

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEMEC
ESCOLA DE ENGENHARIA**

PAULO DANIEL SILVEIRA DE SOUZA

PROJETO DE MESA MAGNÉTICA PARA USO EM CENTRO DE USINAGEM CNC

Monografia apresentada ao departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Heraldo J. Amorim
Co-Orientador: Ney F. Ferreira

Porto Alegre
2004



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE MESA MAGNÉTICA PARA USO EM CENTRO DE USINAGEM CNC

PAULO DANIEL SILVEIRA DE SOUZA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. FLÁVIO J.LORINI

Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. FLÁVIO JOSÉ LORINI
UFRGS / DEMEC

Prof. Mestre GUIDO GABELINI
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. IVAN GUERRA MACHADO
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre

2004

de modo especial, à meus pais Paulo e Cristina que sempre incentivaram meus estudos e confiaram em meu potencial, e à minha namorada Michele companheira de todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a...

ao meu orientador, *Prof. Heraldo J. Amorim* que sempre esteve presente e nunca negou qualquer ajuda solicitada...

ao Engenheiro Ricardo Mombrú, que gentilmente permitiu o uso do laboratório de usinagem do SENAI/CETEMP para pesquisa...

ao colega de estudo e bolsista do SENAI Diego Rubén Schmeda Lopez , pela grande ajuda no desenvolvimento do trabalho...

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:

- Laboratório de usinagem SENAI/CETEMP
- Laboratório de Usinagem da UFRGS.

"Grande é o sujeito que pode fazer o que deseja;
sábio aquele que deseja fazer o que pode"

Autor Anônimo

SOUZA, P. D. S. **Projeto de Mesa Magnética para uso em Centro de Usinagem CNC.** 2004. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é projetar um suporte magnético para uso em centros de usinagem CNC. O suporte servirá como apoio para que as peças a ser usinadas possam ser fixadas de modo rápido e eficiente, economizando tempo passivo gasto na fixação e setup de peça, aumentando assim a produtividade, e possibilitando a obtenção de peças com tolerâncias mais apertadas. O campo magnético do suporte é gerado por bobinas elétricas. Esse campo foi calculado através da análise teórica dos esforços envolvidos que determinavam a força de corte atuante na peça pelo fresamento. Com a força de corte determinada, foi possível calcular a força magnética necessária para garantir a fixação da peça, dimensionando assim o circuito magnético utilizado.

PALAVRAS CHAVE: Suporte, CNC, Fixação, Setup, Campo magnético, Bobinas elétricas, Fresamento

SOUZA, P. D. S. **Project of Magnetic Table for use in CNC Machining Center.** 2004. 15f. Monograph (Conclusion Work for Mechanical Engineer course) – Department of Mechanical Engineer, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

ABSTRACT

The objective of this work is to project a magnetic pallet for CNC Machining centers. The magnetic pallet will provide a fast and efficient fixture for the machined parts, saving out fixturing and machine setup time, increasing the production rate, and obtaining parts with tighter tolerances. The magnetic field of the support is generated by an electric coil. This field was calculated through the theoretical analysis of the efforts involved that determined the force of active progress in the part for CNC milling. With the calculated forces, it was possible determine the magnetic force needed, and the equivalent magnetic circuit.

KEYWORDS: CNC machining, magnetic pallet, Magnetic field, Electric coil, Milling

SUMÁRIO

ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 Centros de Usinagem CNC	10
2.2 Eletromagnetismo	11
2.2.1 Campo Magnético	11
2.2.2 Materiais Ferromagnéticos	11
2.3 Fresamento	11
3. FIXAÇÃO DE FERRAMENTA	12
4. REQUISITOS DE PROJETO	13
4.1 Fresamento	14
4.2 Materiais e Dimensões dos Componentes	14
4.3 Coeficiente de Atrito	14
4.4 Distribuição do Campo	15
5. PROJETO CONCEITUAL	15
5.1 Sistema de Fixação	15
5.2 Superfície de Contato	16
5.3 Circuito Magnético Equivalente	17
5.3 Fixação da Mesa na Máquina CNC	18
5.4 Vedação	18
5.5 Apoios de Referência	19
6. ANÁLISES E RESULTADOS	20
6.1 Pressão Específica de Corte Média	20
6.2 Força de Corte	20
6.3 Determinação da Indução Magnética	20
6.4 Determinação das Relutâncias Magnéticas	21
6.5 Dimensionamento das Bobinas	22
7. CONCLUSÕES	22
8. REFERÊNCIAS	23
9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	23
ANEXO – Detalhamento do suporte magnético	24

1. INTRODUÇÃO

A automatização dos meios de produção tornou-se tão importante que equipamentos CNC são hoje imprescindíveis na indústria. Estes são instrumentos de produção que permitem grande produtividade quando comparados com máquinas operatrizes convencionais, além de maior precisão. Coincidentemente, grandes tempos são perdidos em operações relacionadas que devem ser realizadas pelos operadores: a fixação e referência de peça a ser usinada.

Desse modo o desenvolvimento de sistemas para fixação de peças é de enorme importância para o aumento produtivo em centros de usinagem. Isto porque o tempo passivo gasto na fixação e setup do componente é muito grande em comparação com o tempo de corte, ocasionando um custo maior na sua confecção. Com a produção de um dispositivo de fixação magnética, um sistema mais prático e eficiente otimizará todo o processo de fixação e referência da peça e assim, reduzirá seu custo final.

Através da análise teórica dos esforços envolvidos no fresamento, e com a determinação do coeficiente de atrito entre as superfícies do corpo de prova e a base da mesa, é calculado o esforço necessário para a fixação da peça, usado para o projeto em questão.

Este projeto se justifica pelo fato de haver uma grande necessidade de se diminuir o tempo gasto na fabricação de peças em centros de usinagem. Também há interesse, por parte do Laboratório de Usinagem da UFRGS, da construção desse equipamento, considerando o alto custo de aquisição de um dispositivo similar.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CENTROS DE USINAGEM CNC

Um sistema de controle numérico comanda as ações de uma ou mais máquinas por interpretação automática de instruções expressas em números. A palavra "interpretação" refere-se à conversão de alguns ou todos os dados numéricos, como distâncias, ângulos, temperaturas, concentrações, etc. Estas são quantidades mensuráveis cujas magnitudes podem ser expressa numericamente. Uma máquina numericamente controlada (mais conhecida como Máquinas CN/CNC – comando numérico por computador) recebe as informações em forma digital.

Um dos principais benefícios oferecidos por todas as formas de máquinas ferramentas CNC é sem dúvida a automatização do processo de manufatura. A intervenção do operador relacionada à produção da peça é drasticamente reduzida ou até eliminada. Muitas máquinas CNC podem operar sem nenhum acompanhamento humano durante um ciclo de usinagem completo, permitindo ao operador tempo livre para desempenhar outras tarefas. Isto permite ao usuário da máquina diversos benefícios que incluem a redução da fadiga do operador, menos enganos causados por erro humano, usinagem consistente e em tempo previsível para cada produto.

Considerando que a máquina estará operando sob controle de um programa, o nível de habilidade requerido do operador de CNC (relacionado a prática de usinagem é básico) também é reduzido quando comparado a um operador de máquinas ferramentas convencionais.

Porém, atividades como montagem e referência da peça a ser usinada na máquina operatriz ainda são feitas pelo operador, o que consome boa parte do tempo total de usinagem.

2.2 ELETROMAGNETISMO

2.2.1 CAMPO MAGNÉTICO

Os ímãs têm como principal característica a geração de um campo magnético, definido pelo fluxo magnético (Φ) e pela densidade de fluxo magnético (B) (Rizzoni, 1993), em todos os pontos de sua vizinhança. Tipos mais comuns de ímã são os ímãs permanentes e os eletroímãs. Os eletroímãs são constituídos basicamente por uma bobina enrolada em um núcleo de material ferromagnético, sendo a intensidade do campo magnético (H) determinado pela corrente da bobina. O campo magnético que circunda os ímãs é gerado pelo movimento de cargas elétricas. Nos ímãs permanentes, essas cargas elétricas em movimento são os elétrons que giram sobre si mesmos e circulam nos átomos de ferro que constituem o ímã. Nos eletroímãs, elas são os elétrons que derivam, ou corrente elétrica, através das bobinas que circundam estes ímãs (Halliday e Resnick, 1994).

2.2.2 FERROMAGNETISMO

Verifica-se que o ferro e diversos outros elementos (como o cobalto, o níquel, o gadolínio e o disprósio), bem como muitas ligas destes e outros elementos, apresentam uma interação especial, denominada *acoplamento de troca* (Halliday e Resnick, 1994), que permite o alinhamento, quando imersos num campo magnético, dos dipolos atômicos em rigoroso paralelismo, apesar da perturbação devida ao movimento térmico dos átomos. Este fenômeno, chamado ferromagnetismo, é um efeito puramente quântico e não pode ser explicado em termos da física clássica.

O ferromagnetismo é, evidentemente, uma propriedade não apenas de um átomo ou íon individual, mas também uma consequência da interação de cada átomo ou íon com seus vizinhos na rede cristalina do sólido. A rede cristalina dos materiais é formada por inúmeros cristais que possuem grãos constituídos por átomos com suas orientações de campo magnético. Para a maioria dos materiais, esse campo gerado pelos seus átomos é muito fraco, pois cada campo magnético gerado por cada átomo anula o do outro (materiais paramagnéticos e diamagnéticos), resultando num campo magnético insignificante. Os materiais ferromagnéticos possuem os átomos dos grãos orientados no mesmo sentido, porém os campos resultantes de seus diversos grãos com suas diversas orientações se anulam, sendo que por isso, uma peça de ferro não atrai outra. Mas quando um material ferromagnético é imerso num campo magnético forte o suficiente para orientar seus átomos, este material passa a possuir propriedades magnéticas (Bozorth R. M, 1993), como a de um ímã, aumentando a intensidade do campo magnético resultante.

2.3 FRESAMENTO

O fresamento é caracterizado por utilizar ferramenta de corte provida de arestas cortantes dispostas em torno de um eixo, pelo movimento de corte proporcionado pela rotação da fresa ao redor de seu eixo e pelo movimento de avanço realizado pela própria peça (Diniz, 1999).

Com um processo de fabricação por vezes lento, o fresamento (exemplo, figura 2.1) apresenta como vantagem principal a versatilidade. Este processo pode gerar superfícies não planas e de não revolução, ao contrário de alguns outros processos de usinagem (por exemplo, o torneamento gera apenas superfícies de revolução).

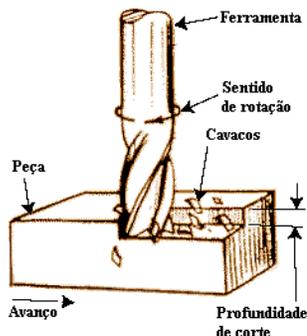


Figura 2.1 – Fresamento de topo (Fonte: Efunda - Engineering Fundamentals)

3. FIXAÇÃO DA PEÇA EM FRESAMENTO

Para se fabricar uma peça por fresamento, se faz necessário o uso de um dispositivo que fixe o componente sobre a mesa de corte de modo que permita uma fixação rígida e não impeça a máquina de realizar as operações de corte. Também é preciso que seja feito o setup da máquina CNC, para que o sistema possua um ponto zero (ponto de referência da máquina na peça). O tempo passivo gasto com a fixação e setup da peça é considerável, ocasionando um maior custo de fabricação e também, diminuindo a produção.

Dentre os diversos sistemas existentes de fixação de peças nas mesas de corte, os mais usados são as morsas e os grampos de fixação. Abaixo é ilustrada (figura 3.1) uma morsa para mesas de usinagem. Essas morsas são usualmente usadas na fixação de peças retangulares.

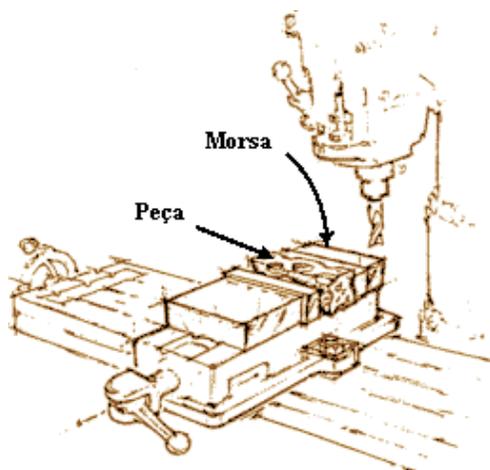


Figura 3.1 – Morsa para fixação de peças (Fonte: Efunda – Engineering Fundamentals)

Para peças de maiores dimensões, e uma maior flexibilidade em sua fixação, podem ser utilizados grampos de fixação rápida (figura 3.2). O perfil em T das bases se encaixa na correspondente ranhura da mesa de corte. Os blocos graduados são presos juntos e, com isso, é possível ajustar a altura de fixação que depende de qual degrau é usado.

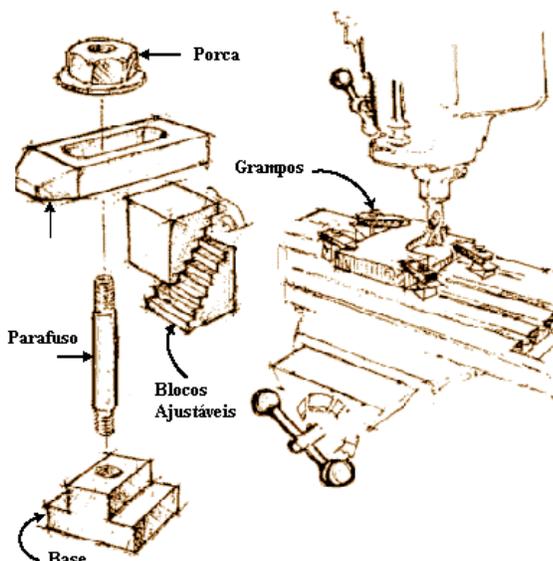


Figura 3.2 – Grampo de fixação (Fonte: Efunda – Engineering Fundamentals)

Existem também outros grupos (figura 3.3), como os grampos verticais, grampos horizontais, grampos torpedo, grampos tipo alicate e grampos pneumáticos, sendo que este último é amplamente utilizado em produção seriada (destaca-se a indústria automobilística), tendo como principal diferencial a ação automática através de cilindros pneumáticos, ao invés do acionamento manual do cabo.



Figura 3.3 – Grampos de fixação rápida (Fonte: Beruf)

Outro sistema pouco usado na indústria é a mesa magnética. Essa mesa utiliza os mesmos mecanismos de fixação desenvolvidos neste trabalho, porém não possui as batentes que oferecem uma rápida referência da máquina e ferramenta.

Mesmo já existindo inúmeros equipamentos de fixação, todos eles necessitam de tempo para manuseio e referenciamento de máquina. A escolha de se construir uma mesa magnética se dá pela facilidade de se usar um sistema liga-desliga. A fixação ocorre quando o campo for ativado, gerando uma força atrativa entre a mesa e o componente. O setup da máquina é eliminado pelo uso de batentes no canto da mesa. Com isso, é possível diminuir o tempo passivo gasto na fabricação de peças em centros de usinagem. Com a produção dessa mesa, todo o processo de fixação e referência será mais prático e eficiente.

4. REQUISITOS DE PROJETO

O projeto do suporte envolve diversos fatores, dentre os quais a distribuição do campo magnético, a corrente elétrica na bobina (fonte de corrente disponível na máquina CNC do

laboratório de 1,0 A), a determinação dos esforços gerados pelo fresamento, a avaliação do coeficiente de atrito entre a mesa e a peça a ser usinada, as propriedades magnéticas e mecânicas dos materiais utilizados, as formas construtivas do projeto e de seu isolamento elétrico contra os fluídos de corte usados no fresamento. A determinação dos esforços ao longo do processo é feita em condições severas de corte, para um melhor dimensionamento da mesa.

4.1 FRESAMENTO

Uma das principais funções da mesa é a fixação da peça enquanto está sendo fresada. Os esforços gerados pelo fresamento são determinados pela potência de corte, ação dinâmica da fresa, pela geometria da ferramenta de corte, pelo número de arestas e pelo tipo de lubrificação.

A ferramenta de corte usada no cálculo dos esforços é uma fresa de aço rápido com diâmetro de 10,00 mm e 4 arestas, sendo esta muito comum na usinagem de aço comum ao carbono. Outras considerações também são tomadas, como profundidade de corte (a_p) de 2,00 mm, avanço por dente (f_z) de 0,10 mm e velocidade de corte (V_c) de 100,00 m/min.

4.2 MATERIAIS E DIMENSÕES DOS COMPONENTES

A força de atração entre o componente e a mesa depende muito da área de contato entre eles e de seus materiais. No cálculo da força de atração (F_m) para o projeto da bobina elétrica, a peça a ser fresada é de aço ABNT 1045 com dimensões máximas de 100 x 200 mm (área de contato de 20.000 mm²). O material da superfície de contato da mesa e do núcleo das bobinas também será de aço 1045. A permeabilidade magnética média do aço 1045 (μ_A) é 1000 weber/A.m e a permeabilidade magnética média do latão (μ_L) é de aproximadamente 1 weber/A.m (McCurrie, 1994).

4.3 COEFICIENTE DE ATRITO

O coeficiente de atrito (μ) é função dos materiais em contato, do acabamento, da pressão normal e da temperatura. Como a fixação do componente à mesa se dá através da força de atrito (F_a), conclui-se que quanto maior o coeficiente de atrito, menor precisa ser a intensidade do campo magnético. Porém, os processos de usinagem têm por característica serem extremamente precisos e de excelente acabamento, necessitando de uma mesa com ótima planicidade e com pouca rugosidade. Além disso, materiais com alto coeficiente de atrito apresentam menor contato efetivo, o que reduz a força de fixação magnética. Desse modo, é necessário o balanço da força de fixação considerando a área de contato efetiva e o coeficiente de atrito (equação 1).

$$F_a = F_m \times \mu, \rightarrow \text{se } \mu \text{ é pequeno, } F_m \text{ sobe, se } \mu \text{ é grande, } F_m \text{ é pequeno.} \quad (1)$$

Neste caso, pode ser usado como analogia a transmissão de calor em superfícies de contato, em que à medida que a rugosidade de um componente diminui, aumenta a área de contato efetiva entre esse componente e outra superfície, aumentando o coeficiente de transmissão de calor (figura 4.1).

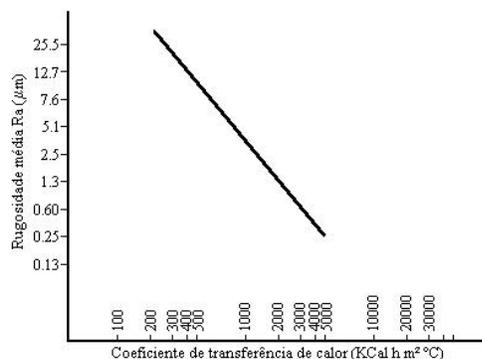


Figura 4.1 – Rugosidade média x coeficiente de transmissão de calor (Fonte: Incropera, 1988)

No caso do fresamento de peças de pequenas dimensões, como este é caracterizado pelo bom acabamento dos componentes produzidos, a opção é feita pela mesa retificada, com menor coeficiente de atrito, porém com maior área de contato efetiva e precisão. O coeficiente de atrito considerado será de 0,08.

4.4 DISTRIBUIÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

A distribuição do campo magnético gerado pelas bobinas que saem pela superfície de apoio da mesa pode ser considerada constante sobre toda a área de contato devido à pequena distância da bobina, das formas construtivas da bobina e de seu posicionamento. A força de atração entre a mesa e a peça se dá através da densidade de fluxo magnético que atravessa a área de contato entre a mesa e a peça.

5. PROJETO CONCEITUAL

5.1 SISTEMA DE FIXAÇÃO

A fixação da peça na mesa se dá através da força de atrito na superfície de contato e pela força magnética de atração entre a mesa e a peça, esta força, por sua vez, é produzida pela bobina fixada logo abaixo da superfície de apoio. O mecanismo descrito acima pode ser visualizado pela figura 5.1.

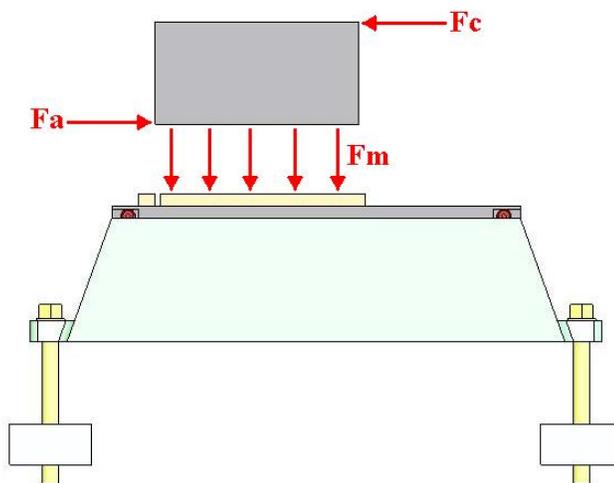


Figura 5.1 – Mecanismo de fixação da peça.

O somatório dos esforços (F_c) atuante provocam um deslocamento na peça que deve ser anulado pela força de atrito (F_a) entre a peça e a superfície de contato. A força de atrito é pequena se considerarmos como força normal (N) somente o seu peso, por isso é necessário um acréscimo considerável na força normal para que assim a primeira seja superior à força de corte.

Essa elevação da força normal é realizada através da força magnética (F_m) de atração gerada pela densidade de fluxo magnético (B) produzido pela bobina. Sua seção transversal é a de uma elipse visando uma melhor distribuição do campo magnético sobre a superfície de contato. O formato da bobina pode ser visto na figura 5.2.

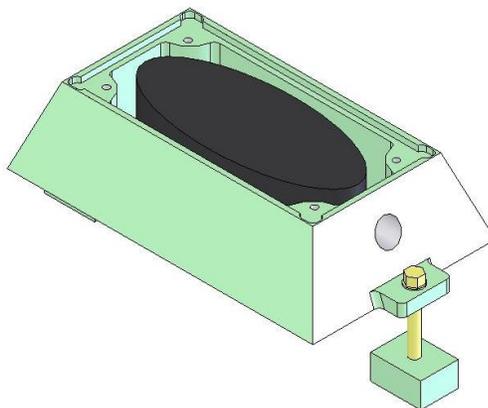


Figura 5.2 – Formato da bobina elétrica

5.2 SUPERFÍCIE DE CONTATO

A base superior da mesa que servirá como apoio da peça a ser fresada tem que possuir certas características para um correto funcionamento da fixação. Em primeiro lugar, o material que deve ser usado para a construção da base superior tem que possuir uma excelente permeabilidade magnética visando não haver perdas da energia magnética na base. Uma ótima escolha é utilizar o mesmo material usado na construção do núcleo das bobinas, devido a sua alta permeabilidade magnética. Entretanto, se a base de apoio for feita de uma única chapa, haverá uma grande perda do fluxo magnético pela carcaça da mesa, devido à baixa relutância nestes sentidos, diminuindo o fluxo magnético efetivo que é transmitido à peça. Essas perdas magnéticas pela carcaça podem ser vista na figura 5.3.

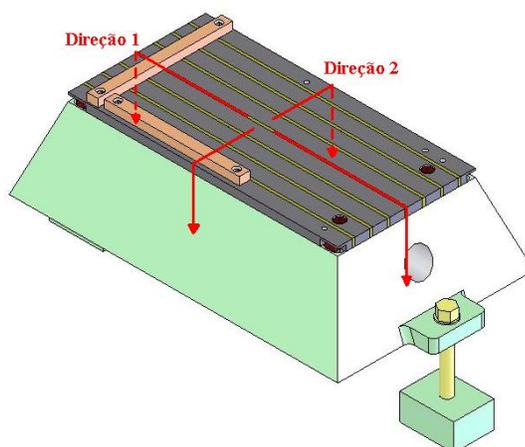


Figura 5.3 – Perdas magnéticas pela carcaça da mesa

A fim de se diminuir essa perda, é necessário que a base de apoio do componente seja construída de forma que somente ocorra transmissão do fluxo magnético em uma direção. Uma maneira eficiente de se resolver esse problema é construir a base de apoio com chapas grossas de um material com alta permeabilidade (mesmo material do núcleo), intercaladas com chapas finas de um material com baixa permeabilidade (Bozorth, 1993). A forma construtiva dessa base de apoio pode ser visualizada na figura 5.4.

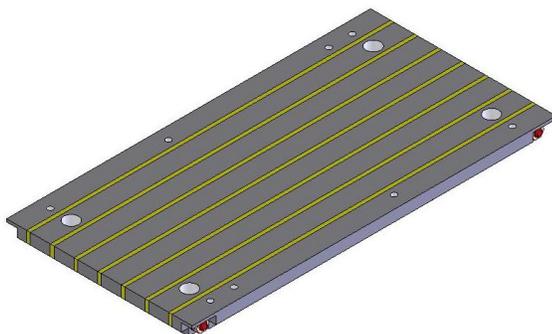


Figura 5.4 – Base de apoio construído com chapas intercaladas de diferentes materiais

5.3 CIRCUITO MAGNÉTICO EQUIVALENTE

O uso de circuitos magnéticos em analogia aos casos descritos podem ser extremamente úteis no seu entendimento. Entretanto, devem ser feitas algumas simplificações para o uso de circuitos magnéticos equivalentes, como a existência de um caminho médio para o fluxo magnético (análoga a corrente elétrica em circuitos elétricos) e que a densidade de fluxo magnético seja constante sobre a área transversal média da estrutura (Rizzoni, 1993). Para o dispositivo proposto neste trabalho, essas considerações são válidas. O circuito magnético equivalente (1) para o caso descrito na figura 5.3 é mostrado na figura 5.5.

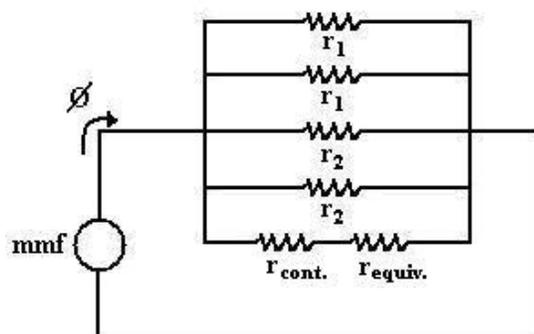


Figura 5.5 – Circuito magnético equivalente 1

Onde mmf é a força magnetomotriz (F) (análoga à tensão em circuitos elétricos) produzida pela bobina e r_1 , r_2 , $r_{cont.}$ e $r_{equiv.}$ são as relutâncias (análoga à resistência em circuitos elétricos) do sistema onde r_1 é a relutância na direção 1, r_2 é a relutância na direção 2, $r_{cont.}$ é a relutância de contato da mesa com a peça e $r_{equiv.}$ é a relutância equivalente de r_1 , r_1 , r_2 e r_2 respectivamente. Como a relutância de contato é muito maior que as relutâncias da carcaça ($r_{cont.} \gg r_{dir1} \cong r_{dir2}$), o fluxo magnético que passa para a peça é extremamente pequeno necessitando de uma grande força magnetomotriz produzida pela bobina. O circuito magnético equivalente (2) para o caso descrito na figura 5.4 é visualizado na figura 5.6.

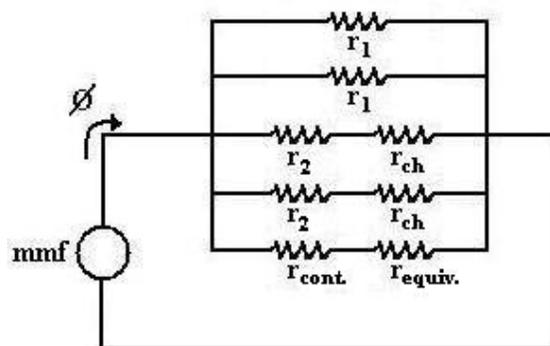


Figura 5.6 – Circuito magnético equivalente 2

Neste caso, o fluxo magnético transmitido à peça é muito maior que no caso anterior por causa do aumento das relutâncias (r_{ch}) na direção 2, devido à baixa permeabilidade magnética das chapas intercaladas. Com isso, as relutâncias totais ficam:

$$r_{dir2} \gg R_{contato} > r_{dir1}$$

5.4 FIXAÇÃO DA MESA NA MÁQUINA CNC

A fixação da mesa na máquina CNC é feita da maneira mais usual, através de parafusos presos nas em cada ponta inferior da mesa e com blocos presos nas pontas dos parafusos. A base de suporte da máquina CNC possui ranhuras com rasgos internos, que servem basicamente para a colocação desse sistema de parafusos e blocos. Com o aperto desses parafusos, os blocos são pressionados contra a superfície superior dos rasgos e assim fixando a mesa. A forma construtiva desse sistema pode ser visto na figura 5.7.

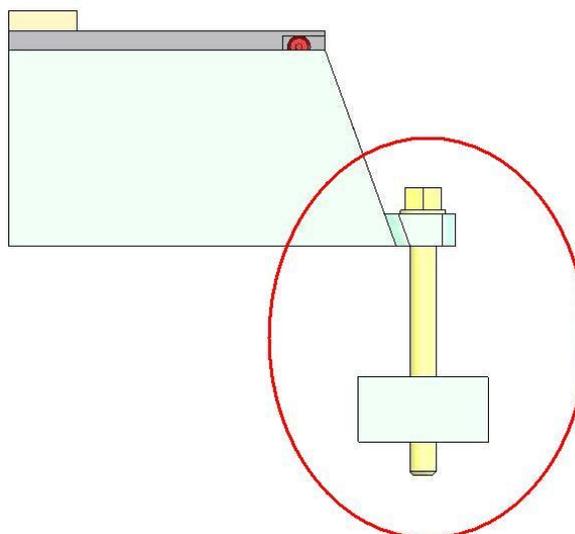


Figura 5.7 – Sistema de fixação da mesa na máquina CNC

5.4 VEDAÇÃO

Os processos de fresamento têm por característica produzirem uma enorme quantidade de calor na área de corte prejudicando assim a usinagem da peça. Para se resolver esse problema, são usados fluídos de corte que diminuem a temperatura na usinagem, melhoram o

acabamento superficial, diminuem os esforços gerados, evitam a formação da aresta postíça de corte e prolongam a vida útil da ferramenta de corte. O uso de fluídos de corte sobre a mesa torna necessário a vedação completa da mesa contra a entrada do fluído para evitar curtos circuitos. Essa vedação é feita através de uma carcaça inteiriça em que só a tampa, base de apoio da peça, sendo removível, e um furo na lateral da carcaça, para a passagem da fiação, possuem sistemas de vedação. A vedação na tampa é realizada com um encaixe em forma de degrau para ajustar a altura da vedação e com uma membrana de resina. Esse sistema pode ser visto na figura 5.8.

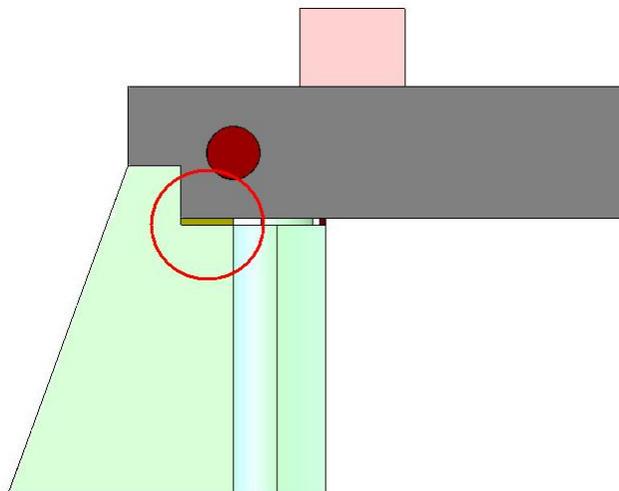


Figura 5.8 – Sistema de vedação por com resina.

A vedação no furo é feita com uma bucha de pressão e com um sistema de rosca com fita vedante. Os cabos são passados através dessa rosca e são completamente vedados.

5.5 APOIOS DE REFERÊNCIA

A fim de facilitar a referência, foram especificados na superfície de apoio da peça na mesa dois pequenos batentes retificados (Figura 5.9) que servem para a referência da mesa. O processo de setup da máquina é eliminado com essa referência fixa acelerando o processo de produção, pois a peça poderá ser posicionada sempre no mesmo lugar.

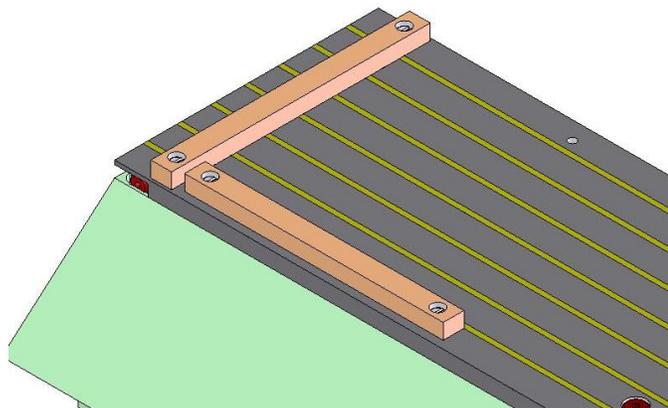


Figura 5.9 – Batente de referência na superfície de apoio da peça.

6. ANÁLISES E RESULTADOS

6.1 PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE MÉDIA

A pressão específica de corte média (K_{sm}) é uma constante que depende unicamente do tipo de material que vai ser fresado. As propriedades do aço carbono ($C = 0,25$ a $0,55\%$) K_{s1} e z são 1600 e 0,25 respectivamente. (Diniz et. at., 1999). A espessura de cavaco média (h_m), mm, e a pressão específica de corte, em N/mm^2 , são dadas pelas equações (2) e (3) respectivamente:

$$h_m = \frac{1}{j_1 - j_2} \times fz \times \text{sen} C_r \times (\cos j_1 - \cos j_2) = 0,064 \quad (2)$$

$$K_{sm} = \frac{K_{s1}}{h_m^z} = 3181 \quad (3)$$

6.2 FORÇA DE CORTE

A potência de corte (P_c), em W, no fresamento de topo é definida através de parâmetros que são a profundidade de corte (ap), em mm, a penetração de trabalho (ae), em mm, a velocidade de avanço (vf), em mm/min, e a pressão específica de corte. A potência de corte é dada pela equação de Kienzle (4) (Diniz et. at., 1999):

$$P_c = \frac{K_{sm} \times ae \times ap \times Vf}{60 \times 10^3} \quad (4)$$

Sendo que a velocidade de avanço é dada pela expressão (5):

$$Vf = f \times n = \frac{1000 \times f \times Vc}{p \times D} \quad (5)$$

e que a penetração de trabalho é igual ao diâmetro da fresa ($ae = D$), verificamos que a força de corte (F_c), em N, é dada expressão (6):

$$F_c = \frac{K_{sm} \times ap \times f}{p} = 810 \quad (6)$$

6.3 DETERMINAÇÃO DA INDUÇÃO MAGNÉTICA

O campo magnético gerado pela bobina tem que ser de tal tamanho que segure a peça no seu lugar, sem nenhum deslocamento. Para isso, é necessária que a força de atrito seja superior a força de corte. Com um coeficiente de segurança (C_s) igual a 4, devido a alta complexidade no modelamento do problema, uma boa margem de segurança é aplicada. Assim, a relação entre a força de atrito e a força de corte com o coeficiente de segurança, em N, é calculada pela expressão (7):

$$F_a = F_c \times C_s \quad (7)$$

A força de atrito é calculada também através da equação (8), que utiliza o coeficiente de atrito:

$$F_a = m \times N \quad (8)$$

Sendo que a força normal (N) é a força de atração devido ao campo magnético. Essa força é dada pela expressão (9):

$$F_m = \frac{1}{2} \times \frac{B^2}{m_0 \times A} \quad (9)$$

Portanto, a indução magnética na superfície de contato (B), em weber/m², é determinada pela equação (10):

$$B = \sqrt{\frac{F_c \times C_s}{m} \times 2 \times (m_0 \times A)} = 45,1 \times 10^{-3} \quad (10)$$

6.4 DETERMINAÇÃO DAS RELUTÂNCIAS MAGNÉTICAS

A determinação das relutâncias do circuito magnético equivalente mostrado na seção 5.3 é fundamental para a determinação da força magnetomotriz, que por sua vez, determinaram o dimensionamento da bobina. Para o cálculo das relutâncias, é necessário que seja conhecida toda a estrutura da mesa magnética para poder deduzir as áreas por onde são transmitidos os fluxos magnéticos e os seus caminhos médios. Os caminhos médios e as áreas transversais médias ao fluxo podem ser aproximados através de cálculos geométricos do detalhamento da estrutura da mesa (Anexo). A relutância, em A.t/weber, na direção um, na direção dois e no contato da mesa com a peça podem ser calculadas pelas expressões (11), (12) e (13) respectivamente, que consideram todas as relutâncias do circuito:

$$r_{dir1} = \frac{l_{aço \rightarrow tampa}}{m_A \times m_0 \times A_t} + \frac{l_{aço \rightarrow altura}}{m_A \times m_0 \times A_t} + \frac{l_{aço \rightarrow base}}{m_A \times m_0 \times A_t} + \frac{l_{núcleo}}{m_A \times m_0 \times A_t} = 222.465,9 \quad (11)$$

$$r_{dir2} = \frac{l_{latão}}{m_L \times m_0 \times A_t} + \frac{l_{aço \rightarrow tampa}}{m_A \times m_0 \times A_t} + r_{aço \rightarrow altura} + r_{aço \rightarrow base} + r_{núcleo} = 2.558.552,2 \quad (12)$$

$$R = \frac{d}{m_0 \times A_g} + r_{equiv.} = 125.194,4 \quad (13)$$

A relutância magnética resultante é obtida através da lei de Kirchhoff's de corrente (Rizzoni, 1993) para obtenção da resistência equivalente em circuitos em paralelo. A relutância resultante é dada pela equação (14)

$$\frac{1}{\mathfrak{R}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{R} \Rightarrow \mathfrak{R} = 57.191,3 \quad (14)$$

6.5 DIMENSIONAMENTO DAS BOBINAS

O dimensionamento da bobina é feito através da determinação da força magnetomotriz solicitada pelo circuito magnético. A determinação dela é feita primeiramente se calculando o fluxo magnético (f_p), em weber, sobre a peça pela equação (15):

$$f_p = B \times A_p = 9,02 \times 10^{-4} \quad (15)$$

Após, deve ser determinado a força magnetomotriz, $A.t$, sobre a peça pela equação (16):

$$Fm_p = f_p \times R = 51,58 \quad (16)$$

Pela teoria dos circuitos paralelos, todos componentes do circuito em paralelo possuem a mesma força magnetomotriz como é mostrada pela expressão (17):

$$Fm_p = F_1 = F_2 \quad (17)$$

Com esses dados, é possível calcular o fluxo magnético nas direções um e dois pela equação (18) e (19) respectivamente:

$$f_1 = \frac{F_1}{r_1} = 2,32 \times 10^{-4} \quad (18)$$

$$f_2 = \frac{F_2}{r_2} = 2,02 \times 10^{-5} \quad (19)$$

Assim, é determinado o fluxo magnético para fixar a peça, considerando as perdas pela estrutura, pela seguinte expressão (20).

$$f_t = f_1 + f_1 + f_2 + f_2 + f_p = 1,41 \times 10^{-3} \quad (20)$$

O cálculo do número de espiras das bobinas é deduzido pela da lei de ampère (Rizzoni, 1993) e dado pela equação (21):

$$N \times i = F_t = f_t \times \mathfrak{R} \Rightarrow N = 81 \quad (21)$$

7. CONCLUSÕES

Com a utilização da mesa magnética no processo de fresamento em máquinas CNC, o tempo de fixação e de setup podem ser reduzidos diminuindo o custo na produção de cada peça. O suporte gera um processo mais prático e eficiente, facilitando a fabricação em centros de usinagem. A utilização de um eletroímã resultou num sistema simples de liga-desliga, com uma imediata fixação e retirada da peça. O uso de batentes retificados na superfície superior da mesa terá uma grande influência na redução do tempo passivo no fresamento.

Além disso, as formas utilizadas mostram-se de fácil obtenção, viabilizando a fabricação do dispositivo em questão.

8. REFERÊNCIAS

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de física – eletromagnetismo**. 3. ed., Rio de Janeiro: LTC, 1994.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; KUSKO, A. **Máquinas elétricas**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1981.

RIZZONI, G. **Principles and applications of electrical engineering**. Boston: Editora Irwin, 1993.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos metais**. São Paulo: Artliber, 2000.

BOZORTH, R. M. **Ferromagnetism**. Nova York: IEEE Magnetics Society, 1993.

MCCURRIE, R. A. **Ferromagnetic materials – structure and properties**. Londres: Academic Press, 1994.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, P. D. **Fundamentos de transferência de Calor e de massa**. 4. Ed., Rio de Janeiro: LTC, 1988.

EFUNDA – Engineering Fundamentals – <http://www.efunda.com>

Beruf – <http://www.beruf.com.br>

9. BIBLIOGRÁFIA CONSULTADA

VLACK, V.; HALL, L. **Princípios de ciências dos materiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1920.

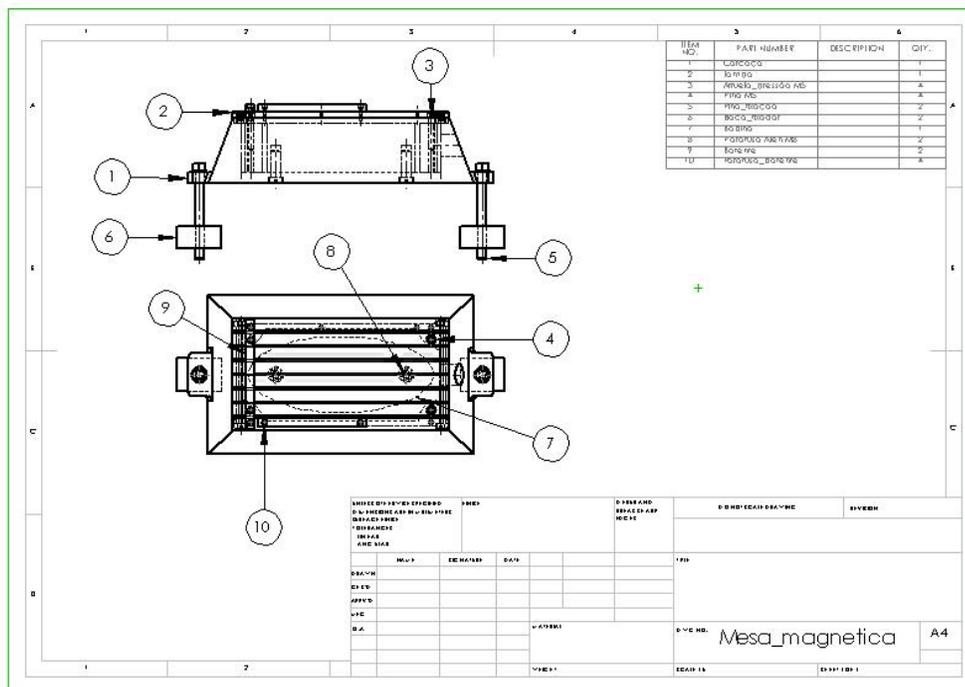
PRO-TEC **Projetista de máquinas**. 5. ed., São Paulo: PRO-TEC, 1976.

SANDVIK C. **Modern metal cutting – a practical handbook**. Suíça: Tofters Tryckeri AB, 1994.

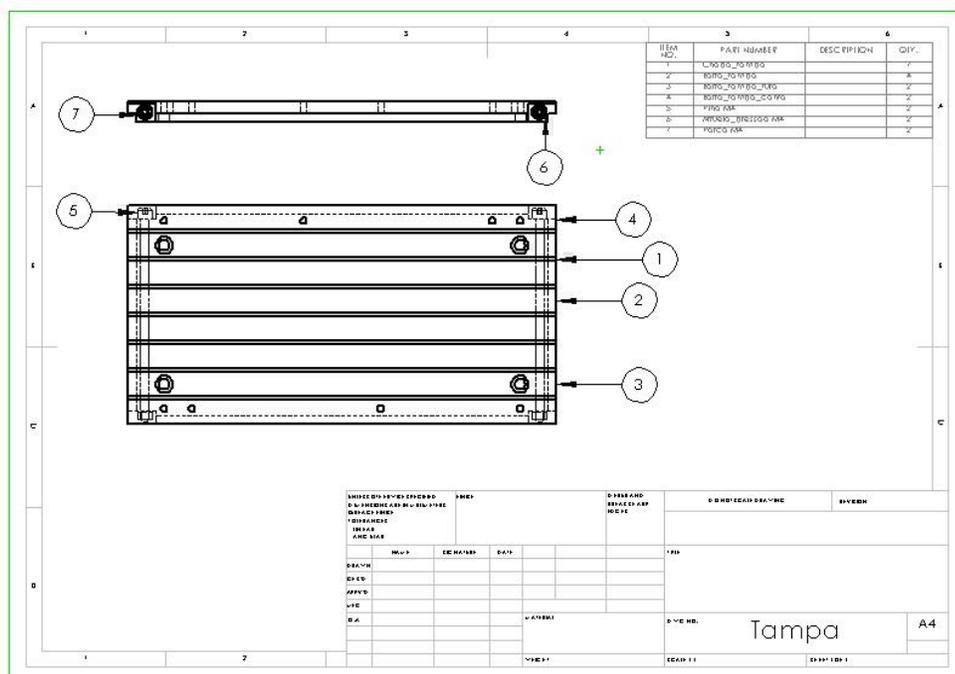
CHAPMAN, S. J. **Electric machinery fundamentals**. 3. ed., São Paulo: McGraw-Hill, 1999.

HAYT, W. H. **Eletromagnetismo**. São Paulo: McGraw-Hill, 1978.

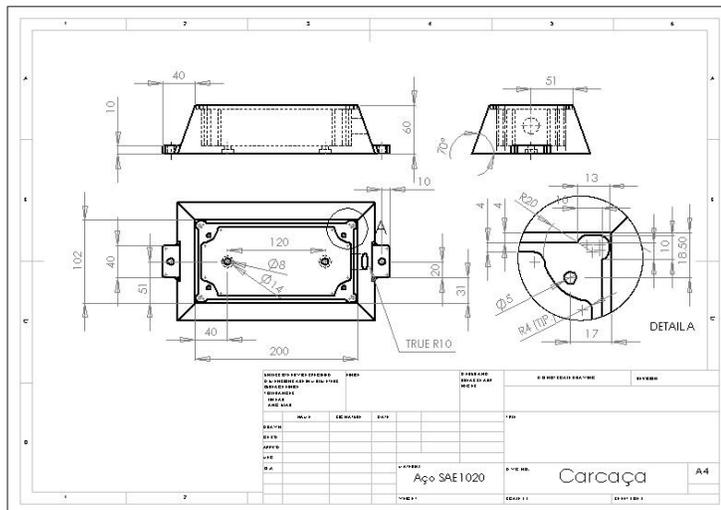
ANEXO



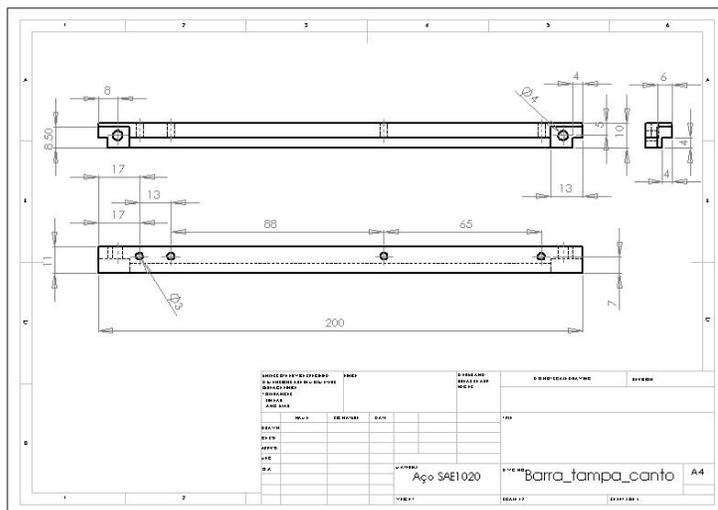
Anexo 1 - Montagem mesa magnética



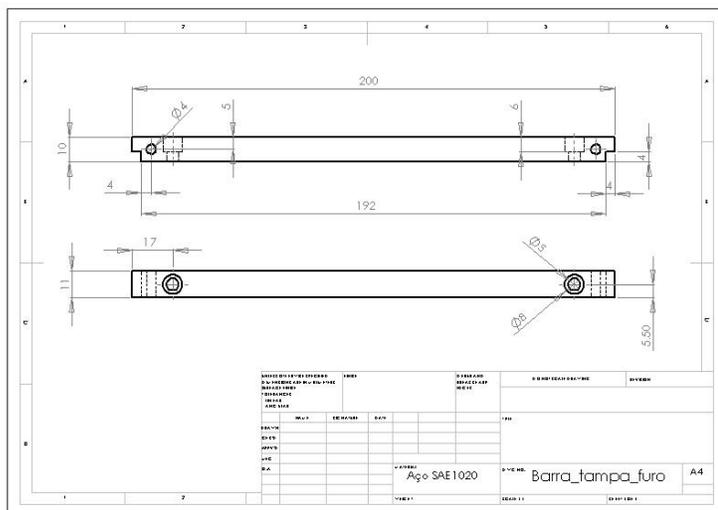
Anexo 2 – Montagem tampa



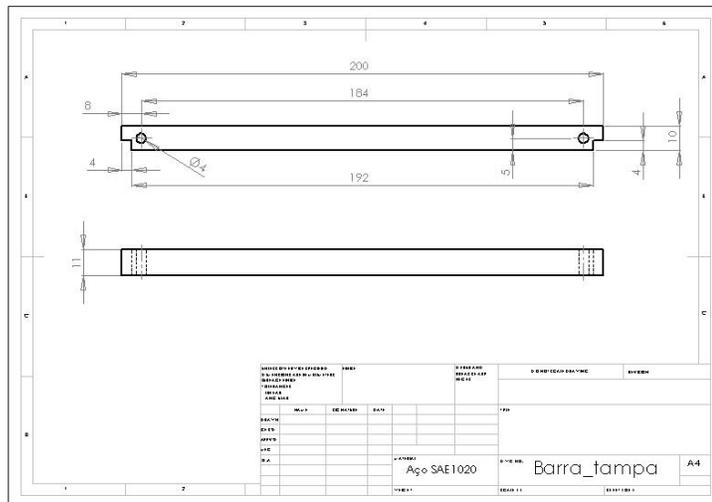
Anexo 3 – Detalhamento da carcaça



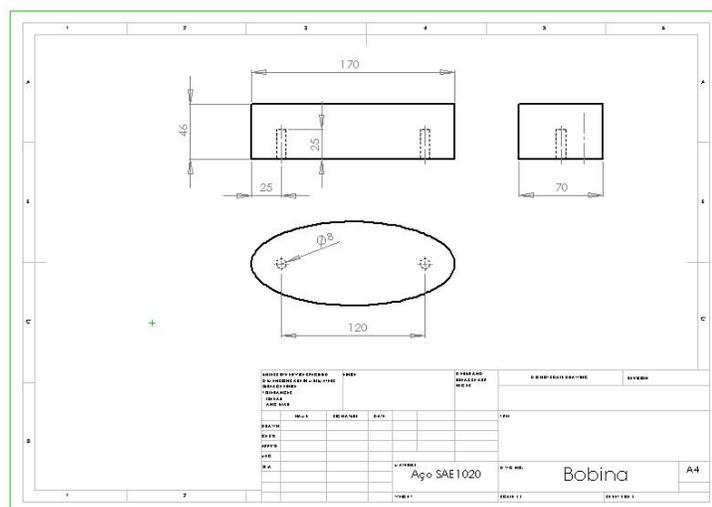
Anexo 4 – Detalhamento da barra_tampa_canto



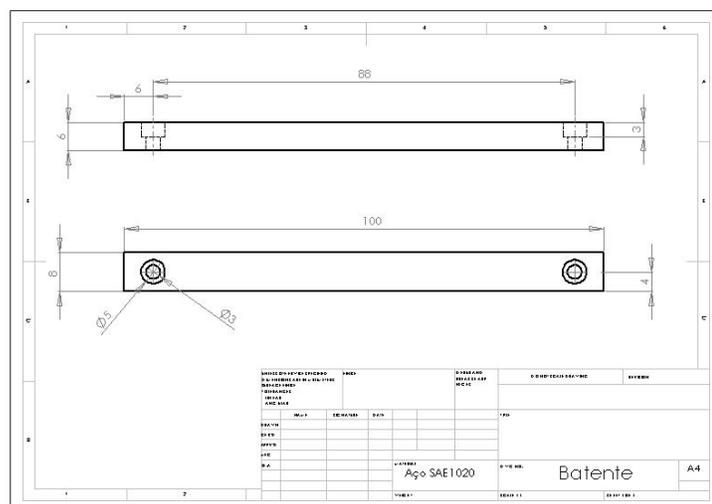
Anexo 5 – Detalhamento da barra_tampa_furo



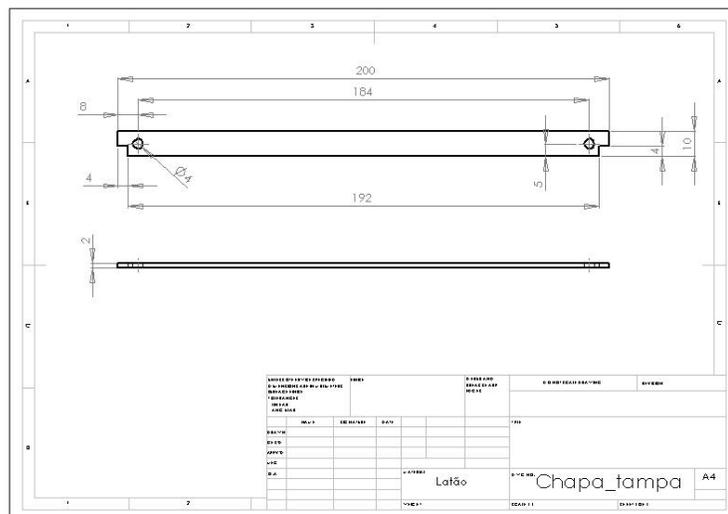
Anexo 6 – Detalhamento da barra_tampa



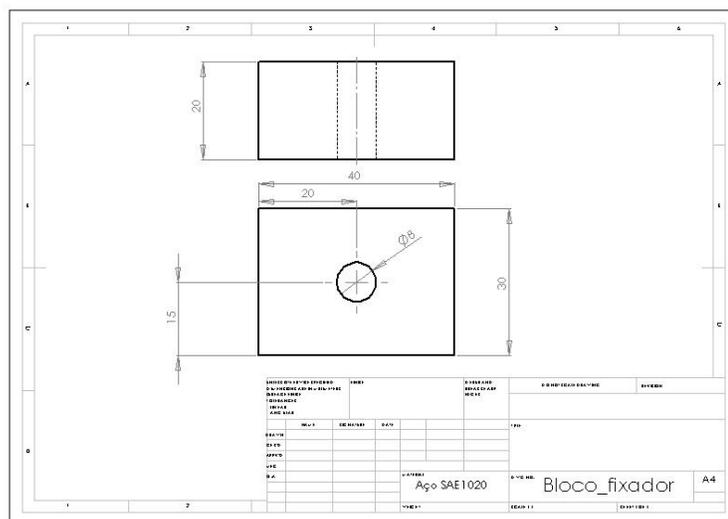
Anexo 7 – Detalhamento do núcleo da bobina



Anexo 8 – Detalhamento da batente



Anexo 9 – Detalhamento da chapa_tampa



Anexo 10 – Detalhamento do bloco_fixador