentando a margem de lucro destas pequenas empresas. Assim, inicialmente foram desenvolvidas todas as pesquisas e cálculos necessários para o desenvolvimento do projeto, com todos os resultados levantados foi feito o dimensionamento de todos os componentes do cabeçote angular em modelamento 3D, então ele foi fabricado e testado em uma fresadora U30 para validação de todos os cálculos. Após todos os testes desenvolvidos o cabeçote angular proporcionou uma economia no tempo de usinagem de aproximadamente 77% em relação ao processo de aplainamento, que aliado ao seu baixo custo de fabricação se mostrou totalmente viável economicamente.

Palavras-chave: Cabeçote angular. Fresadora. Rasgos de Chaveta. Dimensionamento.

1. INTRODUÇÃO

Entre os processos de usinagem existem vários métodos para se fabricar rasgos de chavetas internos, e um dos mais utilizados é a usinagem em plainas limadoras, sendo em geral um processo em que a ferramenta tem um movimento alternativo e a peça fica parada, fixa numa morsa ou na própria mesa, através de grampos (De Garmo *et al*, 2008).

Para a determinação da velocidade de corte é feita uma média entre a velocidade de corte, que é quando a ferramenta avança, e a velocidade de retorno,

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: metaltasca@hotmail.com

² Prof. Dr. Eng. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler. E-mail: luiz.cavaler@satc.edu.br

que é quando a ferramenta volta sem cortar. Outro fato importante é que o curso da ferramenta deve ser regulado, levando em consideração a distância para saída da ferramenta, tanto no avanço, quanto no retorno. Por esses motivos o processo de aplainamento se torna um processo de usinagem muito lento, principalmente para rasgos mais robustos. Comparando a velocidade de corte para se usinar um rasgo interno em uma plaina limadora e para usinar o mesmo rasgo, mas externo (eixos), numa fresadora; nota-se uma velocidade de corte bem maior, sabendo que estes rasgos em eixos são feitos com fresas de topo, com rotações altas, possibilitando um maior avanço de corte, e uma redução significativa dos esforços sobre a ferramenta de corte, se comparado com o da plaina limadora (De Garmo *et al*, 2008).

Existem outros métodos de usinagem destes rasgos, entre eles o brochamento e a eletro erosão. Nos dois casos necessita-se de um investimento muito alto para sua implantação, entre eles: aquisição das máquinas, aquisição de ferramentas e de um profissional; se tornando inviável para pequenas empresas que trabalham com pequenas demandas de fabricação destes rasgos.

Então visando resolver estes problemas, se decidiu projetar um cabeçote angular, que adaptado numa fresadora ROMI U30 consiga usinar rasgos internos com uma velocidade de corte muito próxima que na usinagem de rasgos de chaveta em eixos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em busca de ampliar conhecimentos quanto ao projeto de um cabeçote angular, fundamenta-se uma breve revisão bibliográfica do tema apresentado, visando um entendimento mais amplo sobre os seguintes tópicos: parâmetros do processo de usinagem, cálculo da velocidade de corte e tempo de usinagem em plaina limadora, cálculo da velocidade de corte e tempo de usinagem e potência de corte em fresadoras, fresas de topo, transmissão com engrenagens cônicas, eixos-árvore.

2.1 PARÂMETROS DO PROCESSO DE USINAGEM

Em um processo de usinagem a velocidade de corte é um dos fatores principais que define o tempo de produção e também o seu custo final. Assim, em

uma célula ou uma linha de produção a máquina gargalo é aquela que tem o maior tempo padrão da célula ou linha, assim sendo, esta deve trabalhar próxima a condição máxima de produção, evitando a aquisição de uma outra máquina idêntica para se balancear a célula. Outros fatores tem que ser levados em conta como: aumento do consumo de ferramenta, possível quebra e manutenção da máquina, desgaste da máquina, período que esta máquina estará submetida a esta condição (Diniz, 2006).

De acordo com estas informações nota-se que há uma grande importância no dimensionamento correto do cabeçote angular, para que se possa trabalhar próximo as condições de mínimo custo, para otimizar ao máximo o processo de fabricação destes rasgos, que atualmente são feitos em sua maioria em plaina limadora que são geralmente as máquinas gargalos do processo (Diniz, 2006).

2.2 CÁLCULO DA VELOCIDADE DE CORTE E TEMPO DE USINAGEM EM PLAINA LIMADORA

Segundo De Garmo *et al* (2008) a plaina limadora é uma máquina de movimento alternado horizontal dotada de uma ferramenta simples que efetua o corte. Este movimento alternativo é paralelo a direção em que se move a ferramenta, e a peça é presa a uma mesa que está sobre um carro que desliza horizontalmente.

O movimento avanço é o de corte e o movimento de retorno constitui um tempo morto, sendo interessante que este movimento seja feito mais rapidamente que o de corte.

A velocidade média de corte v_m , é calculada através da Eq. (1) (Jasinevicius, 2014):

$$v_m = \frac{2 \cdot v_c \cdot v_r}{v_c + v_r} \text{ [m/min]} \quad (1)$$

Onde:

v_c = Velocidade de avanço no corte (m/min)

v_r = Velocidade de retorno (m/min)

O tempo de corte para aplainamento T_h , é dado pela Eq. (2) (Jasinevicius,

2014):

$$T_h = \frac{B \cdot i}{f_g \cdot nL} = \frac{2 \cdot B \cdot L \cdot i}{v_m \cdot f \cdot 1000} \text{ [min]} \quad (2)$$

Onde:

B = Largura a ser usinada (mm)

L = Comprimento do golpe (mm)

f_g = Avanço para cada golpe de corte e retorno (mm/golpe)

i = Número de passes (adm)

nL = Número de golpes de corte e retorno (golpes/min)

2.3 CÁLCULO DA VELOCIDADE DE CORTE, TEMPO DE USINAGEM E POTÊNCIA DE CORTE EM FRESADORAS

Fresadoras são máquinas onde a característica principal consiste que sua ferramenta cortante é uma fresa, e esta tem um movimento de rotação, geralmente ligado diretamente ao eixo árvore ou através de um suporte porta fresa. O movimento de avanço é feito, geralmente, pela mesa da máquina, onde a peça está presa, e este movimento pode ser horizontal, transversal ou vertical (De Garmo *et al*, 2008).

A velocidade de corte da fresadora v_{cf} é calculada através da Eq. (3) (Jasinevicius, 2014):

$$v_{cf} = \frac{\pi \cdot D_f \cdot n}{1.000} \text{ [m/min]} \quad (3)$$

Onde:

D_f = Diâmetro da fresa (mm)

n = Frequencia de rotação (rpm)

Segundo Jasinevicius (2014), a velocidade de avanço da mesa v_f , o avanço da mesa f , e o tempo de corte para fresamento T_c , podem ser expressos pelas Eq. (4),(5) e (6) respectivamente.

$$v_f = f \cdot n = f_z \cdot Z \cdot n \text{ [mm/min]} \quad (4)$$

$$f = f_z \cdot Z \quad [\text{mm/rev}] \quad (5)$$

$$T_c = \frac{l \cdot i_f}{v_f} = \frac{l \cdot i_f}{f \cdot n} \quad [\text{min}] \quad (6)$$

Onde:

n = Frequência de rotação (rpm)

f_z = Avanço por dente (mm/dente)

Z = Número de dentes da fresa (adm)

l = Percurso total da ferramenta (mm)

i_f = Número de passes da fresa (adm)

Segundo Jasinevicius (2014), a potência de corte P_c , podem ser expressa pela Eq. (7) :

$$P_c = \frac{v_f \cdot a_e \cdot a_p \cdot k_c}{60 \cdot 10^6 \cdot \eta} \quad [\text{kW}] \quad (7)$$

Onde:

a_p = Profundidade de corte axial (mm)

a_e = Profundidade de corte radial (mm)

K_c = Força específica de corte (N/mm²)

η = coeficiente de eficiência da máquina (adm)

Corforme Stemmer (2001), os valores tabelados de K_c para alguns tipos de materiais, segundo a norma alemã AWF 158, estão mostrados na Na Fig. 1.

Figura 1: Valores de K_c conforme a norma alemã AWF 158

MATERIAIS	σ [N/mm ²] (ou dureza)	k_c [N/mm ²]			
		Avanço em [mm/rot]			
		0,1	0,2	0,4	0,8
ST3411, St3711, St4211 (ABNT 1015 a 1025)	até 500	3600	2600	1900	1360
ST5011 (ABNT 1030 a 1035)	500 a 600	4000	2900	2100	1520
STR6011 (ABNT 1040 a 1045)	600 a 700	4200	3000	2200	1560
ST7011 (ABNT 1060)	700 a 850	4400	3150	2300	1640
ST 85 (ABNT 1095)	850 a 1000	4600	3300	2400	1720
Aço fundido	300 a 350	3200	2300	1700	1240
	500 a 700	3600	2600	1900	1360
Aço Mn, aços Cr-Ni, aços Cr-Mo e outros aços ligados	> 700	3900	2850	2050	1500
	700 a 850	4700	3400	2450	1760
	850 a 1000	5000	3600	2600	1850

Fonte: Adaptado de Stemmer (2001)

O torque exigido para o fresamento M_c , é calculada através da Eq. (8) (Jasinevicius, 2014):

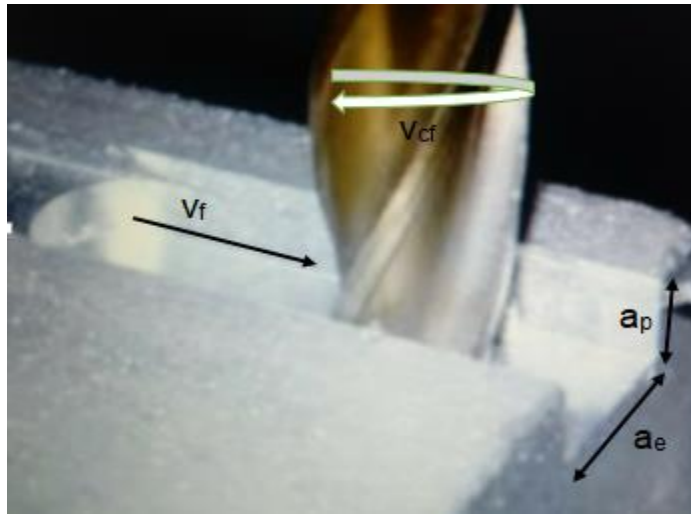
$$M_c = \frac{P_c \cdot 30 \cdot 10^3}{\pi \cdot n} \quad [\text{N.m}] \quad (8)$$

2.4 FRESAS DE TOPO

De acordo com a fresa de topo e o material a ser usinado se define algumas variáveis como rotação, avanço e velocidade de corte. A velocidade de corte é uma variável muito importante, pois influencia muito no acabamento final da peça, e deve ser selecionada com uma relação entre a velocidade de corte da fresa e a espessura média do cavaco para os materiais indicados (Gorgon, 1981).

Na Fig. 2, está mostrada uma fresa de topo usinando um rasgo e seus parâmetros de corte.

Figura 2: Fresa de topo e seus parâmetros de corte



Fonte: Adaptado de Stoeterau (2007)

Onde:

v_{cf} = Velocidade de corte da fresadora (m/min)

a_p = Profundidade de corte axial (mm)

a_e = Profundidade de corte radial (mm)

v_f = Velocidade de avanço da mesa (mm/min)

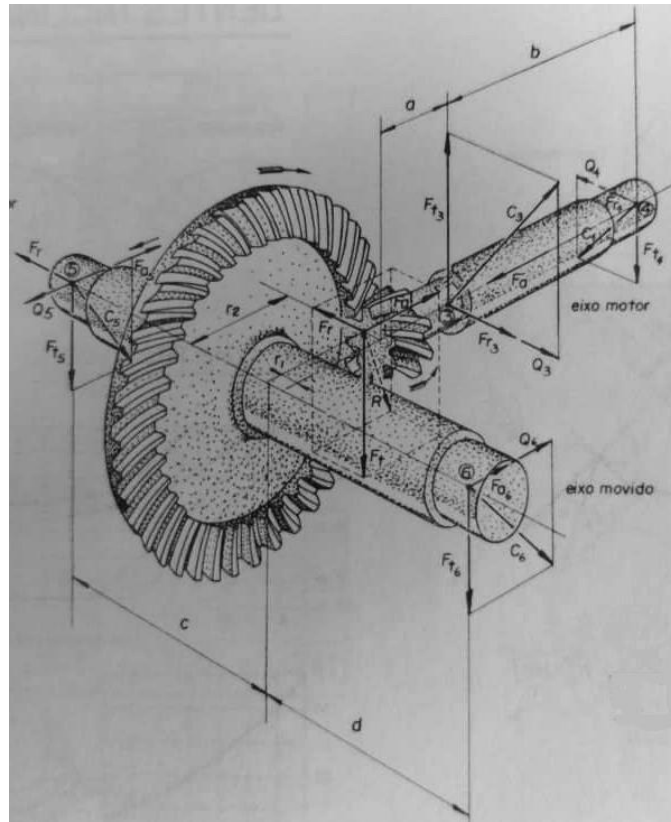
2.5 TRANSMISSÃO COM ENGRENAGENS CÔNICAS

Para fazer a transmissão de torque será necessário a utilização de engrenagens cônicas com um ângulo de 90° . Elas podem ter dentes retos ou em helicoidal, sendo a segunda mais indicada, pois os dentes são fixados em um ângulo, que distribui a pressão de modo que as engrenagens trabalhem uniformemente e com mais suavidade, pois existe uma área maior de contato reduzindo o desgaste do conjunto (De Garmo *et al*, 2008).

Segundo Shigley *et al* (2003) engrenagens cônicas espirais são superiores às engrenagens chanfradas retas em eficiência, força, vibração e ruído. Por outro lado, eles são mais difíceis de produzir. Além disso, como os dentes são curvos, eles causam forças de empuxo na direção axial.

Os principais esforços resultantes do engrenamento cônico com dentes palóides estão mostrados na Fig.3.

Figura 3: Esforços com dentes palóides



Fonte: Adaptado de PROTEC, Projetista de Máquinas (1990)

As equações das forças resultantes no engrenamento cônico com dentes palóides são demonstradas na Fig.4.

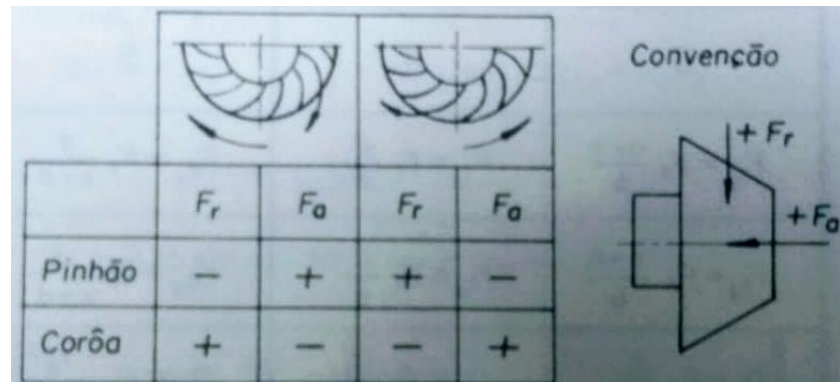
Figura 4: Equações engrenamento cônico com dentes palóides

PINHÃO		CORÔA	
3	4	5	6
$F_{t3} = F_t \frac{a+b}{b}$	$F_{t4} = F_t \frac{a}{b}$	$F_{t5} = F_t \frac{d}{c+d}$	$F_{t6} = F_t \frac{c}{c+d}$
$F_{r3} = F_r \frac{a+b}{b}$	$F_{r4} = F_r \frac{a}{b}$	$F_{a5} = F_a \frac{d}{c+d}$	$F_{a6} = F_a \frac{c}{c+d}$
$Q_3 = F_a \frac{r_1}{b}$	$Q_4 = F_a \frac{r_1}{b}$	$Q_5 = F_r \frac{r_2}{c+d}$	$Q_6 = F_r \frac{r_2}{c+d}$
$C_3 = \sqrt{F_{t3}^2 + (F_{r3} + Q_3)^2}$	$C_4 = \sqrt{F_{t4}^2 + (F_{r4} + Q_4)^2}$	$C_5 = \sqrt{F_{t5}^2 + (F_{a5} - Q_5)^2}$	$C_6 = \sqrt{F_{t6}^2 + (F_{a6} + Q_6)^2}$
F_a		F_r	

Fonte: Adaptado de PROTEC, Projetista de Máquinas (1990)

O método de convenção dos sinais e os sentidos das forças resultantes de acordo com o sentido de giro da coroa, no engrenamento cônico com dentes palóides são demonstradas na Fig.5.

Figura 5 : Convenção dos sinais e sentidos das forças



	F_r	F_o	F_r	F_o
Pinhão	-	+	+	-
Corôa	+	-	-	+

Convenção

Diagram showing force vectors: $+F_r$ (radial force, pointing towards the center) and $+F_o$ (tangential force, pointing in the direction of rotation).

Fonte: Adaptado de PROTEC, Projetista de Máquinas (1990)

2.5.1 Materiais Utilizados na Fabricação de Engrenagens e Eixos

Conforme Melconian (2008) na fabricação de engrenagens podem ser utilizados diversos materiais dependendo da resistência e das condições de serviço, como desgaste, ruído, etc. As engrenagens podem ser fabricadas a partir de materiais metálicos ou não metálicos.

As engrenagens metálicas são comercialmente disponíveis em ferro fundido, aço e bronze. O ferro fundido e bronze são utilizadas em condições de trabalho mais suaves. O aço é utilizado em engrenagens de alta resistência, podendo ser aço carbono ou ligado, e ainda tratado térmicamente para corresponder adequadamente à dureza.

Segundo Rebechi (2011), o aço é um dos materiais mais utilizados na fabricação de eixos, pois é produzido em grande escala e possui uma grande variedade de tipos e formas, por estes motivos ele é utilizado para diversas aplicações, então é necessário que os fabricantes atendam as exigências de aplicações específicas que vão surgindo no mercado. Portanto, é indispensável que seja feito um controle rigoroso da composição química, a fim de garantir as propriedades específicas e a qualidade final do material.

Na Tab. 1 estão mostradas as principais propriedades do aço SAE 1045.

Tabela 1: Propriedades do aço SAE 1045.

Teor de carbono [%]	Limite de elasticidade [GPa]	Limite de escoamento [MPa]	Limite de resistência à tração [MPa]	Limite de resistência à fadiga [MPa]
0,45	250	310	560	421

Fonte: Adaptado de Manual de Aços Gerdau (2003)

2.6 EIXOS-ÁRVORE

Neste projeto um dos principais elementos do cabeçote angular serão os eixos de transmissão, que terão que ser muito bem dimensionados para suportar as forças que neles irão atuar.

O estudo e dimensionamento dos eixos-árvore é muito complexo. Isto acontece porque, normalmente há uma grande quantidade de solicitações que este elemento pode sofrer. Por exemplo, torções, flexões, esforços cortantes e esforços normais. Não há de forma contundente uma única rotina que pode ser empregada, sendo assim, necessário um bom conhecimento na área da mecânica e resistência dos materiais (Callister *et al*, 2002).

Conforme Norton (2004), o momento ideal M_i , o coeficiente de Bach a , o fator de forma b e o diâmetro do eixo d_0 , podem ser expressos pelas Eq. (9), (10), (11) e (12) respectivamente.

$$M_i = \sqrt{M_r^2 + \left(\frac{a}{2} \cdot M_t\right)^2} \text{ [N.m]} \quad (9)$$

$$a = \frac{\sigma_{fadm}}{t_{fadm}} \text{ [adimensional]} \quad (10)$$

$$b = \frac{1}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4} \text{ [adimensional]} \quad (b=1 \text{ eixos maciços; } b=1,065 \text{ vazados}) \quad (11)$$

$$d_0 \geq 2,17 \times \sqrt[3]{\frac{b \cdot M_i}{\sigma_{fadm}}} \text{ [m]} \quad (12)$$

Onde:

D = Diâmetro externo da árvore vazada (m)

d = Diâmetro interno da árvore vazada ou externo da árvore maciça (m)

σ_{fad_m} = Tensão admissível de flexão (Pa)

τ_{tad_m} = Tensão admissível na torção (Pa)

M_t = Torque na árvore (N.m)

M_r = Momento fletor resultante (N.m)

Conforme Nelson *et al* (2013), os cálculos para determinar as forças em qualquer ponto de um eixo podem ser expressos pelas Eq. (13), (14), e (15).

$$M = F \cdot S \quad (13)$$

$$\sum M_{x,y} = 0 \quad (14)$$

$$\sum F_{x,y} = 0 \quad (15)$$

Onde:

M = Momento no ponto analisado (N.m)

S = Distância entre o ponto analisado e força aplicada (m)

F = Força aplicada (m)

$M_{x,y}$ = Momentos no plano X ou Y (N.m)

$F_{x,y}$ = Forças no plano X ou Y (N.m)

2.7 SELEÇÃO DOS ROLAMENTOS

Conforme Popov (1998) para a correta seleção do rolamento para a sua aplicação, é importante considerar diversas especificações como: tipos de carga, rotação, diâmetro interno, diâmetro externo, largura, tolerâncias, tipo e material da gaiola, lubrificante, o método de lubrificação e o método de vedação; que irão

assegurar o desempenho esperado.

Conforme Catálogo Geral NSK (2002), a carga estática equivalente P_o , a capacidade de carga básica estática C_{or} , e a capacidade de carga básica dinâmica C_r , podem ser calculados pelas Eq. (16), (17), e (18) respectivamente.

$$P_o = X_o \cdot F_{rad} + Y_o \cdot F_{ax} \quad (16)$$

$$C_{or} = f_o \cdot P_o \quad (17)$$

$$C_r = P_o \cdot \frac{f_h}{f_n} \quad (18)$$

Onde:

F_{rad} = Carga radial no rolamento(N)

F_{ax} = Carga axial no rolamento (N)

X_o = Coeficiente de carga radial (adm)

Y_o = Coeficiente de carga axial (adm)

f_o = Coeficiente de carga estática permissível (adm)

f_h = Coeficiente de vida útil do rolamento (adm)

f_n = Coeficiente de velocidade (adm)

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Apresentam-se aqui as atividades que foram necessárias para a realização deste projeto e da fabricação do cabeçote angular. Primeiramente foi realizada uma pesquisa bibliográfica fundamentada, com o objetivo de embasar a pesquisa sobre o assunto. Após a realização de estudos bibliográficos, iniciou-se o estudo dos principais aspectos que devem ser analisados para o projeto como:

- ✓ Tipo de fixação da fresa de topo;
- ✓ Tipo de transmissão ortogonal;
- ✓ Transmissão da rotação da fresadora para o cabeçote angular;

- ✓ Cálculos mecânicos para a fresa de topo utilizada;
- ✓ Viabilidade econômica do projeto do cabeçote angular.

3.1 FIXAÇÃO DA FRESA DE TOPO

A fixação de fresas de topo na grande maioria é feita através de mandril porta pinças. Neste mandril é acoplada uma pinça de formato cônico, que através de uma porca, que quando apertada, diminuiu o seu diâmetro, gerando a pressão necessária para que o mandril transmita o movimento e torque a fresa de topo.

Para a escolha do tipo de pinça, foi necessária analisar as dimensões para furo e rasgo de chaveta para diâmetro interno de 80 mm, conforme NORMA DIN 6885/1 que podem ser observados na Tab. 2.

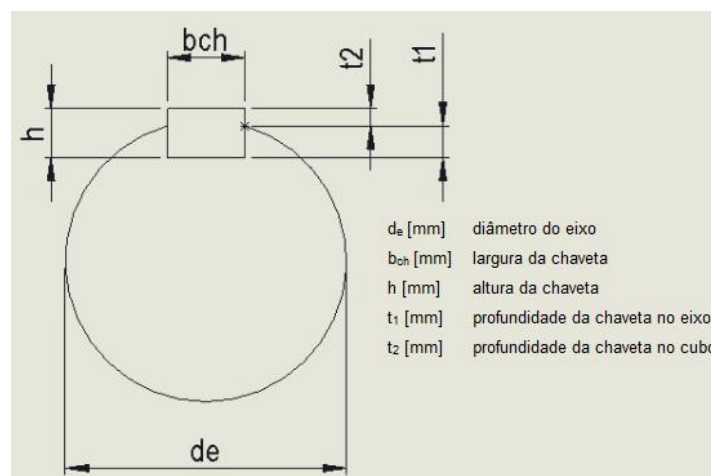
Tabela 2: Furo e rasgo de chaveta NORMA DIN 6885/1.

d_e [mm]	b_{ch} [mm]	h [mm]	t_1 [mm]	t_2 [mm]
75 a 85	22	14	9	5,4

Fonte: Adaptado de NORMA DIN 6885/1 (1956)

Na Fig.6, está mostrada as principais dimensões do rasgo de chaveta de acordo com a NORMA DIN 6885/1.

Figura 6: Dimensões de chavetas NORMA DIN 6885/1.



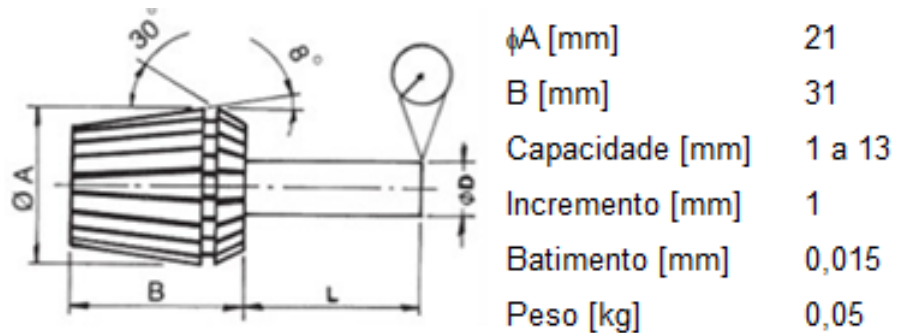
Fonte: do Autor (2020)

Além destas informações foi considerado as dimensões de cada tipo de

pinça, devido a limitação do tamanho do cabeçote. Levando em consideração as dimensões da chaveta a ser usinada e o reduzido espaço que o cabeçote vai trabalhar, chegou-se a conclusão de utilizar a pinça ER 20 na fixação da fresa de topo, que conforme a Fig. 7, tem a dimensão de diâmetro maior ϕA , de 21 mm e tem capacidade de fresas de topo com diâmetro D_f de até 13 mm.

Na Fig.7, está mostrada as principais dimensões de uma pinça ER20 DIN 6499 para aquisição comercialmente.

Figura 7: Dimensões de pinças ER DIN 6499



Fonte: Adaptado de ATI (2013)

3.2 TRANSMISSÃO DE ROTAÇÃO DA FRESADORA PARA O CABEÇOTE ANGULAR

Na empresa METALTASCA também, foram recolhidos dados da fresadora ROMI U30, que é uma das fresadoras mais utilizadas, sendo que o cabeçote foi desenvolvido para a mesma.

Os dados recolhidos podem ser observados na Tab. 3:

Tabela 3: Dados da fresadora ROMI U30.

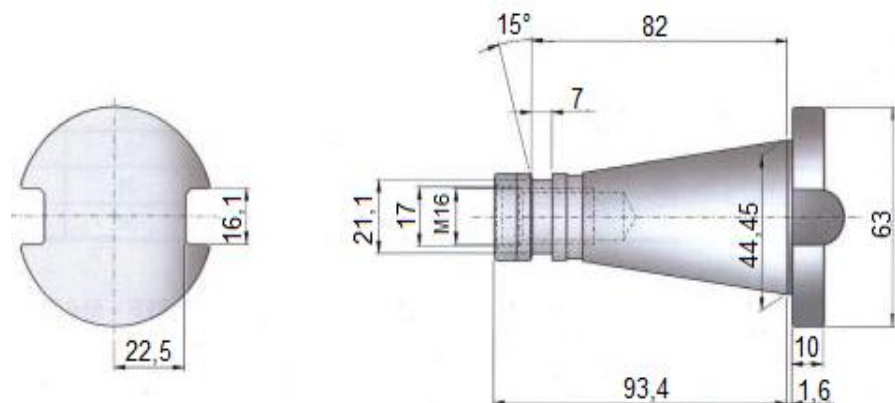
Potência do motor [W]	Número de velocidades	Varição de rotações [rpm]	Curso do eixo X [mm]	Curso do eixo Y [mm]	Curso do eixo Z [mm]	Fixação [ISO]
4413	12	45 a 2.000	800	250	300	40

Fonte: Do autor

Entre os dados recolhidos um dos mais importantes é o da rotação máxima, pois, juntamente com o valor da relação de transmissão dos dentes da coroa e do pinhão, pode-se obter a rotação máxima do cabeçote angular.

Analisando os dados da Tab.3, então optou-se que a transmissão de rotação da fresadora U30 para o cabeçote angular, será através do cone de fixação ISO 40. Na Fig. 8, é mostrado as medidas em mm, de um cone ISO 40 de acordo com a NORMA DIN 2080.

Figura 8: Cone de fixação ISO 40



Fonte: Adaptado de NORMA DIN 2080 (1956)

3.3 CÁLCULOS MECÂNICOS PARA A FRESA DE TOPO UTILIZADA

Como a pinça ER 20 foi escolhida para o projeto, então resolveu utilizar-se a fresa de topo com diâmetro D_f de 13 mm, que é a maior fresa de topo que a pinça pode fixar, ou seja, o caso que vai exigir maiores esforços do cabeçote angular.

Na Tab. 4 estão mostradas os dados de entrada para os cálculos dos parâmetros de corte da fresadora.

Tabela 4: Dados de entrada para cálculos

Profundidade de corte radial a_e [mm]	13
Profundidade de corte axial a_p [mm]	1,5
Profundidade de corte axial máxima $a_{p\text{máx}}$ [mm]	5,4
Percurso total da ferramenta l [mm]	120
Número de dentes da fresa Z	2
Avanço por dente f_z [mm/dente]	0,1
Força específica de corte K_c [MPa]	2520
Coefficiente de eficiência da máquina η [adm]	0,8

Fonte: do Autor (2020)

Com os dados da Tab.4 e utilizando as Eq. (3), (4), (5), (7) e (8) respectivamente foram feitos os cálculos dos parâmetros de corte da fresadora de acordo com a Tab.5.

Tabela 5: Parâmetros de corte da fresadora.

Frequência de rotação n [rpm]	Velocidade de corte da fresadora v_{cf} [m/min]	Velocidade de avanço da mesa v_f [mm/min]	Potência de corte máxima $P_{c\text{ máx}}$ [W]	Torque máximo $M_{c\text{ máx}}$ [N.m]
562,5	23	78,7	582	10

Fonte: do Autor (2020)

3.5 VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROJETO DO CABEÇOTE ANGULAR

Utilizando o valor de 80 mm para o diâmetro do eixo d_e , conforme a NORMA DIN 6885/1 da Tab.2, foram calculados o tempo de usinagem para aplainamento T_h , utilizando as Eq. (1) e (2), e o tempo de corte para fresamento T_c , utilizando a Eq. (6) e os resultados dos parâmetros de corte da Tab.3, empregando a profundidade de corte axial máxima $a_{p\text{máx}}$.

Com os resultados de T_h e T_c , se calculou a razão T_c/T_h , e o percentual T_c/T_h . Concluiu-se que o processo de fresamento, proporcionou uma economia no tempo de usinagem de aproximadamente 77,4%, se comparado com o de processo

de aplainamento, comprovando assim, a viabilidade econômica do cabeçote angular. Os resultados dos cálculos podem ser observados na Tab. 6:

Tabela 6: Parâmetros de corte, potência e torque.

Tempo de corte para fresamento T_c [min]	Tempo de corte para aplainamento T_h [min]	T_c / T_h [adm]	T_c / T_h [%]
12,2	54	0,23	-77,4

Fonte: do Autor (2020)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa foram dimensionados os componentes do cabeçote angular, utilizando os dados levantados em etapas anteriores, após o dimensionamento, o cabeçote angular foi fabricado e testado para a validação de todos os cálculos.

4.1 MODELAMENTO 3D DO EIXO PORTA PINÇA

Com os resultados da Tab. 5, foi feita simulações das forças atuantes devido ao fresamento no *software* Machining Power ISCAR, onde se obteve o valor aproximado da força de flexão na fresa $F_{flex \text{ fresa}}$ de 1656 N e uma força aproximada axial na fresa de topo $F_{a \text{ fresa}}$ de 374 N, conforme a Fig.9.

Figura 9: Forças de corte atuantes na fresa de topo.

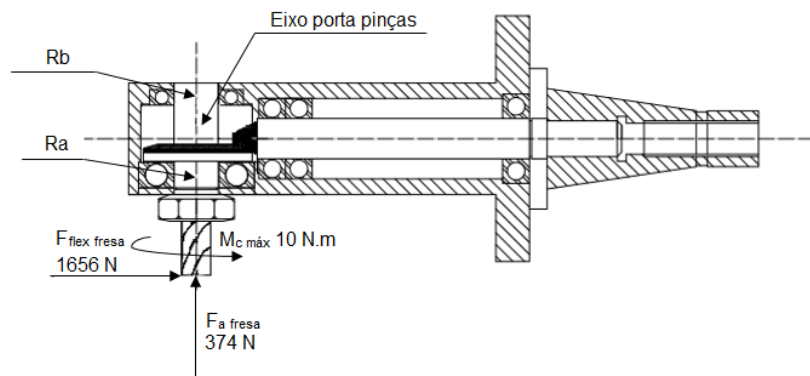


The screenshot shows the Machining Power ISCAR software interface. On the left, there is a navigation menu with options like 'Vc / n - Velocidade de corte / eixo', 'Vf - Velocidade de alimentação', 'P / T - Potência / Torque', 'Q - Taxa de remoção de material', 'F - Forças de corte', 'h - Espessura de cavacos', 'T - Tempo de corte', and 'M - Máx. momento de flexão do eixo'. The main area displays a 3D model of a cutting process with labels for cutting parameters: a_p (depth of cut), a_e (cutting edge width), and DC (cutting diameter). To the right, there is a form for inputting parameters and calculating results. The parameters entered are: DC = 13 mm, Width of cut = 13 mm, Number of flutes (NOF) = 2, Feed per flute (f_f) = 0,1 mm, Depth of cut (a_p) = 5,4 mm, Helix angle of the flute (FHA) = 30 deg, Material = AISI 1045, and Effective inclination angle (γ) = 0 deg. Below the form, there are 'Redefinir' and 'Calcular' buttons. The results shown are: Max spindle bending force = 1.655,58 N and Maximum axial force = 373,74 N.

Fonte: Adaptado do *software* Machining Power ISCAR (2020)

Com os resultados obtidos na Tab.5 e no *software* Machining Power ISCAR, foi feito um desenho esquemático das forças atuantes no eixo porta pinças devido ao processo de fresamento, e suas reações R_a e R_b , que são as forças de reação que os rolamentos devem suportar, conforme a Fig.10.

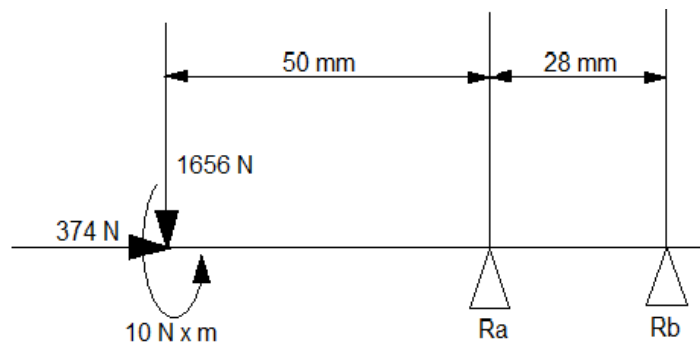
Figura 10: Forças atuantes no eixo porta pinças e suas reações



Fonte: do Autor (2020)

Com os todos os dados da Fig 10, foi feito um diagrama de corpo livre das forças atuantes no eixo porta pinças, devido as forças de corte da fresa de topo, conforme a Fig.11.

Figura 11: Forças atuantes no eixo porta pinça.



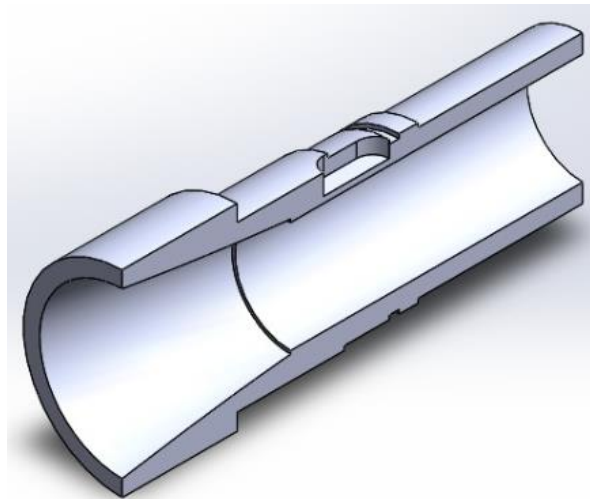
Fonte: do Autor (2020)

Com o intuito de reduzir os custos para fabricação do cabeçote angular e ao mesmo tempo ter uma boa resistência do material, foi adotado o aço SAE 1045 para o dimensionamento do eixo, pois apresenta boas propriedades mecânicas, conforme a Tab.1, baixo custo e a facilidade de adquiri-lo comercialmente.

Para que se possa fixar a fresa de topo, o eixo porta pinças tem que ser vazado, com o diâmetro interno d , conforme Eq (11), de 13,5 mm. Adotando um coeficiente de segurança de 2, e com as Eq. (9), (10), (11) e (12) respectivamente, se utilizou o software EXCEL para os cálculos, onde se obteve o valor de diâmetro externo d_0 , conforme Eq. (12), de aproximadamente 18 mm.

Considerando que eixo porta pinças deverá alojar a pinça ER 20, conforme as suas dimensões mostradas na Fig.7, que o diâmetro externo d_0 , é de aproximadamente 18 mm e que o cabeçote angular está sendo projetado para entrar em um furo mínimo de 80 mm, foi feito o modelamento 3D do eixo porta pinças, mostrado na Fig.12.

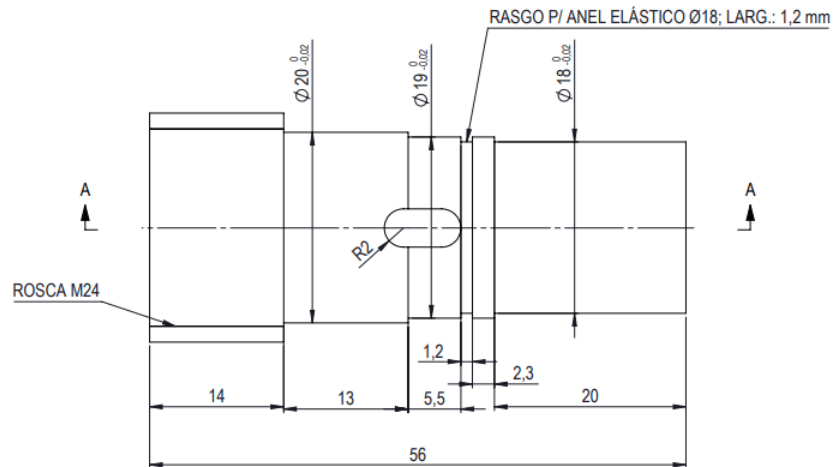
Figura 12: Modelamento 3D eixo porta pinças.



Fonte: do Autor (2020)

Para a fixação da pinça ER20 se fez necessário o dimensionamento de um cone interno e de uma rosca externa para ajuste, pois quanto mais se aperta a porca, mais se fecham os rasgos existentes na pinça, gerando assim, a pressão necessária para a fixação da fresa de topo. Levando em consideração o cone interno, se percebeu a necessidade de aumentar o diâmetro externo onde vai ficar alojado o rolamento, pois a parede do eixo ficaria muito fina, podendo originar um ponto de ruptura, como os cálculos demonstraram que o diâmetro externo d_0 , deve ser no mínimo de 18 mm, adotou-se a medida de 20 mm de diâmetro para o alojamento do rolamento; 19 mm de diâmetro para o encaixe da coroa e 18 mm de diâmetro para o alojamento do outro rolamento. Na Fig.13 é mostrado as dimensões do eixo porta pinças.

Figura 13: Dimensões eixo porta pinças.



Fonte: do Autor (2020)

4.2 PINHÃO E COROA

Alguns dos fatores importantes que devem ser levados em consideração são o baixo custo para fabricação do cabeçote e a fácil manutenção, então se buscou adquirir comercialmente as engrenagens cônicas. Para aquisição das engrenagens alguns fatores foram observados:

- ✓ Dimensões do pinhão e da coroa, em função do espaço reduzido para o projeto;
- ✓ Potência e torque máximos que podem ser transmitidos;
- ✓ Custo e facilidade de aquisição;

Após várias pesquisas foi adquirida o conjunto de engrenagens da esmerilhadeira DWE 4120 DEWALT, com potência de 900 W, conforme a Tab. 7, atendendo a condição potência de corte máxima de 582 W, conforme a Tab. 5.

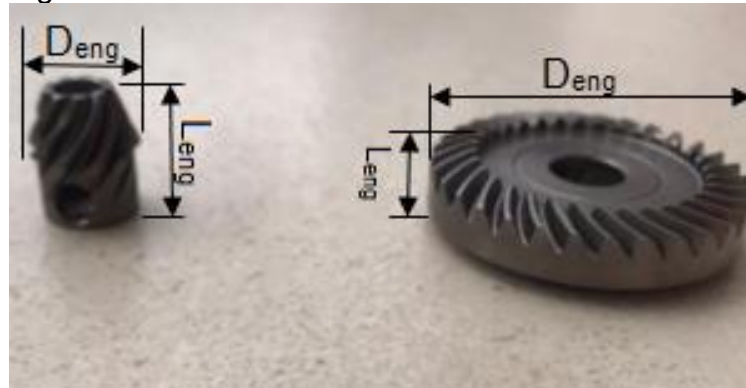
Tabela 7 – especificações esmerilhadeira DWE 4120 DEWALT

Tensão [V]	Potência [W]	Rotação [rpm]
220	900	12000

Fonte: do Autor (2020)

Na Fig. 14, está mostrado o pinhão e coroa DWE 4120 DEWALT e algumas de suas variáveis.

Figura 14: Pinhão e coroa DWE 4120 DEWALT.



Fonte: do Autor (2020)

Na Tab. 8 estão mostradas as principais dimensões do pinhão e da coroa selecionados.

Tabela 8 – Dimensões do pinhão e da coroa

Descrição	Número de dentes da engrenagem Z_{eng} [adm]	Diâmetro externo D_{eng} [mm]	Largura Total L_{eng} [mm]
Coroa	32	42	8
Pinhão	9	15	18

Fonte: do Autor (2020)

4.3 ESFORÇOS RESULTANTES PINHÃO E COROA

Com os dados dos principais esforços no engrenamento cônico com dentes palóides, conforme Fig. 3, as equações da Fig. 4, e o *software* EXCEL foram obtidos os valores das forças resultantes F_r e F_a no pinhão e na coroa, conforme a Fig. 15.

Figura 15: Cálculos no EXCEL de F_r e F_a no pinhão e na coroa.

28	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	F_t [N]	F_r [N]	F_a [N]	r_1 [mm]	r_2 [mm]
29	25	166	19	12	1.656	374	299	7,5	20
30									
31	PINHÃO		COROA						
32	F_{t3} [N]	F_{t4} [N]	F_{t5} [N]	F_{t6} [N]					
33	1.905	249	641	1.015					
34	F_{r3} [N]	F_{r4} [N]	F_{r5} [N]	F_{r6} [N]					
35	430	56	116	183					
36	Q_3 [N]	Q_4 [N]	Q_5 [N]	Q_6 [N]					
37	14	14	241	241					
38	C_3 [N]	C_4 [N]	C_5 [N]	C_6 [N]					
39	3.827.537	67.077	426.665	1.210.505					
40	1.956	259	653	1.100					
41	F_a [N]		F_r [N]						

Fonte: do Autor (2020)

Sendo que é o sentido de rotação da coroa, que determina o sentido das forças resultantes pelo engrenamento, conforme a Fig. 5, adotando que a rotação da fresa de topo é no sentido horário, e com os valores das forças resultantes F_r e F_a no pinhão e na coroa, conforme a Fig. 15, se obteve os resultados da Tab.9.

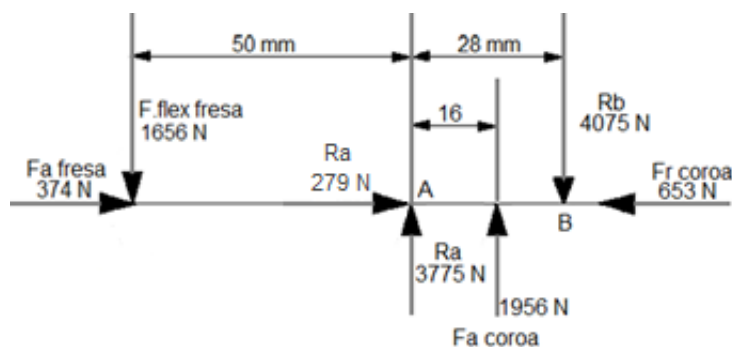
Tabela 9: Forças resultantes e sentidos.

Descrição	F_r [N]	F_a [N]	Sentido F_r	Sentido F_a
Pinhão	653	1.956	-	+
Coroa	653	1.956	+	-

Fonte: do Autor (2020)

Com os valores das forças resultantes e suas respectivas direções, conforme a Tab. 9, se utilizou as Eq. (13), (14), e (15), para calcular as reações R_a e R_b , valores muito importantes para seleção dos rolamentos. Todas as forças atuantes no eixo porta pinças estão ilustradas no diagrama de corpo livre, conforme Fig.16.

Figura 16: Esforços no eixo porta pinças



Fonte: do Autor (2020)

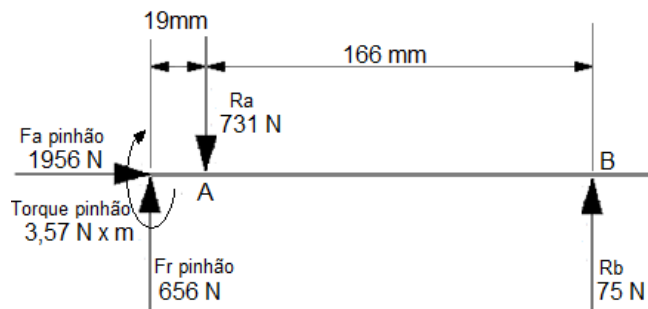
Com as dimensões do eixo porta pinças já definidas e os valores das forças no ponto A, utilizando as Eq. (16), (17), e (18), no *software* EXCEL, foi calculado a capacidade de carga básica estática C_{or} , de 3775 N, a capacidade de carga básica dinâmica C_r , de 9060 N, e então foi selecionado o rolamento de esferas 6004, conforme o Catálogo Geral NSK (2002, p.B8). Foi escolhido o rolamento do tipo de esfera, pois este tipo de rolamentos suporta pequenos esforços axiais nos dois sentidos, sem a necessidade de montagem combinada de dois rolamentos, como no caso, dos rolamentos de rolos cônicos.

Outro fator importante no projeto de um equipamento, é sua fácil desmontagem e manutenção, o mais usado nesses casos é rolamento de agulha. Com valor das forças no ponto B, se efetuou o mesmo procedimento citado anteriormente, e foi selecionado o rolamento de agulhas FJ 1812, conforme o Catálogo Geral NSK (2002, p.B260).

4.4 MODELAMENTO 3D DO EIXO DO CORPO DO CABEÇOTE ANGULAR

Com os valores de todas as forças atuantes no eixo do corpo do cabeçote, foi gerado um diagrama de corpo livre, conforme a Fig.17.

Figura 17: Forças atuantes no eixo do corpo do cabeçote.



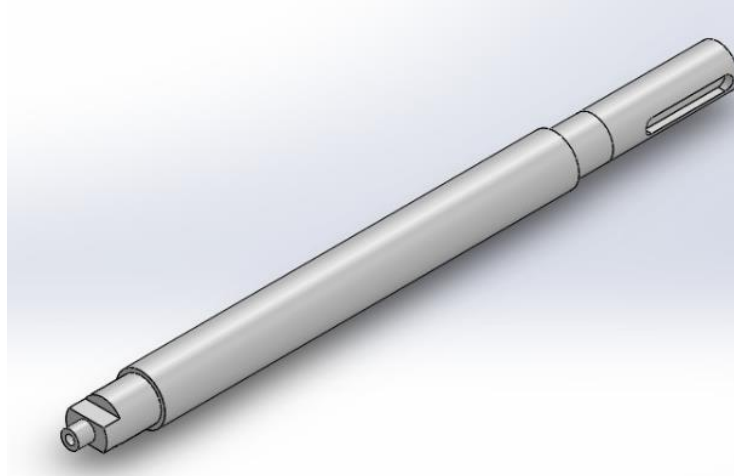
Fonte: do Autor (2020)

Adotando aço SAE 1045 como material do eixo, um coeficiente de segurança de 2, e com as Eq. (9), (10), (11) e (12) respectivamente, se utilizou o *software* EXCEL para os cálculos, onde se obteve o valor de diâmetro externo d_0 , conforme Eq (12), de aproximadamente 9,5 mm.

Com os valores das forças no ponto A e B do eixo do corpo, utilizando as Eq. (16), (17), e (18), no *software* EXCEL, e então foi selecionado o rolamento de esferas 6002, conforme o Catálogo Geral NSK (2002, p.B8), que foram montados combinados dois a dois, totalizando quatro rolamentos.

Com as dimensões do pinhão e dos rolamentos definidas, foi projetado o eixo do corpo do cabeçote, que é o eixo que transmite o movimento do cabeçote universal da fresadora U30, para o cabeçote angular. Na Fig. 18, é mostrado o modelamento 3D do eixo do corpo do cabeçote.

Figura 18: Modelamento 3D eixo corpo do cabeçote.

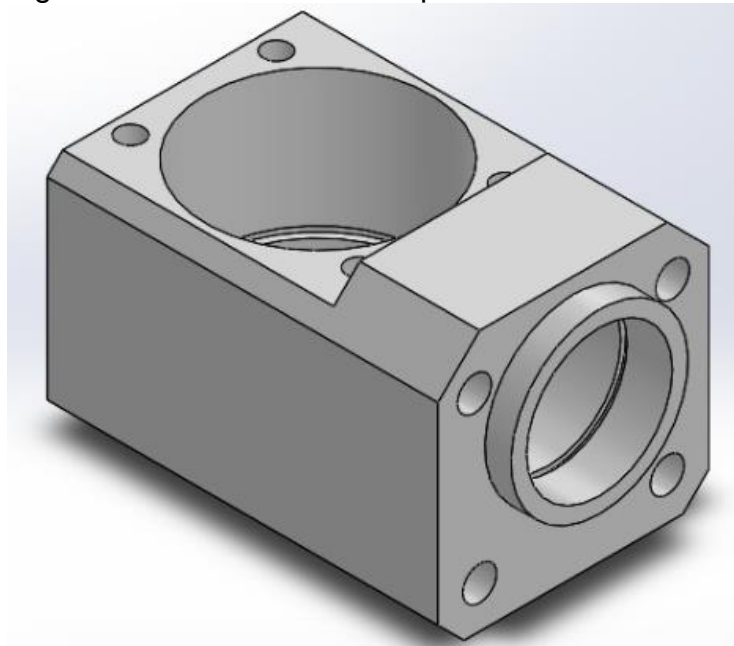


Fonte: do Autor (2020)

4.5 DIMENSIONAMENTO DO ACOPLAMENTO DE TRANSMISSÃO

Com os componentes para a transmissão ortogonal todos definidos, se projetou o acoplamento de transmissão e, a decisão de fazer um acoplamento separado do corpo do cabeçote, levou em consideração a fácil desmontagem e manutenção do cabeçote angular. Na Fig.19 é mostrado o Modelamento 3D do acoplamento de transmissão.

Figura 19: Modelo 3D do acoplamento de transmissão.



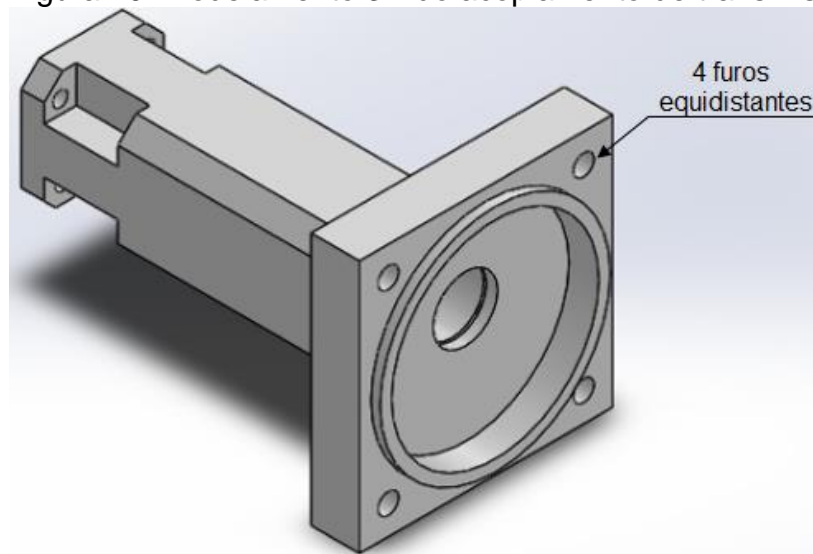
Fonte: do Autor (2020)

4.6 DIMENSIONAMENTO DO CORPO DO CABEÇOTE ANGULAR

Com acoplamento já dimensionado, se iniciou o dimensionamento do corpo do cabeçote, que deve ser fixado ao acoplamento e na chapa de adaptação. O alinhamento foi feito através de encaixe de ressalto e rebaixo, e a fixação através de parafusos; lembrando que a definição do comprimento útil de fresamento de 200 mm, foi um dos fatores importantes para se definir o comprimento total do corpo do cabeçote.

Para que o cabeçote pudesse trabalhar em quatro posições diferentes, foi feito um raio de furação com quatro furos equidistantes, possibilitando a usinagem em 0, 90, 180 e 270 graus, como o cabeçote universal também tem o movimento angular, então o cabeçote será eficaz para diversas operações de usinagens. Na Fig.20 é mostrado as furações equidistantes que possibilitam o giro do cabeçote em quatro posições diferentes.

Figura 20: Modelamento 3D do acoplamento de transmissão.



Fonte: do Autor (2020)

4.7 DIMENSIONAMENTO DA CHAPA DE ADAPTAÇÃO

A função da chapa de adaptação é de fixar o cabeçote na fresadora Romi U30, utilizando a própria furação que existe no cabeçote universal, e dependendo da frequência que é feito estes rasgos na empresa, esta chapa de adaptação poderá ficar

fixa na máquina, pois não influenciará em outros processos de usinagem, tornando muito mais rápida a adaptação e utilização do cabeçote angular, quando necessário.

Para o dimensionamento da chapa foi necessário fazer as medições da chapa já existente na fresadora U30, nas dependências da SATC, conforme a Fig. 21.

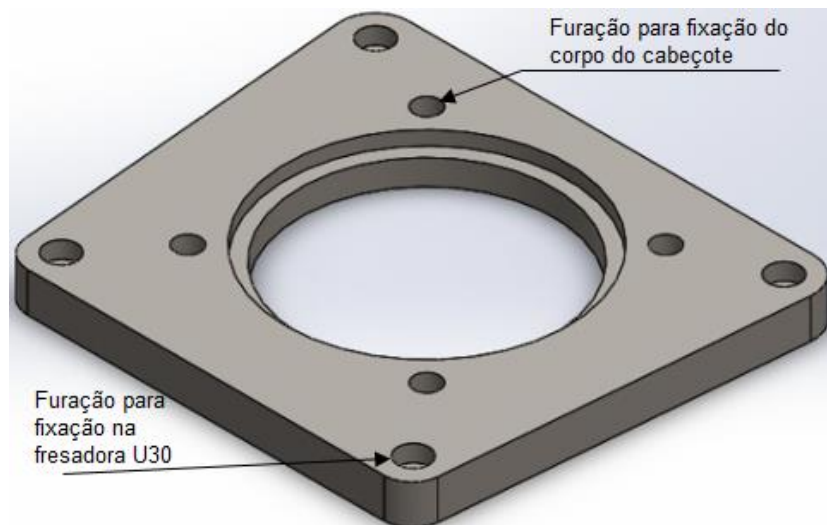
Figura 21: Chapa da Fresadora Romi U30 na SATC.



Fonte: do Autor (2020)

Com as medidas da chapa da fresadora Romi U30 e com as dimensões do corpo do cabeçote já definidas, então foi dimensionado a chapa de adaptação, conforme a Fig. 22.

Figura 22: Chapa de adaptação em modelamento 3D.

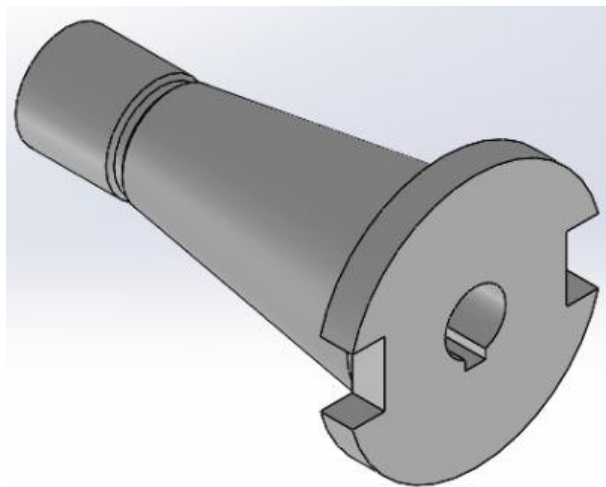


Fonte: do Autor (2020)

4.8 DIMENSIONAMENTO DO CONE ISO 40

Conforme a Tab. 3, a fresadora Romi U30 utiliza o cone fixação ISO 40, com suas dimensões mostradas na Fig. 8. Considerando as medidas do eixo do corpo do cabeçote, se dimensionou o cone de fixação do cabeçote angular, conforme a Fig. 23.

Figura 23: Cone de fixação em modelamento 3D



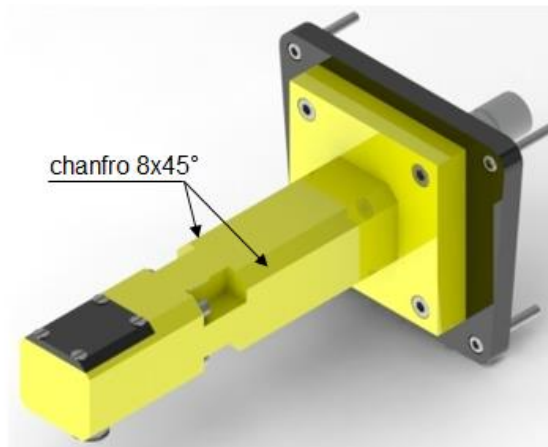
Fonte: do Autor (2020)

4.9 MONTAGEM DOS COMPONENTES EM MODELAMENTO 3D

Foi elaborada a montagem de todos os componentes, para assim, corrigir eventuais erros de projeto. Este tipo de montagem é importante para realmente, ter a certeza que todos os componentes irão devidamente se encaixar, diminuindo futuros erros na sua fabricação.

Como o cabeçote foi projetado para usinar rasgos em diâmetros menores ou iguais a 80 mm, com a montagem de todos os componentes, inclusive a fresa de topo, se verificou se as dimensões do cabeçote possibilitariam tal condição de usinagem. Então se fez necessário, uma alteração na medida dos chanfros na parte superior cabeçote, de 5 mm x 45° para 8 mm x 45°, atendendo assim as condições de usinagem, conforme a Fig.24.

Figura 24: Projeto final do cabeçote em modelamento 3D.

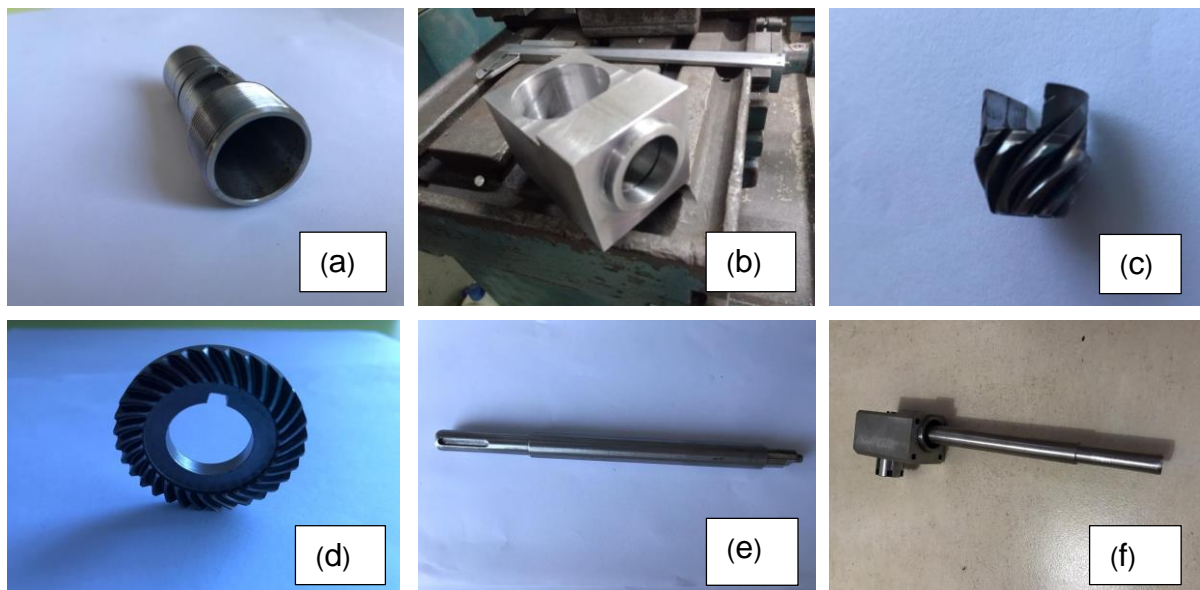


Fonte: do Autor (2020)

4.10 USINAGEM DAS PEÇAS

Após a montagem de todos os componentes em modelamento 3D, se iniciou-se a usinagem de todos os componentes, primeiramente foram usinados pelos processos de torneamento, fresamento e furação: o eixo porta pinças, o acoplamento de transmissão, o pinhão, a coroa e o eixo do corpo; e posteriormente foi feita a montagem destes componentes para verificar o engrenamento do pinhão e se necessário fazer possíveis ajustes, conforme a Fig.25.

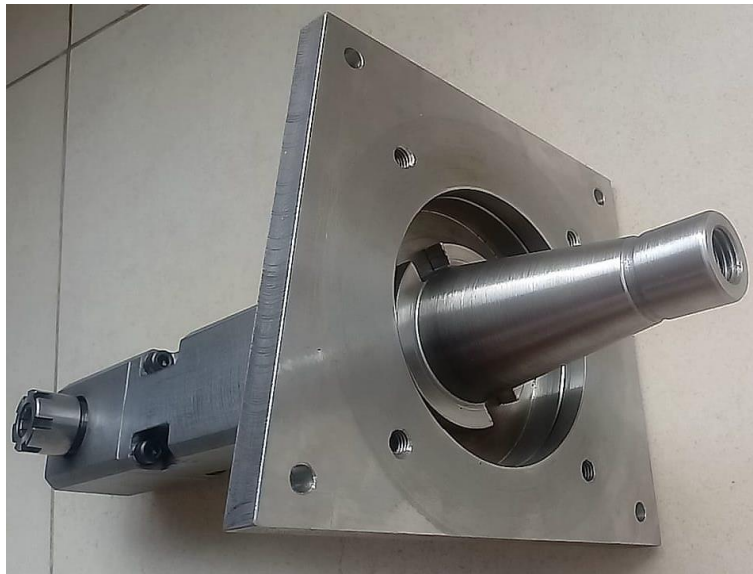
Figura 25: Peças usinadas: (a) eixo porta pinça, (b) acoplamento da transmissão, (c) pinhão, (d) coroa, (e) eixo do corpo, (f) montagem dos componentes.



Fonte: do Autor (2020)

Com todos os componentes para o engrenamento devidamente montado e ajustados, foi realizada então a usinagem e a montagem do restante dos componentes do cabeçote, lembrando que para a fabricação do corpo do cabeçote foi feito o processo de soldagem, buscando reduzir os custos com material. Ressalta-se também que todos os componentes foram fabricados em aço SAE 1045, em razão de suas boas propriedades mecânicas, fácil aquisição e custo acessível. A montagem do restante dos componentes está mostrada na Fig.26.

Figura 26: Usinagem e montagem de todos os componentes



Fonte: do Autor (2020)

4.11 TESTES DO CABEÇOTE ANGULAR NA FRESADORA U30

Para testar o cabeçote finalizado, foi feita uma montagem na fresadora Romi U30 nas dependências da SATC. Foram feitos testes de usinagem, utilizando uma fresa de topo com diâmetro D_f , de 13 mm.

Primeiramente foi usinado um rasgo em uma peça de alumínio, para se ter uma noção de como o cabeçote reagiria aos esforços, e como no alumínio se obteve ótimos resultados, então se fez o teste usinando um rasgo de chaveta interno em uma peça de aço ABNT 1045, regulando a máquina com todos os parâmetros de corte calculados nas Tab. 4 e Tab.5, não se utilizou fluido de corte na usinagem para realmente testar o cabeçote em suas piores situações de usinagem, conforme a Fig.27.

Figura 27: Usinagem rasgo de chave: (a) alumínio, (b) ABNT 1045.



Fonte: do Autor (2020)

O cabeçote angular atendeu a todas as condições exigidas, entretanto se fosse utilizada uma fresa de topo de metal duro, com mais gumes de corte e, refrigeração com fluido de corte apropriado, estima-se que os resultados seriam muito melhores. Na Tab. 10, seguem os resultados dos testes de usinagem feitos nas peças de alumínio e, de aço ABNT 1045.

Tabela 10: Resultados dos testes de usinagem.

Material da peça	Velocidade de corte no fresamento v_{cf} [m/min]	Avanço de mesa v_f [mm/min]	Profundidade de corte a_p [mm]
Alumínio	23	80	6
Aço ABNT 1045	23	80	1,5

Fonte: do Autor (2020)

4.12 CUSTOS TOTAIS DO PROJETO E FABRICAÇÃO DO CABEÇOTE ANGULAR

Partindo do princípio da viabilidade econômica do cabeçote angular, a fabricação do cabeçote, além de atender ao requisito de aumentar a produtividade dos rasgos internos, também deve ter um custo acessível, caso contrário continuará sendo viável a usinagem através do processo de aplainamento. Na Tab. 11, é mostrado todos os custos de projeto e fabricação do cabeçote angular.

Tabela 11: Custos de projeto e fabricação do cabeçote

Custos totais com material (barras, tarugos, chapas) [R\$]	150,00
Custo dos componentes (engrenagens, rolamentos, anéis elásticos e parafusos) [R\$]	120,00
Custo com mão de obra na usinagem das peças [R\$]	1.240,00
Custo com mão de obra de projeto [R\$]	2.990,00
Custo total de fabricação do cabeçote angular [R\$]	4.500,00

Fonte: do Autor (2020)

Os custos de fabricação são relativamente baixos, se comparado com valores de outros tipos de cabeçotes já existentes no mercado, pois se tentou ao máximo reduzi-los utilizando materiais e componentes acessíveis e de fácil aquisição, como foi o caso do pinhão e da coroa com dentes palóides.

5. CONCLUSÃO

Com o projeto e posteriormente com a fabricação do cabeçote angular, foi possível agregar muito conhecimento, contribuindo e somando para a formação acadêmica. O estudo em questão envolveu técnicas de desenvolvimento de projetos, principalmente em modelamento 3D no software SOLIDWORKS®, além de todo o conhecimento adquirido com a busca por literaturas contendo informações referentes ao estudo.

Contudo, foi possível projetar e fabricar o cabeçote angular, que atenda as exigências impostas (furos maiores ou igual a 80 mm), principalmente usar rasgos internos através do processo de fresamento, reduzindo o tempo de fabricação em aproximadamente 77% em relação ao processo de aplainamento.

No projeto do cabeçote foram feitos cálculos de parâmetros de corte de aplainamento e de fresamento, que posteriormente foram utilizados para todo o dimensionamento do cabeçote, entre estes cálculos, os mais importantes foram o de tempo de corte para aplainamento e para fresamento, T_h e T_c respectivamente, pois com estes valores foi comprovada a viabilidade do projeto. Outro resultado importante foi o de potência de corte máxima $P_{cmáx}$, pois com ele foi possível dimensionar as engrenagens cônicas com dentes palóides e adquiri-las comercialmente, reduzindo os custos de fabricação do cabeçote angular.

Para o dimensionamento dos componentes do cabeçote foram utilizadas equações de resistência dos materiais, e de elementos de máquinas, principalmente nos cálculos dos esforços atuantes nos eixos, pois existiam forças axiais e radiais resultantes do processo de fresamento e do engrenamento do pinhão e da coroa com dentes palóides. Para a seleção dos rolamentos foram levadas em consideração as seguintes variáveis: espaço permissível para o rolamento, intensidades e direções das cargas, sua disponibilidade e seu custo de aquisição.

Nos testes realizados foram utilizados os parâmetros de corte calculados, foi feita usinagem de um rasgo de chaveta interno em uma peça de aço SAE 1045, onde se verificou que mesmo sem a utilização de fluido de corte, o cabeçote angular atendeu tranquilamente a todos os parâmetros de corte do projeto, validando assim, os cálculos realizados. Os testes foram feitos sem a lubrificação necessária e com uma fresa de topo de aço rápido de duas arestas, justamente para expor o cabeçote a condições extremas de usinagem.

Enfim o cabeçote angular apresentou resultados satisfatórios quanto a realização da sua função, que é de usinar rasgos de chavetas internos pelo processo de fresamento, e também aliado ao seu baixo custo de fabricação, se mostrou totalmente viável economicamente.

Como sugestão, desenvolver novos estudos baseando-se neste princípio com o intuito de se alcançar rotações maiores, que possibilitem um aumento na velocidade de corte e no rendimento do cabeçote angular.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por me proporcionar a capacidade e motivação necessária para a obtenção do título de engenheiro mecânico, a minha mãe, aos meus familiares e minha noiva que sempre estiveram do meu lado me apoiando e me incentivando, ao professor Richard de Medeiros Castro por toda a paciência e contribuição, ao meu orientador Luiz Carlos de Cesaro Cavaler por sempre estar disposto a me atender, me auxiliando e me incentivando em busca do objetivo final. Enfim, agradeço a todas as pessoas, amigos e familiares, que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta etapa.

6. BIBLIOGRAFIA

REFERÊNCIAS

DEGARMO, E. Paul; BLACK, J. T.; KOHSER, Ronald A. Materials and processes in manufacturing. 10. ed New Jersey: John Wiley & Sons, 2008, 1010, 9 p.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. Tecnologia da usinagem dos materiais. 5. ed. São Paulo: Artliber, 2006, 255p.

JASINEVICIUS, Renato Goulart; Processos de Usinagem.3.ed. São Paulo, 2014.

STEMMER, C.E. Ferramentas de Corte I. 5. Ed. Florianópolis Ed. Da UFSC, 2001.

GORGON, T. V. Manual de cálculo dos tempos da usinagem dos metais. São Paulo: Ciência e Tecnologia, 1981, 164 p.

STOETERAU, R. L., 2007 Análise da Influência do Material sobre o Desgaste da Ferramenta de Usinagem.

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, C.R., BUDYNAS, R.G., Projeto de Engenharia mecânica, 7a edição, Bookman, 2003.

PROVENZA, Francesco; Projetista de Maquinas,71° edição, São Paulo: PROTEC, 1990, 486p.

MELCONIAN, S. ELEMENTOS DE MÁQUINAS.9ED. SÃO PAULO: ÉRICA, 2008. 376P.

Rebechi, J, G., 2011, "Correlações numéricas entre taxas de resfriamento, microestruturas e propriedades mecânicas para o tratamento térmico do aço.

Manual de aços Gerdau. Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf. Acesso: 25 de maio de 2020.

CALLISTER Jr., W.D. Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. Tradução de Sérgio Murilo S. Soares. Editora LTC, 5a. edição, 2002.

NORTON, R. L. Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada. 2a. Porto Alegre: Bookman, 2004.

E.W. Nelson, C.L. Best, W.G. McLean, Merle C. Potter, Engenharia Mecânica Estática, Editora Bookman, 2013.

POPOV, E.P. Engineering mechanics of solids. 2nd. Edition, Prentice Hall, 1998.

CATÁLOGO GERAL NSK; Rolamentos, São Paulo, 2002.

DIN. (1956). Norma 6885:1956. Dimensões para chavetas paralelas. Alemanha.

A.T.I. BRASIL - ARTIGOS TÉCNICOS INDUSTRIAIS LTDA, 1º edição, 2013, 14p.

DIN. (1956). Norma 2080:1956. Dimensões para mandris. Alemanha.

Machining Power ISCAR. Disponível em:
<https://mpwr.iscar.com/Milling/FCuttingForces>. Acesso: 02 de maio de 2020.

LISTA DE SÍMBOLOS

v_m	[m/min]	Velocidade média de corte
v_c	[m/min]	Velocidade de avanço no corte
v_r	[m/min]	Velocidade de retorno
T_h	[min]	Tempo de corte para aplainamento
B	[mm]	Largura a ser usinada
L	[mm]	Comprimento do golpe
f_g	[mm/golpe]	Avanço para cada golpe de corte e retorno
i	[adm]	Número de passes
nL	[golpes/min]	Número de golpes de corte e retorno
v_{cf}	[m/min]	Velocidade de corte da fresadora
D_f	[mm]	Diâmetro da fresa
n	[rpm]	Frequência de rotação
vf	[mm/min]	Velocidade de avanço da mesa
f	[mm/rev]	Avanço da mesa
T_c	[min]	Tempo de corte para fresamento
f_z	[mm/dente]	Avanço por dente
Z	[adm]	Número de dentes da fresa
l	[mm]	Percurso total da ferramenta
	[adm]	Número de passes da fresa

i_f		
P_c	[kW]	Potência de corte
a_p	[mm]	Profundidade de corte axial
a_e	[mm]	Profundidade de corte radial
$P_{c\ máx}$	[W]	Potência de corte máxima
$a_{p\ máx}$	[mm]	Profundidade de corte axial máxima
K_c	[MPa]	Força específica de corte
η	[adm]	Coefficiente de eficiência da máquina
M_c	[N.m]	Torque exigido para o fresamento
$M_{c\ máx}$	[N.m]	Torque máximo exigido para o fresamento
F_a	[N]	Força axial no pinhão e axial na coroa
F_r	[N]	Força radial no pinhão e radial na coroa
M_i	[N.m]	Momento ideal
a	[adm]	Coefficiente de Bach
b	[N]	Fator de forma
d_0	[m]	Diâmetro do eixo
D	[m]	Diâmetro externo da árvore vazada
d	[m]	Diâmetro interno da árvore vazada ou externo da árvore maciça
σ_{fad_m}	[Pa]	Tensão admissível de flexão
τ_{tad_m}	[Pa]	Tensão admissível na torção
M_t	[N.m]	Torque na árvore
M_r	[N.m]	Momento fletor resultante
M	[N.m]	Momento no ponto analisado
S	[m]	Distância entre o ponto analisado e a força aplicada

$M_{x,y}$	[N.m]	Momentos no plano X ou Y
$F_{x,y}$	[N]	Forças no plano X ou Y
P_o	[N]	Carga estática equivalente
C_{or}	[N]	Capacidade de carga básica estática
C_r	[N]	Capacidade de carga básica dinâmica
F_{rad}	[N]	Carga radial no rolamento
F_{ax}	[N]	Carga axial no rolamento
X_o	[adm]	Coefficiente de carga radial
Y_o	[adm]	Coefficiente de carga axial
f_o	[adm]	Coefficiente de carga estática permissível
f_h	[adm]	Coefficiente de vida útil do rolamento
f_n	[adm]	Coefficiente de velocidade
d_e	[mm]	Diâmetro do eixo
b_{ch}	[mm]	Largura da chaveta
h	[mm]	Altura da chaveta
t_1	[mm]	Profundidade da chaveta no eixo
t_2	[mm]	Profundidade da chaveta no cubo
$F_{flex fresa}$	[N]	Força de flexão na fresa
$F_a fresa$	[N]	Força axial na fresa
R_a	[N]	Reação no ponto A
R_b	[N]	Reação no ponto B
D_{eng}	[mm]	Diâmetro externo da engrenagem
L_{eng}	[mm]	Largura total da engrenagem
Z_{eng}	[adm]	Número de dentes da engrenagem