



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

André Filipe Leal Moreira

Máquina-Ferramenta CNC para Gravação
– Desenvolvimento de Protótipo de Baixo-Custo –

Máquina-Ferramenta CNC para Gravação
– Desenvolvimento de Protótipo de Baixo-Custo –

André Filipe Leal Moreira

UMinho | 2015

dezembro de 2015



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

André Filipe Leal Moreira

Máquina-Ferramenta CNC para Gravação
– Desenvolvimento de Protótipo de Baixo-Custo –

Dissertação de Mestrado
Engenharia Mecatrónica

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor António Alberto Caetano Monteiro

DECLARAÇÃO

Nome: André Filipe Leal Moreira

Endereço eletrónico: andremoreira_manlub@hotmail.com Telefone: 916977605

Número do Bilhete de Identidade: 14141164

Título dissertação /tese

Máquina-Ferramenta CNC para Gravação – Desenvolvimento de Protótipo de Baixo-Custo

Orientador (es):

Professor Doutor António Alberto Caetano Monteiro

Ano de conclusão: 2015

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Nos exemplares das teses de doutoramento ou de mestrado ou de outros trabalhos entregues para prestação de provas públicas nas universidades ou outros estabelecimentos de ensino, e dos quais é obrigatoriamente enviado um exemplar para depósito legal na Biblioteca Nacional e, pelo menos outro para a biblioteca da universidade respetiva, deve constar uma das seguintes declarações:

1. É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, / /

Assinatura: _____

“ Não basta conquistar a sabedoria, é preciso usá-la.”

Cícero

AGRADECIMENTOS

O presente projeto constitui o culminar de uma importante etapa na minha formação académica. Apesar do carácter individual inerente a este tipo de trabalhos, contei com o apoio, conhecimento e dedicação de diversas pessoas, sem as quais, não teria sido possível a realização do mesmo.

Chegados a este momento, é gratificante efetuar um exercício de memória para relembrar, todos os que colaboraram de forma direta ou indireta na sua consecução.

Em primeiro lugar, à Universidade do Minho, que proporcionou as condições necessárias para a realização deste projeto, onde adquiri vastos conhecimentos a nível profissional e experiências inolvidáveis.

Ao Professor Doutor António Alberto Caetano Monteiro, orientador desta dissertação, expresso todo o meu profundo reconhecimento, por todo o apoio, disponibilidade, rigor e exigência demonstrada ao longo da minha formação académica.

À empresa ManLub - Manutenção e Lubrificação Industrial, Lda, por desafiar à elaboração deste projeto e pelos meios disponibilizados no decorrer do mesmo, assim como todos os seus funcionários que me inculiram de práticas no ramo da metalomecânica.

A todos os familiares e amigos próximos que sempre me auxiliaram, expresso a minha maior gratidão pelo constante entusiasmo que generosamente me consagraram.

À minha namorada, Ana Sofia, pela compreensão de todo o tempo dedicado à elaboração deste projeto e à ajuda laboriosa que me deu no seu decorrer.

Ao meu irmão, Vitor Moreira, pelo companheirismo diário, disponibilidade, cooperação e palavras de incentivo que sempre me dirigiu, o meu profundo reconhecimento ao exemplo de pessoa que sempre segui.

Aos pais, António e Isaura, por todo o carinho e afeto que me prestaram, principalmente nos momentos mais difíceis da minha caminhada. Sem eles nada teria sido possível. Quer pela felicidade que me transmitem, quer pelo apoio diário em todas as dimensões, todo o meu profundo reconhecimento e agradecimento é pouco para expressar a minha consideração por vocês.

RESUMO

No panorama atual, as novas tecnologias aplicadas às máquinas ferramentas permitiram um desenvolvimento excepcional. As máquinas CNC, Controlo Numérico Computadorizado, do inglês “*computer numerical control*”, vieram revolucionar a indústria, permitindo maior velocidade, repetibilidade e precisão.

É pretendido nesta dissertação o desenvolvimento de uma máquina de comando numérico de pequenas dimensões. O projeto desenvolvido foi realizado numa empresa de Metalomecânica para realizar gravações em peças maquinadas em Máquinas-Ferramentas convencionais. Pretende-se ainda avaliar a sua capacidade de satisfazer as necessidades básicas em pequenas aplicações.

A dissertação está dividida em 3 frentes: projeto mecânico, projeto elétrico e projeto de controlo por software. A primeira frente visa a escolha do material e desenvolvimento da estrutura, assim como as especificações dos elementos de máquina. A parte elétrica consiste na escolha da fonte de energia, placa controladora, motores, sensores e motor de acionamento da ferramenta de corte. O controlo por software visa o estudo do *firmware* de controlo – GRBL para interpretar determinadas entradas para executar determinadas saídas como a velocidade e direção dos motores de passo.

Esta dissertação abrange diversos domínios científicos e pedagógicos numa pluralidade interdisciplinar, o que traduz a aprendizagem em Engenharia Mecatrónica.

Palavras-chaves: *Máquina-Ferramenta, Comando Numérico, Mecatrónica.*

ABSTRACT

In the current scenario, the new technologies applied to machine tools allowed an exception development. Computerized Numerical Control machines, have revolutionized the industry, allowing greater speed, repeatability and precision.

It is intended in this work the development of a small numeric control machine. The developed project was carried out in a Metalworking company to make recordings in machined parts in conventional machine tools. Another objective is to evaluate their ability to meet basic needs in small applications.

The dissertation is divide into three fronts: mechanical design, electrical project and software control. The first front aims to select the material and development of the structure, as well as the specifications of the machine elements. The electrical part consists in the selection of the energy source, controller board, motors, sensors and cutting tool motor. The control by software aims to the study of control firmware – GRBL to interpret certain entries to execute certain outputs such as the speed and directions of stepper motors.

This dissertation covers various scientific and educational fields in an interdisciplinary plurality, reflecting the learnings in Mechatronics Engineering.

Key words: Machine-Tool, Numeric Control, Mechatronics.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 INTRODUÇÃO	18
1.2 PROPÓSITO DA DISSERTAÇÃO	20
1.3 EVOLUÇÃO HISTÓRICA	21
1.4 IMPACTO ECONÓMICO A NÍVEL MUNDIAL DAS MÁQUINAS-FERRAMENTAS.....	22
1.5 VERTENTE PEDAGÓGICA DA MÁQUINA-FERRAMENTA CNC	24
2. CONCEITOS TEÓRICOS	26
2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS VÁRIAS ÁREAS DE UMA MÁQUINA-FERRAMENTA CNC.....	26
2.2 CONSTITUINTES MECÂNICOS	27
2.2.1 <i>Estrutura</i>	27
2.2.1.1 Consideração Estática	30
2.2.1.2 Consideração Dinâmica	31
2.2.2 <i>Guias Lineares</i>	31
2.2.3 <i>Sistemas Conversores de Movimento</i>	33
2.2.4 <i>Acoplamentos</i>	34
2.2.5 <i>Ferramentas e materiais constituintes</i>	35
2.3 CONSTITUINTES ELETRÓNICOS	37
2.3.1 <i>Motores</i>	37
2.3.1.1 Motores Passo a Passo	37
2.3.1.2 Servomotores.....	44
2.3.1.3 Motores PaP versus Servomotores	45
2.3.2 <i>Controladores</i>	46
2.3.2.1 Controladores dos motores.....	46
2.3.2.2 Controladores de programação	48
2.3.3 <i>Sensores</i>	50
2.3.4 <i>Árvore principal</i>	51
2.4 CAD-CAM	54
2.5 CONTROLO	57
3. PARTE PRÁTICA	58

3.1	ELETRÓNICA E HARDWARE	59
3.1.1	<i>Controlador geral</i>	59
3.1.2	<i>Firmware de controlo</i>	59
3.1.3	<i>Motores PaP</i>	61
3.1.4	<i>Drivers dos motores PaP</i>	65
3.1.5	<i>Transformador</i>	67
3.1.6	<i>Sensores</i>	68
3.1.7	<i>Motor da árvore principal</i>	69
3.1.8	<i>Esquema da ligação elétrica</i>	71
3.2	SOFTWARE DE CONTROLO	72
3.2.1	<i>Software de comunicação</i>	72
3.2.2	<i>Software CAD/CAM</i>	74
3.3	PARTE MECÂNICA	75
3.3.1	<i>Estrutura</i>	75
3.3.2	<i>Fusos</i>	76
3.3.3	<i>Acoplamento</i>	77
3.3.4	<i>Guias Lineares</i>	77
3.3.5	<i>Fixação do motor PaP</i>	78
3.3.6	<i>Fixação do motor da árvore</i>	79
3.3.7	<i>Análise de tensões de mesa de trabalho</i>	81
3.3.8	<i>Montagem</i>	89
3.4	TESTES PRÁTICOS	94
4.	TRABALHO FUTURO	97
5.	CONCLUSÕES	98
6.	BIBLIOGRAFIA	99
7.	ANEXOS	101

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- RELAÇÃO DAS DIFERENTES ÁREAS COM AS MÁQUINAS-FERRAMENTAS CNC	26
FIGURA 2- CONSTITUINTES MECÂNICOS.....	27
FIGURA 3- FLUXO DE CARGA NUMA MANDRILADORA	30
FIGURA 4- JUNTA HOMOCINÉTICA	34
FIGURA 5- ACOPLAMENTO PERMANENTE FLEXÍVEL	34
FIGURA 6- JUNTA COM TRANSMISSÃO POR CABO	34
FIGURA 7- CONSTITUINTES ELETRÔNICOS.....	37
FIGURA 8- CORTE TRANSVERSAL DE UM MOTOR DE PASSO DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL	38
FIGURA 9- CORTE TRANSVERSAL DE UM ROTOR DE UM ROTOR DE UM MOTOR DE ÍMAN PERMANENTE	39
FIGURA 10- CORTE TRANSVERSAL DE UM ROTOR DE UM MOTOR DE PASSO HÍBRIDO	39
FIGURA 11 - MODELO DO MOTOR DE PASSO UNIPOLAR	40
FIGURA 12 - DIFERENTES TIPOS DE MOTORES COM CONFIGURAÇÃO UNIPOLAR	41
FIGURA 13 - SEQUÊNCIA DE FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR DE PASSO COM ALIMENTAÇÃO UNIPOLAR	41
FIGURA 14 - MECANISMO DE FUNCIONAMENTO	42
FIGURA 15 - MODELO DE MOTOR DE PASSO BIPOLAR	42
FIGURA 16 - MECANISMO DE PROTEÇÃO	43
FIGURA 17 - SEQUÊNCIA DE FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR DE PASSO COM ALIMENTAÇÃO BIPOLAR.....	43
FIGURA 18 - UNIPOLAR COMO BIPOLAR	44
FIGURA 19 - PRINCÍPIO DE ENCODER INCREMENTAL ROTATIVO E ENCODER INCREMENTAL LINEAR	45
FIGURA 20 - ESQUEMA DE UM ENCODER ABSOLUTO	45
FIGURA 21 - <i>EASYDRIVER</i>	47
FIGURA 22 - <i>MICROSTEP DRIVER</i>	47
FIGURA 23 - PLACAS COM MICROCONTROLADOR DE PROGRAMAÇÃO.....	49
FIGURA 24 - EXEMPLO DE SENSOR MECÂNICO.	50
FIGURA 25 - ILUSTRAÇÃO DE DUAS ÁRVORES TÍPICAS EM MÁQUINAS-FERRAMENTAS.....	51
FIGURA 26 - ILUSTRAÇÃO DE APARA.....	51
FIGURA 27 - AUTODESK INVENTOR E SOLIDWORKS.....	54
FIGURA 28 - CONTROLADOR GERAL ARDUÍNO UNO E BOARD CNC 5 EIXOS.....	59
FIGURA 29 - ARDUÍNO UNO.....	60
FIGURA 30 - ESQUEMA DE INTEGRAÇÃO ENTRE MOTOR, FUSO E CARGA	61
FIGURA 31 - CARACTERÍSTICAS E ESPECIFICAÇÕES GERAIS DO MOTOR PAP.....	64
FIGURA 32 - STEPPER DRIVER CW5045 V2.	65
FIGURA 33 - CONFIGURAÇÃO DOS INTERRUPTORES.....	66
FIGURA 34 - TRANSFORMADOR 230V/36V.....	67

FIGURA 35 - SENSOR F04660 OPTICAL ENDSTOP.	68
FIGURA 36 - SENSOR ÓTICO INTERROMPIDO E ABERTO.....	68
FIGURA 37 - MINI FURADORA DA ÁRVORE PRINCIPAL.....	69
FIGURA 38 - MOTOR KRESS 1050 FME.....	70
FIGURA 39 - ESQUEMA DA LIGAÇÃO ELÉTRICA.	71
FIGURA 40 - CONEXÃO RÁPIDA DOS MOTORES PAP.	71
FIGURA 41 - SOFTWARE UNIVERSAL GCODESENDER.....	72
FIGURA 42 - SOFTWARE UNIVERSAL GCODESENDER CONFIGURAÇÃO.	73
FIGURA 43 - JANELAS DAS VARIÁVEIS DO INVENTOR.	74
FIGURA 44 - MODELO INICIAL DA CNC.....	75
FIGURA 45 - CONJUNTO FUSO + PORCA DE ESFERAS SFU1605-3.....	76
FIGURA 46 - MODELO DO FUSO MAQUINADO.	76
FIGURA 47 - MODELO DO 1º ACOPLAMENTO.	77
FIGURA 48 - ACOPLAMENTO FLEXÍVEL.	77
FIGURA 49 - MODELO DA GUIA LINEAR.	78
FIGURA 50 - MODELO DA FIXAÇÃO DO MOTOR DE PASSO.	78
FIGURA 51 - PRIMEIRO SUPORTE PARA FIXAÇÃO DO MOTOR DA ÁRVORE.	79
FIGURA 52 - SEGUNDO SUPORTE PARA FIXAÇÃO DO MOTOR DA ÁRVORE.	80
FIGURA 53 - GRAVAÇÃO EM PEÇA DE NYLON.	81
FIGURA 54 - VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESFASAMENTO EM Z.	81
FIGURA 55 - DIMENSÕES E MASSA DA PRENSA.	83
FIGURA 56 - RESULTADO DA SIMULAÇÃO SOBRE A FLEXÃO NO TAMPO DE ALUMÍNIO.....	83
FIGURA 57 - BASE INICIAL ALTERADA.	84
FIGURA 58 - RESULTADO DA SIMULAÇÃO SOBRE A FLEXÃO NO TAMPO DE ALUMÍNIO ALTERADO.	85
FIGURA 59 - CONJUNTO DE PERFIS BOSCH.....	86
FIGURA 60 - DIFERENÇA DO PERFIL REAL DO PERFIL SIMULADO.	86
FIGURA 61 - RESULTADO DA SIMULAÇÃO SOBRE A FLEXÃO NO PERFIL BOSCH.	87
FIGURA 62 - TESTE PRÁTICO DO DESFASAMENTO COM A NOVA BASE DA MÁQUINA.....	87
FIGURA 63 - MONTAGEM DA BASE DA MÁQUINA.....	89
FIGURA 64 - MONTAGEM DOS MOTORES DE PASSO NO EIXO Y.	90
FIGURA 65 - MONTAGEM DAS PLACAS LATERAIS.....	90
FIGURA 66 - MONTAGEM DA PLACA PRINCIPAL DO EIXO Z.	91
FIGURA 67 - MONTAGEM DO CONJUNTO DO EIXO Z.....	91
FIGURA 68 - MAQUINAÇÃO DAS PEÇAS PARA UNIÃO DE PERFIL BOSCH.	92
FIGURA 69 - MONTAGEM FINAL DA MÁQUINA.	93
FIGURA 70 - MONTAGEM DO TAMPO DA MÁQUINA.....	93
FIGURA 71 - EXEMPLOS DE PEÇAS GRAVADAS NA MÁQUINA DESENVOLVIDA.....	94
FIGURA 72 GRAVAÇÃO EM AÇO K110.....	95

FIGURA 73 - MAQUINAÇÃO EM ALUMÍNIO.	95
FIGURA 74 - MAQUINAÇÃO DO TAMPO DE BICICLETA.	96

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - CONSUMO / PRODUÇÃO MUNDIAL DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS (1975-2015)	22
GRÁFICO 2 - CONSUMO DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS - TOP 5 DE PAÍSES	23
GRÁFICO 3 - CONSUMO DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS – 21 A 25	24
GRÁFICO 4 - RESULTADOS DO DESFASAMENTO EM Z.	82
GRÁFICO 5 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PRÁTICA COM A SIMULAÇÃO DA BASE INICIAL.	84
GRÁFICO 6 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PRÁTICA COM A SIMULAÇÃO DA BASE INICIAL E A SIMULAÇÃO DA BASE INICIAL ALTERADA.....	85
GRÁFICO 7 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS TRÊS SIMULAÇÕES.	88

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ARRANJOS GEOMÉTRICOS DA ESTRUTURA DA MÁQUINA	28
TABELA 3- ARRANJOS ESPECÍFICOS DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS	29
TABELA 2 - ARRANJOS ESPECÍFICOS DE FRESADORAS	29
TABELA 4- PRINCIPAIS GUIAS DE ELEMENTOS ROLANTES INTERNOS E EXTERNO	32
TABELA 5- CLASSIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS DE CONVERSÃO DE MOVIMENTO	33
TABELA 6- CLASSIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS DE ACOPLAMENTO	35
TABELA 7- PROPRIEDADES DOS MATERIAIS PARA FERRAMENTAS	36
TABELA 8-TABELA DO COEFICIENTE DE FORÇA ESPECÍFICA.	52
TABELA 9 - LISTA DE SOFTWARES PARA CAD/CAM E CONTROLO DE MÁQUINAS CNC.	55
TABELA 10 - ESPECIFICAÇÕES DOS MOTORES PAP.....	62
TABELA 11 - CONFIGURAÇÃO DO DRIVER.	66

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Cálculo da Secção da apara	52
Equação 2 – Cálculo da Força de Corte	52
Equação 3 – Cálculo da Potência de Corte	53
Equação 4 – Cálculo do binário necessário ao Motor	61
Equação 5 – Cálculo aproximado da inércia do fuso	62
Equação 6 – Cálculo da Inércia referente à carga	63
Equação 7 – Cálculo da aceleração para o perfil trapezoidal	64

LISTA DE ACRÓNIMOS

AC	Corrente Alternada
Ac	Aceleração
CAD	Desenho Assistido por Computador
CAM	Manufatura Auxiliada por Computador
CNC	Controlo Numérico Computadorizado
D	Diâmetro
DC	Corrente Continua
DNC	Controlo Numérico Direto
Fc	Força de Corte
IP	Íman Permanente
Jf	Inércia do fuso
Jw	Inércia referente à carga
ks	Força Especifica
L	Comprimento
NC	Controlo Numérico
PaP	Passo a Passo
Pc	Potência de Corte
RV	Relutância Variável
S	Secção
T	Binário
t	Tempo
Vc	Velocidade de Corte

1. INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

A necessidade de alcançar peças com tolerâncias reduzidas e com acabamentos de melhor qualidade, levou a que a máquina-ferramenta¹ sofresse grandes progressos tecnológicos para dar resposta às necessidades impostas.

Pode avaliar-se o conceito de máquina segundo várias definições, em geral, o que se pretende com o desenvolvimento de uma máquina é melhorar a qualidade e a facilidade de trabalho do Homem. Uma máquina pode ser definida, sem rigor, como um aparelho ou instrumento para comunicar movimento ou pôr em ação um agente natural². Assim, podemos concluir que uma máquina é um auxílio ou até mesmo a substituição do Homem, permitindo várias vantagens tais como a precisão, exatidão, repetibilidade, capacidade de produção em série, rigor, qualidade entre outros.

As máquinas-ferramentas permitem a fabricação de diversas peças, nos mais diversos tipos de materiais através da movimentação mecânica de um conjunto de ferramentas. São capazes de obter uma peça sem ser necessário recorrer a outro tipo de processo de produção, são capazes de maquinar completamente um componente. Assim pode-se aferir que a máquina-ferramenta é a base de todas as indústrias, pois diretamente ou indiretamente, todas estão dependentes das máquinas-ferramentas.

Do ponto de vista evolutivo, verificou-se que as máquinas-ferramentas sofreram grandes modificações ao longo dos tempos. O desenvolvimento mais significativo deve-se à substituição do comando/controlo mecânico pelas tecnologias computacionais, o que permitiu enormes benefícios nos gastos gerais, como economizar o tempo de fabrico ou a deteção e correção de erros. Com esta comutação obteve-se melhores resultados a todos os níveis de produção.

¹ Não se deve confundir máquina-ferramenta de máquina-ferramenta CNC, pois o segundo contempla controlo numérico computadorizado em relação ao primeiro.

² Dicionário da Língua Portuguesa, 8.ª edição, Porto Editora

As máquinas estão divididas em diferentes níveis de controlo, desde o controlo manual ao controlo totalmente automático. O estabelecimento dos diferentes níveis é uma forma simplificada da evolução, desde o nível zero onde estão inseridas todas as máquinas que são controladas exclusivamente por via manual. A evolução para o primeiro nível de controlo reside numa fonte de energia de forma controlada através do uso de embraiagens, volantes de inércia, interruptores. O desenvolvimento do torno de corte por parafuso com guia de correção de Henry Maudslay³, desenvolvido em 1797, deu origem ao segundo nível de controlo, que é caracterizado pelo movimento da ferramenta e da peça de uma forma sincronizada. O terceiro nível de controlo é caracterizado pela possibilidade de operarem por ciclos fixos. Os movimentos da ferramenta são ativados por cames ou por fuso e porca, acionados por motores elétricos. No quarto nível de controlo o tamanho real da peça a ser produzida é monitorizada com a utilização de transdutores⁴ de medição. No quinto nível de controlo a informação para controlar a máquina é introduzida na unidade de controlo da máquina sob a forma de valores numéricos simbólicos – Controlo Numérico (CN). Este nível de controlo surgiu da necessidade de produzir peças complexas, com grande rigor dimensional, redução de custos e redução do tempo de manufatura. O Controlo Numérico ao longo dos tempos evoluiu e foram melhorados alguns aspetos no controlo da máquina dando origem a denominada 1ª geração, 2ª geração e 3ª geração. As primeiras máquinas que designam a primeira geração foram previamente projetadas para operações de ciclo manual ou fixo. A estas máquinas foram adicionados sistemas de controlo numérico da posição da peça relativamente à ferramenta. O tempo de maquinação tornou-se menor, no entanto o operador tinha de selecionar as ferramentas, as velocidades e os avanços. Foram desenvolvidos componentes mecânicos como os fusos de esferas recirculantes, as chumaceiras e guias hidrodinâmicas, que permitiram que as máquinas-ferramentas fossem mais seguras e que tivessem uma vida útil mais longa. O desenvolvimento dos computadores impulsionou a criação das máquinas de terceira geração. Estas máquinas são capazes de realizar uma gama extensa de operações de maquinação. Neste contexto, surge um novo conceito, Controlo Numérico Computacional (CNC⁵). Com o agrupamento de várias operações de maquinação numa única máquina, criaram-se famílias de máquinas específicas, como os centros de maquinação, centros de torneamento, centros de fresagem-torneamento, Electroerosão CNC. O conhecimento destes diferentes níveis de controlo de máquinas-

³ Henry Maudslay, aperfeiçoou o torno mecânico, aplicando um mecanismo que mantém a ferramenta firme durante o trabalho, aumentando a precisão.

⁴ Os transdutores, são dispositivos que recebem um sinal e o retransmitem.

⁵ CNC- Controlo Numérico Computadorizado, do inglês “ computer numerical control”.

ferramentas é fundamental para o domínio das tecnologias de manufatura, pois permitem escolher o nível de controlo mais adequado para determinada aplicação.

Com o aparecimento das máquinas-ferramentas CNC, surge paralelamente a necessidade da formação de operadores. Na sua generalidade, estas formações apresentam um elevado custo acrescentado ao custo inicial da máquina, o que dificultou a sua aplicação em algumas indústrias. No entanto, pode-se dizer que apesar de haver algumas desvantagens, o aparecimento das Máquinas-Ferramentas CNC, vieram corrigir muitas lacunas na maquinação de peças o que permitiu uma evolução tecnológica considerável. Hoje em dia, as grandes empresas de produção de peças já estão equipadas com este tipo de máquinas permitindo a criação de peças para as mais diversas áreas de uma forma rápida e eficaz.

1.2 Propósito da Dissertação

A presente dissertação pretende, primeiramente o desenvolvimento de uma pequena máquina-ferramenta CNC, com o intuito de realizar gravações em peças de diversos materiais: nylon, alumínio, aço, bronze, entre outros. Este desenvolvimento deve-se à necessidade de algumas empresas da área da metalomecânica, onde as gravações são realizadas por prensagem de matrizes. A prensagem consiste em aproximar a matriz do material onde pretende aplicar a gravação e aplicar uma força de elevada intensidade à matriz, gravando na peça a marca da matriz. Este método contém algumas desvantagens, o desalinhamento da marcação com a orientação da peça, a introdução de tensões nas peças que podem danificar a resistência da peça para a qual foi desenvolvida. Com a maquinação por arranque de aparas, previamente simulada em computador, os esforços aplicados à peça são insignificativos comparando com o método de prensagem, assim como o alinhamento que é garantido se a peça se encontrar devidamente centrada.

Com este projeto pretende-se colocar em prática parte dos conhecimentos adquiridos durante o Mestrado em Engenharia Mecatrónica. Como a formação académica é de carácter mecânico e elétrico, a melhor aplicação das duas vertentes só poderia estar associada à máquina-ferramenta CNC, aliás todos os princípios fundamentais da engenharia podem ser aplicados ao estudo ou conceção deste tipo de máquinas.

Por último, estando a realizar um estágio profissional numa pequena empresa de metalomecânica paralelamente à formação académica, existe a capacidade da laboração de peças para o desenvolvimento da máquina e sua aplicação no dia-a-dia na mesma empresa.

1.3 Evolução Histórica

O Homem já nos tempos pré-históricos elaborava os seus próprios utensílios para facilitar determinadas tarefas, mediante os materiais que dispunham, sílex⁶ e mais tarde os metais [2].

Pode dizer-se que a origem das Máquinas-Ferramentas teve início no período paleolítico superior, cerca de 6.000 A.C., onde foram desenvolvidas plainas primitivas, utilizando pedaços de madeira para munir uma estrutura e pedra lascada como ferramenta [3].

No século XV, surgem esboços de Leonardo Da Vinci⁷ com ideias inovadoras para máquinas-ferramentas que influenciou muitos projetistas na Revolução Industrial [3].

Em meados do século XVIII inicia-se no Reino Unido a Revolução Industrial, o que originou grandes avanços tecnológicos e conseqüentemente o desenvolvimento das máquinas-ferramentas. O primeiro torno aparece por volta de 1765 pelo francês Vaucanson, mas só em 1978 por intermédio de Maudslay é que encontraram aceitação [3].

O torno paralelo demonstra como a Revolução Industrial revolucionou a máquina-ferramenta, possibilitando níveis de acabamento superficial muito superiores ao que se conseguia obter até então.

Assim com os avanços técnicos/tecnológicos conseguidos num período mais recente, foi possível desenvolver máquinas controladas por computadores. O americano John Parsons⁸ foi quem teve essa ideia que revolucionou o processo construtivo de máquinas-ferramentas.

Desde os anos 90 do século XX ficou assumido que um sistema de controlo numérico é capaz de dirigir os movimentos de posicionamento de um órgão mecânico, cujos comandos são elaborados de forma totalmente automática, a partir de informações numéricas ou alfanuméricas pré-definidas, de forma manual ou através de um programa (*software*) dedicado [4].

Esta aliança entre máquina e sistema de controlo fez com que aumentasse a eficiência da produção e por sua vez a inovação tecnológica.

⁶ Sílex é uma rocha sedimentar silicada, constituída de quartzo criptocristalino, muito dura e com densidade elevada.

⁷ Leonardo Da Vinci concebeu ideias muito à frente do seu tempo.

⁸ John T.Parsons, foi o pioneiro a conceber um controlo numérico para máquinas-ferramentas na década de 1940.

1.4 Impacto económico a nível mundial das máquinas-ferramentas

A economia e o desenvolvimento tecnológico são parceiros no que diz respeito ao impacto económico, pois um determinado serviço só é útil se for vantajoso economicamente. Percebe-se que a economia se rege fundamentalmente pela oferta/procura. A indústria das Máquinas-Ferramentas não é exceção, pois esta depende da constante procura dos vários sectores que consomem bens, equipamentos ou serviços. Entende-se que o mercado mundial de Máquinas-Ferramentas está em constante evolução.

No final de 2008 e início de 2009, a economia mundial passou por uma severa recessão, com impactos claros no que diz respeito ao consumo mundial de Máquinas-Ferramentas, baixando todos os indicadores de vendas. Como medida de alívio, por volta de 2010, surgiu a necessidade de exportar mais por parte dos países mais afetados e a tendência alterou-se.

A nível mundial em 2014 houve um aumento de apenas de 0.3% no que diz respeito ao consumo de Máquinas-Ferramentas. Nos 10 maiores países consumidores de máquinas ferramentas, o consumo aumentou 1.7% em 2014. Enquanto os restantes 15 países que entra no estudo global, o consumo de máquinas-ferramentas contraiu 7.9%. Como se pode verificar no gráfico 1 retirado de um estudo pela Gardner Reserch⁹, prevê-se que em 2015 o consumo de máquinas-ferramentas baixe 0.4%, e que os 10 maiores consumidores vão ter um declino de 1.1% enquanto os outros 15 países deverão aumentar 3.7%. [5]

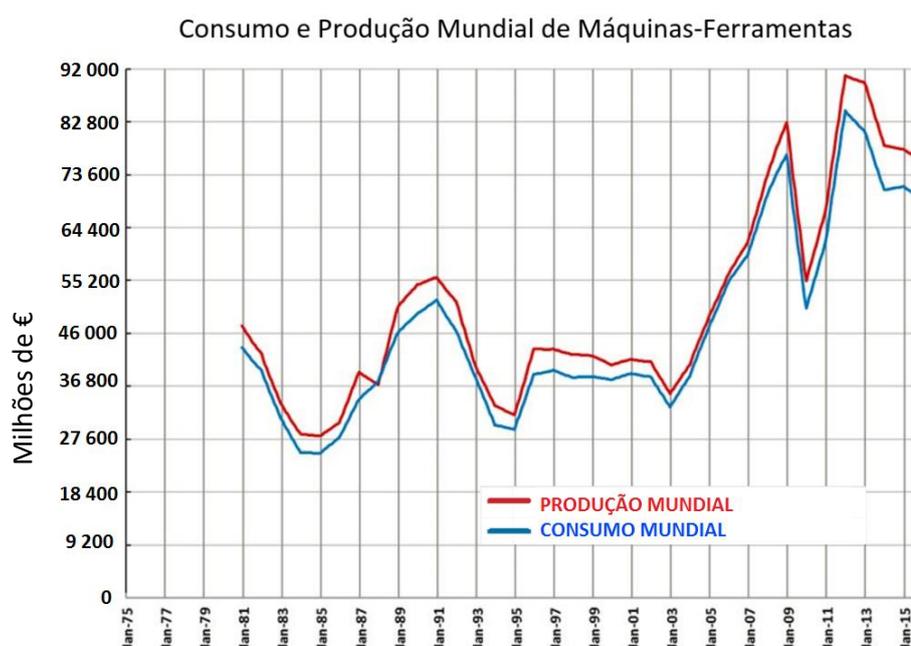


Gráfico 1 - Consumo / Produção Mundial de máquinas-ferramentas (1975-2015) [5].

⁹ Estudo da Gardner Reserch – “ World Machine – Tool Output & Consumption survey” encontra-se no anexo A desta dissertação.

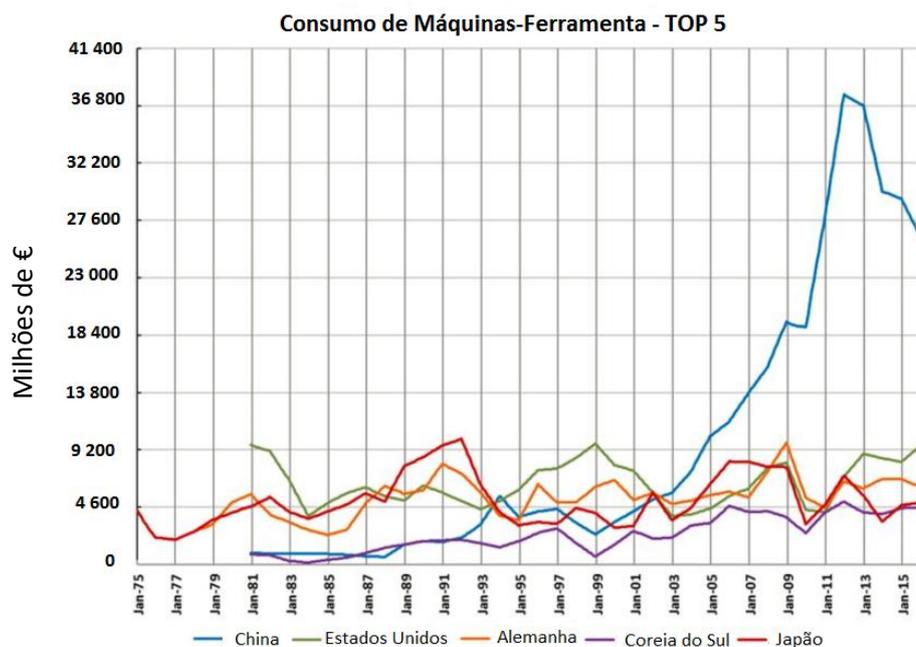


Gráfico 2 - Consumo de Máquinas-Ferramentas - Top 5 de Países [5].

Como se verifica no gráfico 2, a China manteve-se em 2014 como o maior consumidor de Máquinas-Ferramentas. No entanto o consumo de máquinas tem vindo a cair pelo terceiro ano consecutivo o que corresponde a 22% ao longo destes 3 anos.

O consumo pelos Estados Unidos, o segundo maior país consumidor de máquinas-ferramentas, foi praticamente inalterado e prevê-se que para 2015 aumente esse consumo.

Alemanha prevê-se que irá descer em 2015, mas continuará forte no que diz respeito ao mundo das Máquinas-Ferramentas, sendo o terceiro maior consumidor de máquinas-ferramentas.

Tanto o Japão como a Coreia do Sul mantiveram-se no Top 5 em 2014, onde o Japão volta novamente para a quarta posição passando pela Coreia do Sul.

Portugal encontra-se na 23ª posição no consumo de Máquinas-Ferramentas, onde em 2014 teve uma queda. No entanto, como se verifica no gráfico 3, prevê-se um aumento significativo para 2015 podendo registar os valores mais elevados de sempre. Atrás de Portugal encontra-se a Finlândia onde se prevê também um aumento, seguida da Argentina que está em queda desde 2013.

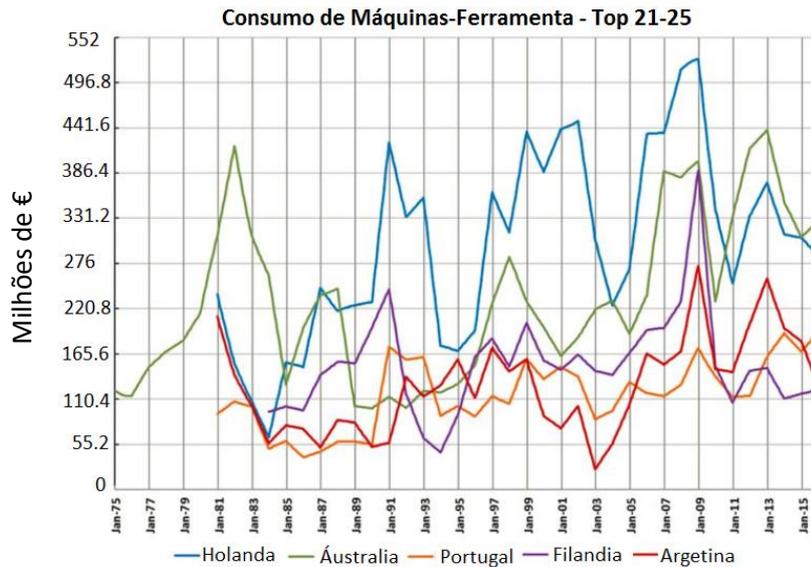


Gráfico 3 - Consumo de Máquinas-Ferramentas – 21 a 25 [5].

Se verificarmos o consumo de Máquinas-Ferramentas consoante o número de habitantes de cada país, Per-Capita, Portugal encontra-se na 17ª posição à frente da Turquia, França, Austrália, Rússia, México, Espanha, Dinamarca, Brasil, Argentina e Índia.

No que diz respeito à produção de Máquinas-Ferramentas, a China tem sido a maior produtora mundial mesmo vindo a diminuir desde 2011. Em segundo lugar encontra-se o maior exportador de máquinas-ferramentas a Alemanha. Portugal em 2014 obteve o 25º lugar na produção de máquinas-ferramentas.

Em relação às importações e exportações, segundo o inquérito da Gardner Research, os três países que mais exportam são a Alemanha, o Japão e a Itália. Os que mais importam são a China, os Estados Unidos e a Alemanha. Portugal encontra-se nas últimas posições importando mais do que exportam.

1.5 Vertente pedagógica da máquina-ferramenta CNC

Com o elevado crescimento do mercado da Máquina-Ferramenta e a necessidade de constante desenvolvimento tecnológico para satisfazer as carências futuras, a máquina-ferramenta é um excelente suporte pedagógico.

Os processos executados pela Máquina-Ferramenta originam muitos problemas de física, metalurgia, materiais, automação, mecânica de fluidos, mecânica, entre outros. Deste modo, é de elevada importância a realização de investigações científicas que permitam dar resposta aos

problemas de forças, movimentos, transferências de calor, controlo, bem como o estudo das propriedades dos materiais para que se possam construir máquinas mais eficientes e robustas.

As máquinas CNC, devido à associação entre os componentes mecânicos e eletrónicos, associados à computação, oferecem áreas de aplicação praticamente transversais ao ensino em todas as áreas de engenharia. Todo o projeto de uma máquina-ferramenta passa por várias etapas, desde a sua conceção até à sua comercialização, o que permite uma cobertura de todo o espectro industrial e científico [6].

As máquinas CNC industriais são, em geral, equipamentos que apresentam valores de rigor metrológico elevado, basicamente devido à robustez dos equipamentos e à qualidade dos materiais utilizados. No entanto a tecnologia base e os princípios de funcionamento são simples do ponto de vista mecatrónico e podem ser readaptados para outras aplicações.

No capítulo que se segue são abordados conceitos teóricos dos componentes inerentes às máquinas-ferramentas CNC.

2. CONCEITOS TEÓRICOS

Este capítulo é dedicado à introdução dos conceitos básicos das máquinas CNC, onde serão abordados alguns conceitos relacionados com as diferentes áreas alistadas às Máquinas-Ferramentas CNC.

2.1 Caracterização das várias áreas de uma máquina-ferramenta CNC

As Máquinas-Ferramentas CNC, devido à associação entre as componentes mecânicas e eletrónicas, associadas à computação, oferecem áreas de aplicação praticamente transversais em todas as áreas de engenharia [7].

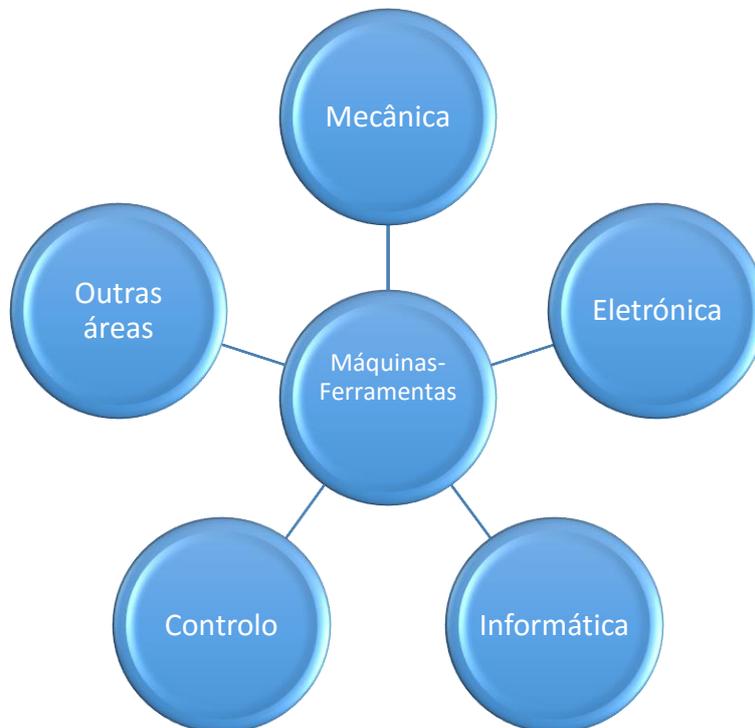


Figura 1- Relação das diferentes áreas com as máquinas-ferramentas CNC

Nas Máquinas-Ferramentas CNC, a área da Mecânica é focada claramente nas especificações, cálculo e projeto mecânico do sistema por análise estrutural e dinâmica, assim como os conjuntos mecânicos e ferramentas.

A eletrónica está presente no que diz respeito ao controlo analógico e digital de sinal, assim como os sistemas de aquisição de dados, análise e implementação de atuadores/sensores.

A área da informática contribui para as Máquinas-Ferramentas CNC através do *software* desenvolvido de CAD-CAM, assim como programação de microcontroladores e microprocessadores.

Todas as Máquinas-Ferramentas têm de ter como área de ligação o Controlo. Verificando o controlo de qualidade, o controlo metrológico assim como o controlo de fabricação.

As áreas relacionadas com as Máquinas-Ferramentas podem-se alargar à Manutenção Industrial, Política e Economia, Higiene e Segurança, Comunicações, entre outras.

Subdividindo as várias áreas relacionadas com as Máquinas-ferramentas CNC, obtemos os constituintes das diferentes partes da máquina.

2.2 Constituintes Mecânicos

Neste capítulo são abordados alguns constituintes mecânicos que fazem parte das Máquinas-Ferramentas.



Figura 2- Constituintes Mecânicos

2.2.1 Estrutura

As estruturas de máquinas-ferramentas têm por função servir de superfície de montagem para todos os elementos que constituirão a máquina como um todo, garantindo o alinhamento,

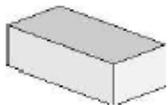
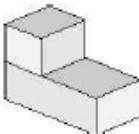
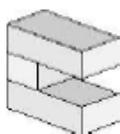
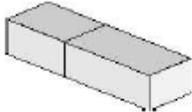
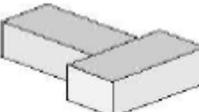
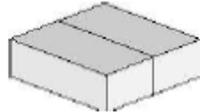
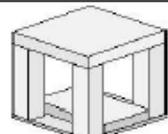
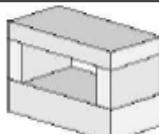
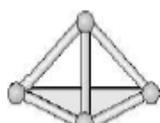
a exatidão¹⁰, suportar os esforços de maquinação, acessibilidade aos componentes internos, facilidade de manipulação, estabilidade térmica e química. Todos estes aspetos demonstram ser importantes ao longo do tempo, cada um por motivos diferentes, contudo, de todos os aspetos apresentados, a rigidez revela-se mais importante.

As máquinas-ferramentas são geralmente de elevado porte e regra geral, de elevada precisão. Isso obriga a que a sua constituição estrutural disponha de acabamentos e materiais de elevada qualidade, essas características determinam a capacidade de atingir velocidades elevadas, capacidade de absorção de vibrações e esforços causados por forças provenientes da maquinação ou por fatores externos. A estrutura deve, assim, ser capaz de resistir aos movimentos de corte, tração, compressão, flexão, torção ou encurvadura sem que estes fenómenos se façam notar na peça final obtida, garantindo sempre a segurança do utilizador.

Visto que a qualidade dos materiais e acabamentos define a qualidade final da estrutura, importa equacionar quão exigente deve ser. Há materiais mais baratos que podem satisfazer os requisitos desejados pelos utilizadores, criando gamas de equipamentos distintas que possam servir várias áreas de aplicação.

No projeto de estruturas de máquinas-ferramentas, recomenda-se que a sua estrutura seja dividida em partes menores para facilitar o seu transporte, contudo deve-se ter cuidado com a referência de montagem, para garantir a exatidão geométrica da máquina. Os arranjos mais comuns são ilustrados na tabela 1.

Tabela 1 - Arranjos geométricos da estrutura da máquina [3].

<i>Simples</i>	<i>L</i>	<i>C</i>
		
<i>i</i>	<i>T</i>	<i>H</i>
		
<i>Cubo vazado</i>	<i>Portal</i>	<i>Tetraédrica</i>
		

¹⁰ Grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro de uma mensuranda.

Estes arranjos geométricos, podem ser traduzidos para máquinas específicas nas tabelas 2 e 3. Com base nestas tabelas, pode-se verificar que para uma mesma configuração cinemática, podem ser obtidas diversas soluções através do arranjo de constituintes básicos.

Tabela 3- Arranjos específicos de máquinas-ferramentas [3].

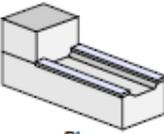
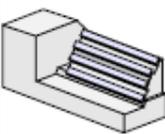
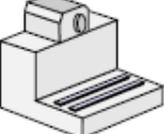
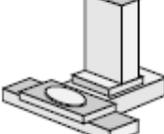
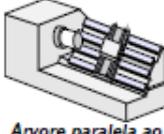
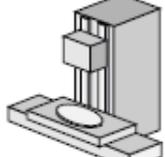
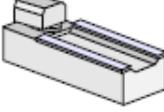
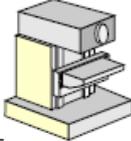
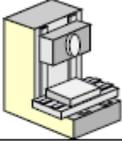
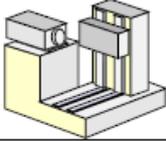
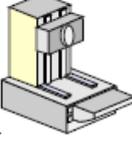
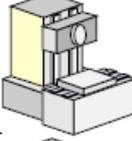
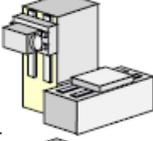
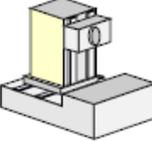
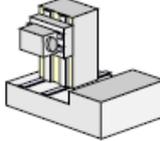
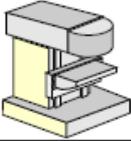
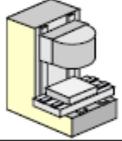
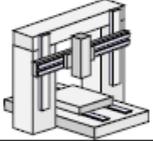
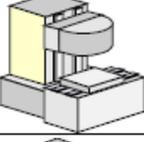
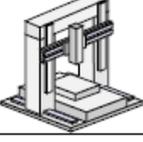
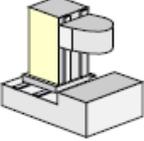
Forma da estrutura	 <i>Plana</i>	 <i>Inclinada</i>	 <i>Frontal</i>	 <i>Coluna</i>
Movimento relativo entre peça e ferramenta	 <i>Árvore paralela ao chão</i>	 <i>Árvore perpendicular ao chão</i>	 <i>Árvore com pivotagem ao plano do chão</i>	

Tabela 2 - Arranjos específicos de fresadoras [3].

		Forma da estrutura		
		Console	Bancada	
Quantidade de eixos na estrutura da árvore	<i>um</i>			
	<i>dois</i>			
	<i>três</i>	-----		
Quantidade de eixos na estrutura da árvore	<i>um</i>			
	<i>dois</i>			
	<i>três</i>			

2.2.1.1 Consideração Estática

A rigidez estática é caracterizada principalmente devido às deformações resultantes dos esforços aplicados sobre a máquina-ferramenta, sendo as mais relevantes aquelas que são causadas por flexão ou torção. Esses carregamentos são importantes porque resultam em desalinhamentos e deslocamentos dos elementos guias. A origem dessas deformações são principalmente decorrentes do peso das partes móveis, peso das peças de trabalho, forças de maquinação, entre outros [3].

O ponto de carregamento numa máquina-ferramenta é dado pelo contacto entre a peça e a ferramenta, a partir desse ponto os carregamentos são transmitidos para a árvore, apoios fixos, guias e estrutura, assim como esses se transmitem para a peça, dispositivo de fixação e novamente para as guias e estrutura. Esse caminho percorrido pelos esforços do processo, determinar o fluxo de força da máquina [3].

Na Figura 3 está um exemplo que representa o fluxo de carga numa mandriladora.

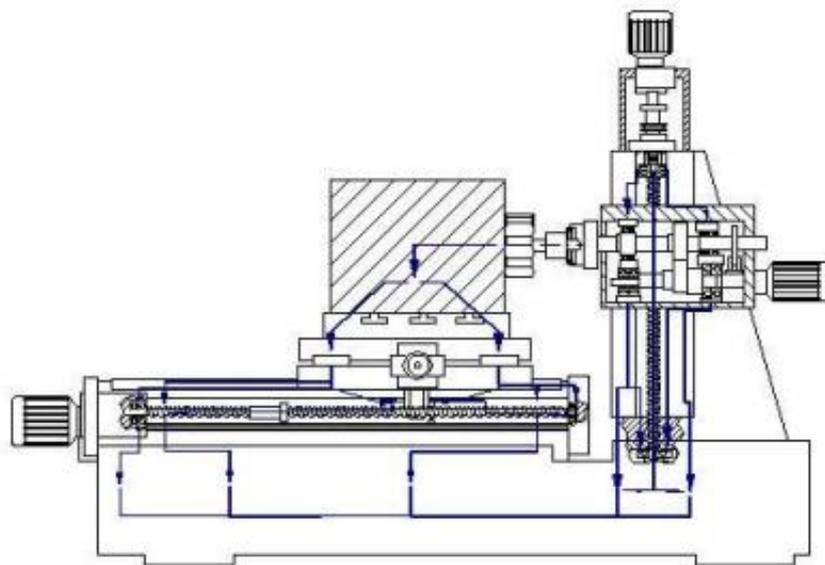


Figura 3- Fluxo de Carga numa mandriladora [3].

O problema de rigidez estrutural pode ser minimizado com a escolha de uma geometria adequada para a estrutura. Da mesma forma reforços podem ser adicionados à estrutura como forma de aumentar a sua resistência à torção e à flexão [3].

2.2.1.2 Consideração Dinâmica

Na utilização de máquinas-ferramentas geralmente são encontradas vibrações. Estas dão origem a ondulações na superfície de maquinação, que por consequência provoca uma variação na secção de maquinação.

As vibrações encontradas durante o processo de maquinação convencional provêm do sistema máquina, basicamente ruído de engrenagens, rolamentos, *stick-slip*¹¹ em guias, suportes de ferramentas subdimensionados, ferramentas em balanço, entre outros. Desta forma as vibrações provenientes do sistema máquina influencia diretamente as vibrações do processo. Isto indica que a vibração entre a ferramenta e a peça influencia o processo de maquinação causando a variação da força de maquinação, a qual atua sobre o sistema de vibração da máquina, realimentando a vibração entre ferramenta e peça, o que leva à decadência do processo [3].

Segundo Stoeterau, “(...) o processo de vibrações tem sido estudado com a intenção de primeiramente criar regras, de forma a escolher quais as condições de maquinação que podem ser utilizadas, e secundariamente regras para o projeto de máquinas-ferramentas estáveis”.

As fontes de vibração das máquinas-ferramentas provêm da má lubrificação das guias, má lubrificação das chumaceiras, entre outros. O ruído proveniente pode ser minimizado através da secção de maquinação, do atrito entre o flanco da ferramenta de corte e a peça de trabalho.

O problema da rigidez dinâmica pode ser em parte atenuado com a escolha dos materiais que formarão a estrutura, com o uso de dissipadores de energia e isoladores de vibrações.

2.2.2 Guias Lineares

Conforme Stoeterau, “(...) as guias são definidas como elementos estruturais que permitem que um componente deslize ao longo de outro num dado padrão. Em guias lineares, o padrão de movimento é retilíneo e geralmente restrito a um grau de liberdade”.

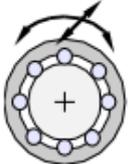
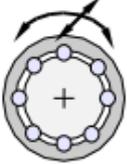
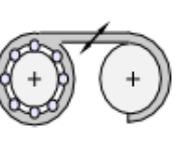
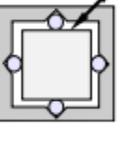
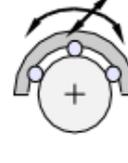
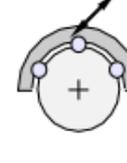
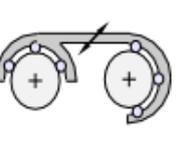
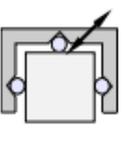
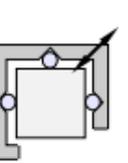
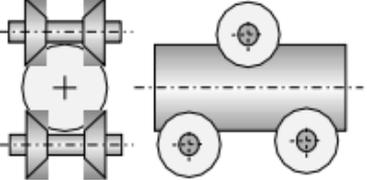
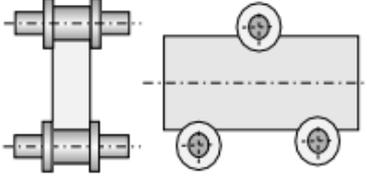
¹¹ O Stick-Slip é ocasionado por uma inconstância de força de atrito, motivada por outras variáveis tais como, distância, tempo e velocidade, o que leva a variações amplas de velocidade em sistemas constituídos por corpos em escorregamento sob ação de uma força constante.

Existem guias de várias formas, estas podem ser classificadas quanto à sua secção, ao movimento, aos graus de liberdade e quanto à restrição à rotação ao longo do eixo de translação.

Uma das formas mais comuns de guiar os carros é pela utilização de elementos rolantes, nomeadamente com dispositivos de esferas ou pela aplicação de rolamentos ou rodízios. A utilização de elementos rolantes em máquinas-ferramentas faz com que seja maior a precisão de posicionamento, maior velocidade de avanço, exatidão, fácil instalação, movimento sem stick-slip, e suavidade de movimento.

Além das classificações normais das guias em: relação à forma da secção transversal; à forma de movimento; aos graus de liberdade, e quanto à forma de restrição à rotação ao longo do eixo de translação, as guias de elementos rolantes ainda podem ser classificadas quanto a posição dos elementos em guias de elementos internos ou externos [3].

Tabela 4- Principais guias de elementos rolantes internos e externo [3] .

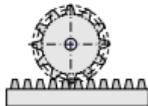
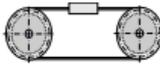
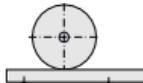
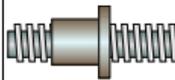
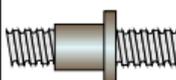
FORMA	CILÍNDRICAS			PRISMÁTICAS	
TIPO	FECHADAS				
RESTRIÇÃO	SEM	INTERNA	EXTERNA	SEM	COM
				-----	
					
TIPO	ELEMENTOS ROLANTES EXTERNOS				
	SEÇÃO CIRCULAR		SEÇÃO PRISMÁTICA		
					
CUSTO	BAIXO			BAIXO	
CAPACIDADE DE CARGA	MÉDIA/ALTA			MÉDIA/ALTA	
FABRICAÇÃO	FÁCIL			FÁCIL	
RIGIDEZ	MÉDIA			MÉDIA	
AMORTECIMENTO	BAIXO			BAIXO	
LINEARIDADE	MÉDIA			MÉDIA	
DESGASTE	ALTO			ALTO	

2.2.3 Sistemas Conversores de Movimento

A maioria dos acionamentos em máquinas-ferramentas são de ação rotativa. Com exceção do movimento de rotação da árvore, a maioria dos deslocamentos sofridos tanto por parte da peça quanto pela ferramenta são de padrão linear. Essa diferença entre o movimento típico dos acionamentos e o padrão necessário para o movimento, leva à necessidade da conversão do movimento rotativo em linear. A conversão rotativa/linear é realizada por elementos de máquinas específicos: pinhão/cremalheira, fusos trapezoidais, fusos de esferas recirculantes, fusos epicicloidais, fusos hidrostáticos, polias, rodas de atrito.

Os fusos de maneira geral podem ser classificados quanto à forma do atrito entre castanha e parafuso em fusos de escorregamento, de elementos rolantes, epicicloidais ou hidrostáticos, como se pode observar na tabela 5. Na atualidade as máquinas-ferramentas controladas numericamente não permitem que haja folgas ou atrito excessivo nas castanhas dos fusos, o que leva a uma predominância dos fusos de esferas recirculantes [3].

Tabela 5- Classificação dos elementos de conversão de movimento [3].

Tipo	Pinhão / Cremalheiras	Polias	Rodas de atrito	
Requisitos				
Custo	baixo	baixo	alto	
Vibrações	alto	baixo	baixo	
Exatidão no posicionamento	baixa	média	Muito alta	
Capacidade de transmissão de força/binário	alta	baixa	Muito baixa	
Facilidade de manutenção	alta	alta	baixa	
Atrito	baixo	baixo	alto	
Vida útil	média	alta	baixa	
Tipo	Fusos			
	Trapezoidais	Esferas recirculantes	Epicicloidais	Hidrostáticas
Requisitos				
Custo	baixo	médio	alto	Muito alto
Vibrações	médio	baixa	bai	baixa
Exatidão no posicionamento	baixa	alta	alta	alta
Capacidade de transmissão de força/binário	alta	alta	alta	alta
Facilidade de manutenção	média	média	baixa	baix
Atrito	alto	baixo	baixo	Muito baixo
Vida útil	média	alta	alta	Muito alta

2.2.4 Acoplamentos

Existem vários modelos de acoplamentos, desde rígidos, flexíveis ou móveis. Cada um com as suas vantagens e desvantagens.

Os acoplamentos rígidos ou fixos servem para unir árvores de tal maneira que funcionem como se fossem uma única peça, alinhando as árvores de forma precisa.

Os acoplamentos elásticos ou flexíveis tornam mais suave a transmissão do movimento em árvores que tenham movimentos bruscos, e permitem o funcionamento do conjunto com desalinhamento paralelo, angular e axial entre as árvores.

Os acoplamentos móveis permitem o jogo longitudinal das árvores. Esses acoplamentos transmitem força e movimento somente quando acionados, isto é, obedecem a um comando.

Os sistemas de transmissão mais comuns, nos sistemas de baixo custo, são as juntas homocinéticas (cardãs) que transmitem o movimento entre árvores que precisam de sofrer variação angular durante o movimento de rotação do veio, acopladores permanentes (flexíveis, rígidos ou por atreito) ou optam pela eliminação do fuso e utilizam um sistema de transmissão por cabo.



Figura 4- Junta homocinética [20]



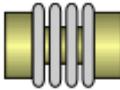
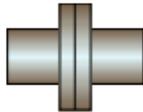
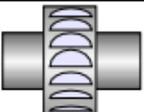
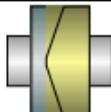
Figura 5- Acoplamento permanente flexível [21]



Figura 6- Junta com transmissão por cabo [22]

As juntas com acopladores permanentes possuem uma estrutura simples e são essencialmente constituídas por três tipos diferentes, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6- Classificação dos elementos de acoplamento [3].

Tipo	Acoplamentos Permanentes		
	Rígidos	Flexíveis	Por Atrito
Requisitos			
Custo	5	3	3
Rigidez	5	5	4
Erro de segmento	5	4	3
Compensação do desalinhamento	1	5	1
Tipo	Embreagens		
	Hidráulicos	Magnéticos	Por Forma
Requisitos			
Custo	2	1	3
Rigidez	3	4	4
Erro de segmento	2	4	4
Compensação do desalinhamento	2	3	3

Onde: 5 - melhor e 1 - pior.

2.2.5 Ferramentas e materiais constituintes

As ferramentas das máquinas-ferramentas CNC são muito diversas. Os materiais típicos da constituição de ferramentas são os aços rápidos, os carbonetos revestidos, cerâmicos, diamantes ou metais duros sintetizados.

Atualmente existem soluções para os materiais de ferramentas, por forma a otimizar cada operação de maquinação.

A escolha do tipo de ferramenta depende do tipo de operação, qual o material que vai maquinar, em que tipo de máquina-ferramenta vai trabalhar, o estado da superfície exigido, estabilidade no corte da ferramenta. Cada um destes fatores condiciona a seleção da ferramenta adequada e conseqüentemente os parâmetros de corte em trabalho [8].

O material caracteriza-se pela sua dureza, estrutura, composição química e integridade da superfície cortante. Na máquina a potência, rigidez, regulação e condições de aperto da peça.

A eficiência de uma operação de maquinação exige uma seleção cuidada dos materiais adequados. Esta escolha obriga a uma análise ponderada de fatores técnicos e económicos [8].

Os materiais que correspondem às solicitações de corte mais utilizados para ferramentas de corte, são:

- HSS – Aço rápido
- C – Carbonetos sinterizados
- CG – Carbonetos sinterizados revestidos
- CT – Cermet
- CC – Cerâmica
- CBN – Nitreto de Boro Cúbico
- PCD – Diamante policristalino

Segundo [8], a seleção do material da ferramenta e a sua qualidade são críticas, uma única qualidade não satisfaz diversas aplicações de maquinação.

Os carbonetos sinterizados são os materiais para ferramentas mais utilizados à escala mundial ultrapassando os consumos de aço rápido – HSS.

A percentagem de utilização de outros materiais é reduzida, no entanto, materiais duros como os cerâmicos permitem em determinadas aplicações de velocidades de corte elevadas.

A maior rigidez, melhoria dos sistemas de aperto e maior equilíbrio dinâmico das ferramentas permite o aumento da utilização de materiais duros e consequentemente mais frágeis [8].

Tabela 7- Propriedades dos materiais para ferramentas [8].

Material	Dureza (HV 10/30)	Tensão Rotura Transversal (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente Dilatação Térmica ($\times 10^{-6}$)	Condutibilidade Térmica W/m.K
Aço rápido	700 - 900	2500 - 4000	2,6 - 3	9 -12	15 - 48
Carbonetos	1200 - 1800	1300 - 3200	4,7 - 6,5	4,6 – 7,5	20 - 80
Si ₃ N ₄	1350 - 1600	600 - 900	2,8 - 3,2	3 - 3,3	20 - 35
Al ₂ O ₃	1450 - 2100	400 - 800	3 - 4,5	5,5 – 8	10 - 38
CBN	3500 - 4000	500 - 800	6,8	4,9	100
PCD	5000 - 6000	600 - 1100	8,4	1,5	550

2.3 Constituintes Eletrônicos

Neste capítulo são abordados alguns equipamentos eletrônicos que fazem parte das máquinas-ferramentas CNC. É abordado o princípio de funcionamento e algumas características dos mesmos.

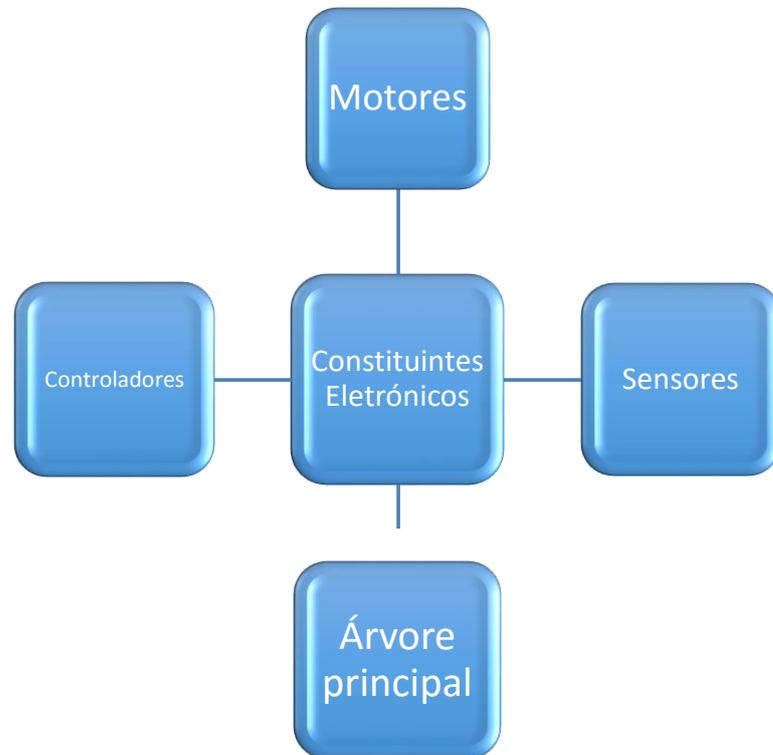


Figura 7- Constituintes Eletrônicos.

2.3.1 Motores

O uso dos motores elétricos para mover máquinas e equipamentos mecânicos, tem assumido uma importância econômica crucial. Nas máquinas-ferramentas, de baixo-custo, podem ser utilizados diversos tipos de motores, entre eles, destacam-se os motores de passo-a-passo¹², os servomotores e os motores AC ou DC.

2.3.1.1 Motores Passo a Passo

Os motores de passo são um tipo de motor elétrico preferencialmente usados quando algo tem de ser preferencialmente de forma precisa. Podem ser usados em aplicações onde é necessário controlar vários fatores, tais como o ângulo de rotação, velocidade, posição e sincronismo. Devido às suas características, este tipo de motores tem vindo a ser utilizado em áreas como a informática, robótica e automação industrial.

¹² São designados de motores de passo ou motores PaP.

Neste tipo de motor a rotação é controlada por uma série de campos eletromagnéticos que são ativados e desativados eletronicamente, através de uma sequência de pulsos elétricos. Atualmente o mercado disponibiliza uma larga gama de motores de passo, que se distinguem pelo seu modo de funcionamento, características estruturais e modo de operação [9].

Do ponto de vista funcional, os motores de passo são acionados por bobinas alinhadas duas a duas que, quando recebem energia, gerem um campo magnético que faz atrair o rotor, dando origem a uma variação no ângulo (originando um passo). A velocidade e o sentido de rotação são controlados de acordo com a forma como as bobinas são ativadas. O número de passos é dado pelo número de alinhamento possível entre o rotor e as bobinas.

Os motores PaP podem ser caracterizados quanto à sua estrutura de relutância variável, ímã permanente e híbridos.

Os motores de relutância variável, o estator dos motores é formado por ranhuras, chamadas dentes devido ao seu aspeto, onde se encontram os enrolamentos. O rotor é também dentado, cada dente corresponde a um polo saliente. O número de dentes do rotor determina o número de passos do motor.

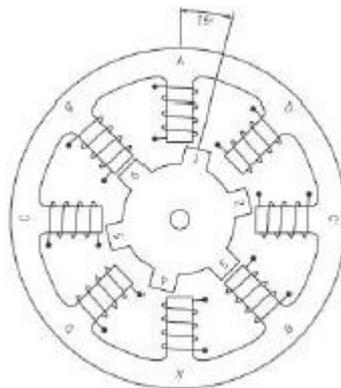


Figura 8- Corte transversal de um motor de passo de relutância variável [9].

O controlo deste tipo de motor depende unicamente da ordem de energização das bobinas e das suas características mecânicas. Quando os enrolamentos do estator são energizados com corrente DC, os polos ficam magnetizados. Este fenómeno gera uma força que atrai os dentes do rotor para os polos do estator [9].

Os motores de ímã permanentes apresentam uma estrutura semelhante aos de relutância variável, no entanto, o rotor possui um ímã permanente. A presença do ímã, faz com que tenha binário estático e mantenha a última posição mesmo quando já não está

energizado. O rotor não apresenta dentes como o de RV, mas apresenta um rotor magnetizado com polo norte e sul em linhas retas paralelas ao seu eixo [9].

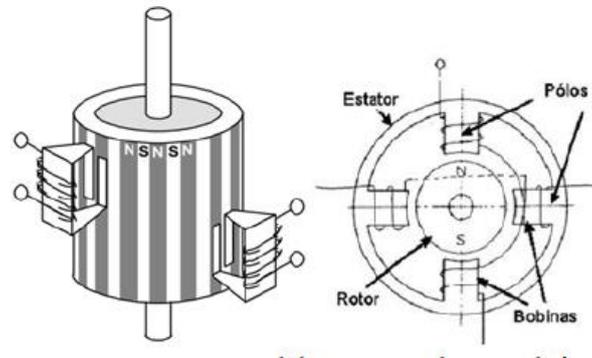


Figura 9- Corte transversal de um rotor de um motor de ímã permanente [9].

Energizando as fases em sequência, no estator, é gerado um campo magnético, o rotor gira porque os seus polos magnéticos são atraídos pela força gerada pelos polos do estator. O ímã permanente, no rotor, proporciona um aumento de intensidade de fluxo magnético, exibindo características de binário mais elevadas quando comparados com os motores de relutância variável. [9]

Os motores de passo híbrido são preferencialmente usados em posicionamento de alta precisão. Estes motores são mais caros do que os motores de IP e RV, mas apresentam melhor desempenho em termos de resolução, binário e velocidade.

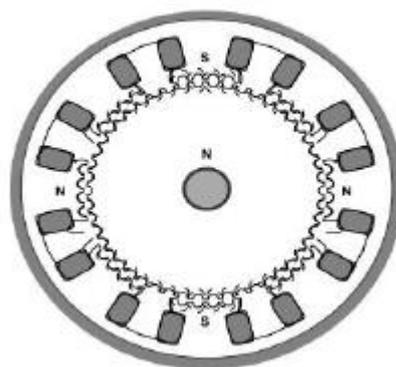


Figura 10- Corte transversal de um rotor de um motor de passo híbrido [9].

Este tipo de motor combina as principais características dos motores IP e RV. A configuração do seu rotor assemelha-se à configuração do rotor de um motor de RV, com a diferença de possuir um ímã permanente colocado axialmente ao seu eixo. O rotor ajusta-se à posição de relutância mínima em resposta ao campo magnético gerado pelo par de bobinas do

estator, quando energizadas. A presença do ímã permanente no eixo do rotor aumenta a intensidade do fluxo magnético.

Os motores de passo tendo em conta o modo de operação, podem ser unipolares ou bipolares.

Os motores de passo unipolares são os mais comuns e apresentam um circuito de controlo mais simples. Os bipolares requerem circuitos de controlo mais complexos, devido ao facto de possuírem muitas bobines na mesma carcaça. A grande vantagem dos motores bipolares em relação aos unipolares é o facto de terem maior binário e menores dimensões.

Os motores de passo unipolares apresentam dois enrolamentos por fase, um para cada sentido da corrente. Cada bobine consiste num enrolamento com derivação central. A derivação central, permite a alimentação das bobines, por sua vez os terminais das bobines permitem o controlo do movimento. Dado que existem duas bobines e duas direções em que a corrente pode fluir no motor, diz-se que este motor possui 4 fase (1a,2a,1be2b) [9].

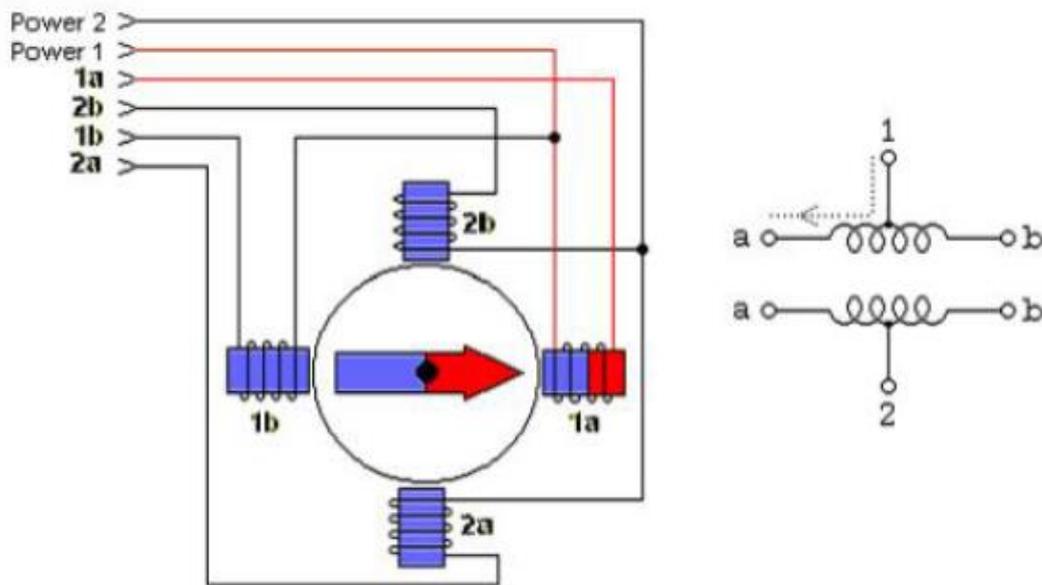


Figura 11 - Modelo do motor de passo unipolar [9].

Os motores de passo unipolares possuem três movimentos básicos de acordo com a tensão aplicada aos terminais das bobines:

- *Wave-drive*: são energizadas uma bobine de cada vez. Assegurando baixo consumo e precisão;
- *Full-step-drive*: nestas sequências são energizadas duas fases adjacentes simultaneamente, apresentando uma relação binária/velocidade maior;

- $\frac{1}{2}$ Step-drive: consiste na combinação dos dois modos anteriores, permitindo uma rotação de meio passo.

Como exemplo e assumindo uma lógica positiva, em que o valor lógico 1 significa fazer fluir corrente numa das fases, as seguintes tabelas demonstram o funcionamento dos três movimentos básicos.

Bobinas	1A	2A	1B	2B
01	1	0	0	0
02	0	1	0	0
03	0	0	1	0
04	0	0	0	1

Posição: 8, 2, 4, 6

Bobinas	1 ^a	2A	1B	2B
01	1	1	0	0
02	0	1	1	0
03	0	0	1	1
04	1	0	0	1

Posição: 1, 3, 5, 7.

Bobinas	1A	2A	1B	2B
01	1	1	0	0
02	0	1	0	0
03	0	1	1	0
04	0	0	1	0
05	0	0	1	1
06	0	0	0	1
07	1	0	0	1
08	1	0	0	0

Posições: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

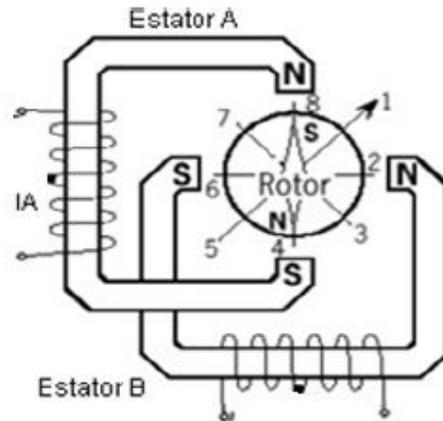


Figura 13 - Sequência de funcionamento de um motor de passo com alimentação unipolar [9].

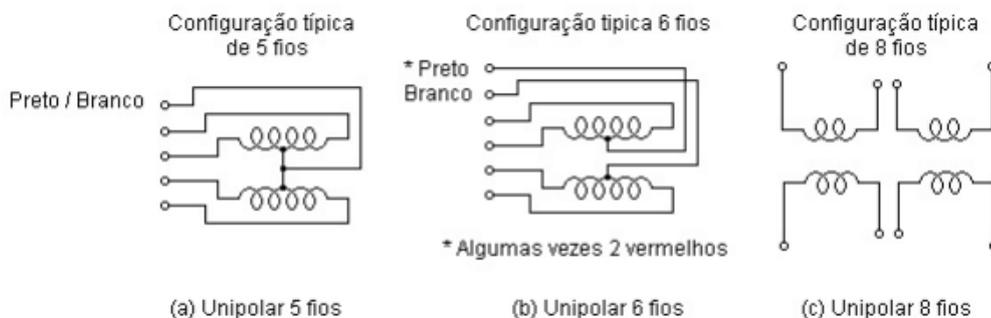


Figura 12 - Diferentes tipos de motores com configuração unipolar [9].

Os motores de passo bipolares utilizam apenas um enrolamento por fase. Para inverter o polo magnético é necessário inverter o sentido da corrente no enrolamento.

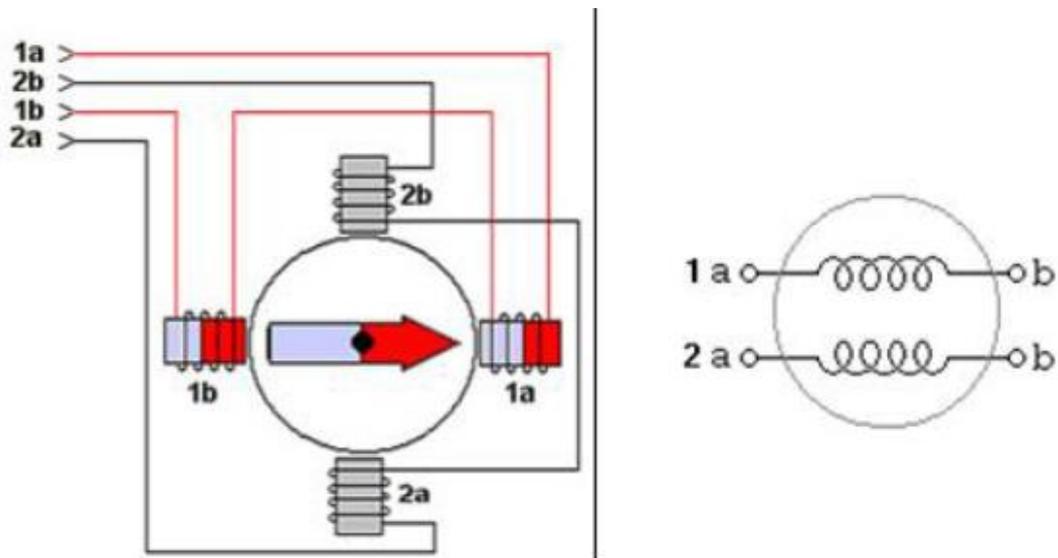


Figura 15 - Modelo de motor de passo bipolar [9].

Dadas estas características. O circuito que controla o motor de passo bipolar deve ser capaz de inverter a polaridade de tensão por qualquer bobine, deixando a corrente fluir nas diversas direções. Este controlo pode ser promovido por circuitos de ponte H [9].

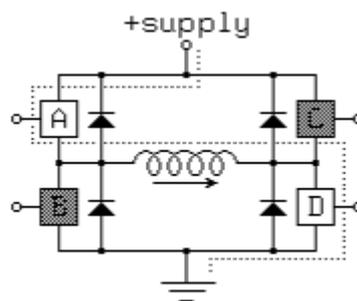


Figura 14 - Mecanismo de funcionamento [10].

Este tipo de circuito é designado de Ponte-H e aciona o motor numa determinada direção de acordo com o sentido da corrente.

O circuito é constituído por quatro interruptores (transístores ou relés por exemplo) acionados de forma alternada (A e D ou B e C). O sentido da corrente determina o sentido de rotação do motor, é definido pela configuração dos interruptores atuados. Os interruptores A e D assim como B e C não podem ser atuados ao mesmo tempo, para evitar um curto-circuito.

O controlo promovido por ponte H, pode ser utilizado não só em motores de passo como também em motores de corrente contínua, solenoides e muitas outras aplicações [10].

Por medidas de segurança, é necessário o uso de díodos no enrolamento de cada bobine, como está ilustrado na figura 16, para evitar correntes reversas que possam prejudicar o sistema.

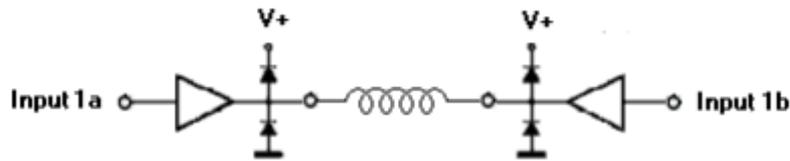


Figura 16 - Mecanismo de proteção [10].

As bobinas dos motores de passo bipolares são acionadas na mesma lógica que os motores unipolares, porém em vez de níveis lógicos "0" e "1" tem-se polaridades "+" e "-". [9]

Bobinas	1 A	2 A	1 B	2 B
01	+	-	-	-
02	-	+	-	-
03	-	-	+	-
04	-	-	-	+

Posição 8, 2, 4, 6.

Bobinas	1 A	2 A	1 B	2 B
01	-	-	+	+
02	-	+	+	-
03	+	+	-	-
04	+	-	-	+

Posição 1, 3, 5, 7.

Bobinas	1 A	2 A	1 B	2 B
01	+	-	-	-
02	+	+	-	-
03	-	+	-	-
04	-	+	+	-
05	-	-	+	-
06	-	-	+	+
07	-	-	-	+
08	+	-	-	+

Posição 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.

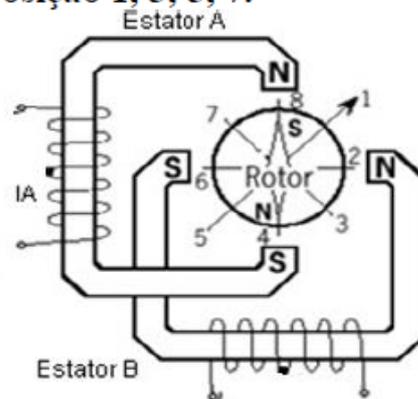


Figura 17 - Sequência de funcionamento de um motor de passo com alimentação bipolar [9].

O circuito de controlo de motores de passo utilizado para inverter a polaridade, pode acionar tanto motores bipolares como motores unipolares. Os motores bipolares são simplesmente motores unipolares sem derivação central.

encoder incremental é dada pela contagem de pulsos a partir de uma referência, normalmente a marcação de “zero” [12].

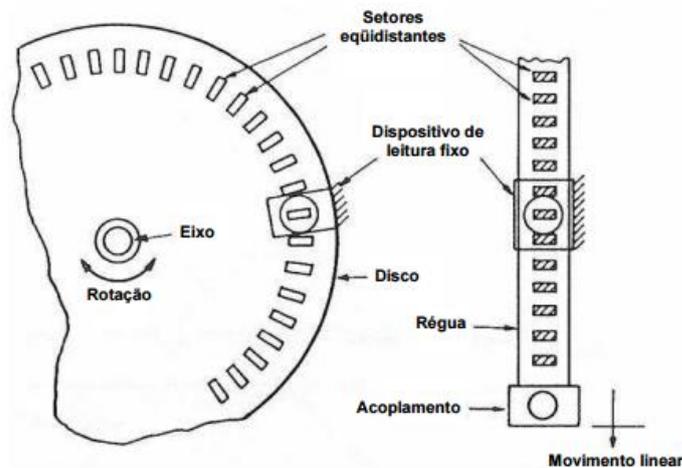


Figura 19 - Princípio de encoder incremental rotativo e encoder incremental linear [12].

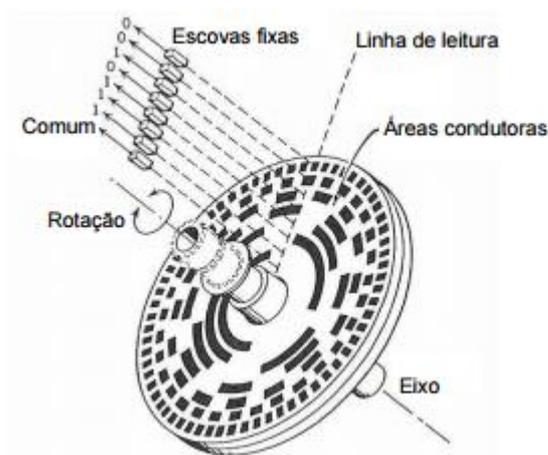


Figura 20 - Esquema de um encoder absoluto [12].

2.3.1.3 Motores PaP *versus* Servomotores

Sabe-se que os motores PaP podem ser vistos como motores elétricos sem escovas, com excelente binário a baixa rotação, ideias para controle de movimentações angulares e posicionamento com elevada precisão. Possuem habitualmente dois enrolamentos no estator e o rotor é de ímã permanente, ou no caso de motores de relutância variável, de um material ferromagnético. Nestes motores toda a comutação é feita pelo circuito eletrônico de controle, podendo o passo (rotação) do motor ser controlado e assim o seu rotor ser posicionado num determinado ângulo, com muito boa precisão.

Os servomotores necessitam de um circuito que gere pulsos de duração precisa enquanto nos motores PaP o circuito terá de gerar uma determinada sequência correta de sinais para o posicionamento. Do ponto de vista construtivo os servomotores, essencialmente os de baixo-custo, são constituídos por um motor de corrente contínua (DC), um circuito eletrónico de controlo (geralmente com um potenciómetro para controlo da velocidade), um sistema de engrenagens para aumentar o binário e apenas três fios de ligação, dois de alimentação e um sinal de controlo. Assim, ambos os tipos de motor oferecem capacidade de posicionamento preciso, mas diferem muito no controlo. Nos motores de baixo-custo o sistema de engrenagens pode ser relativamente frágil, sendo esta uma grande desvantagem perante os motores PaP [7].

Em suma, os motores referidos diferem fundamentalmente no seguinte:

- O posicionamento nos motores PaP dependem do ângulo de passo do motor, enquanto nos servomotores dependem de uma calibração (geralmente de um potenciómetro). Devido às tolerâncias de fabrico, dificilmente existem dois servomotores exatamente iguais.
- Os motores PaP podem funcionar num sistema em malha aberta enquanto os servomotores necessitam de um sistema em malha fechada para funcionar. Desse modo, numa situação de carga excessiva, os motores de passo podem perder a posição e não a corrigem (perdem passos), o que torna necessário implementar sistemas de medição e sensores auxiliares.
- Mecanicamente os motores PaP são muito robustos, essencialmente devido à ausência de engrenagens e escovas.

Os pulsos dos motores PaP são normalmente gerados por um controlador (chamado *driver* ou *stepper driver*). Como cada passo corresponde a uma distância conhecida, estes dispositivos apresentam uma repetibilidade posicional ótima e, portanto, são ótimos dispositivos para implementar nas máquinas de comando de baixo custo.

2.3.2 Controladores

2.3.2.1 Controladores dos motores

Existem muita diversidade no que diz respeito a drivers, tanto para os motores de PaP como para os servomotores. No entanto neste capítulo serão abordados dois drivers para os motores PaP, *easy driver* e *Microstep Driver*, que foram abordados nas aulas práticas durante o mestrado.

O *easy driver*, é um uma das muitas soluções para controlar os motores PaP. É uma solução com as seguintes características:

- Gama de tensão de alimentação entre os 7 e 30 Volts;
- Controlo de motores bipolares e motores ligados como bipolares, isto é, motores de 4,6 ou 8 fios para qualquer gama de tensão de alimentação;
- Limitação de corrente ajustável de 150mA/fase a 750mA/fase;
- Necesita apenas de 2 pinos para controlo da direção e velocidade do motor. [13]

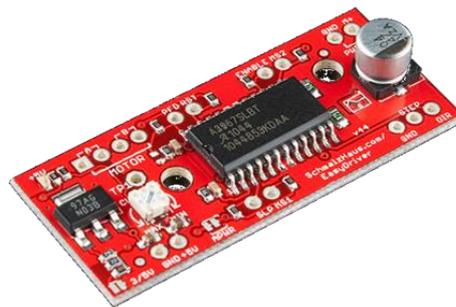


Figura 21 - *EasyDriver* [13].

No caso de se pretender o controlo de motores em que a corrente seja superior a 750mA, pode-se recorrer a um *driver* do mesmo fabricante, driver este chamado de *BigeasyDriver*.

O *Microstep Driver* é um outro exemplo para controlar a direção e velocidade dos motores PaP. As suas principais características são:

- Tensão de alimentação entre 20 e 50 Volts;
- 3A (RMS) de corrente máxima;
- Possibilidade de controlo de motores unipolares e bipolares;
- Controlo do número de pulsos por revolução;
- Controlo possível com apenas 2 pinos.



Figura 22 - *MicroStep Driver* [13].

Para controlo dos motores são disponibilizados 6 contactos, sendo cada par deles correspondentes a uma ação. Para garantir o funcionamento do driver deve ser garantida a ligação do pino ENA+ diretamente ao pino ENA- para garantir uma diferença de potencial nula aos seus terminais. Para controlo da direção deve ser aplicada uma diferença de potencial entre os pinos DIR+ e DIR-. Para o controlo dos pulsos que forçam o avanço do motor, nos terminais PUL+ e PUL- deve-se aplicar o mesmo princípio referido no controlo da direção [13].

O driver disponibiliza ainda um conjunto de *switchs* para configuração quer da corrente máxima fornecida pelo driver, quer pelo número de pulsos por rotação.

2.3.2.2 Controladores de programação

Nos sistemas industriais, o processo de controlo é, regra geral, efetuado por sistemas dedicados, nomeadamente no que diz respeito a controlo de motores aplicados em máquinas CNC. Um dos melhores controladores CNC é desenvolvido pela FANUC, que apresenta a gama mais alargada de sistemas CNC. Para além da FANUC existem outras gamas no mercado como a gama SINUMERIK desenvolvida pela Siemens [7].

Os sistemas de controlo CNC têm de desempenhar tarefas com elevada fluidez e rigor metrológico, mas tudo depende do tipo de máquina onde são instalados. Hoje em dia apresentam características muito interessantes do ponto de vista de processamento, têm computadores embutidos e dedicados, interfaces de comunicação muito flexíveis, visualização 3D do processo de maquinação, controlo de múltiplos eixos. Este tipo de controladores tem preços muito altos para aplicar em máquinas de baixo-custo. Existem controladores gerais/genéricos que oferecem soluções praticamente completas do ponto de vista do controlo CNC.

Habitualmente, nos sistemas de baixo-custo, existem dois tipos de interface de comunicação de dados que fazem a diferença perante o interesse do controlo final. As primeiras placas de baixo-custo que surgiram no mercado eram baseadas em interfaces de comunicação através da porta paralela. Dado que os computadores mais antigos disponham todos desta porta de comunicação e sabendo que esta era capaz de transmitir e receber sinais digitais, dispendo de 25 pinos (8 GND, 5 de controlo bidirecional, 8 de dados e 4 de estado) este método de controlo tornou-se muito interessante, tendo como principal vantagem o facto de o processamento de dados estar praticamente todo do lado do computador.

Com o evoluir dos tempos os computadores passaram a adotar de comunicação do tipo série – RS232/USB- do mesmo modo, as placas de controlo CNC também se estão a moldar a

esta tendência embora ainda de forma residual. Em alguns casos é necessário criar conversores para estabelecer comunicação com máquinas antigas quando se usa computadores modernos só com porta USB.

Este facto fez com que o processo de dados passasse a ser mais fácil de executar do lado dos controlados, o que fez com que se necessitasse de recorrer a microcontroladores como forma de criar um interpretador de sinais provenientes do *software* alojado no computador através do sistema de comunicação utilizado.

A grande desvantagem da programação dos microcontroladores é que na sua grande maioria, são programáveis apenas de forma complexa essencialmente para quem apenas sabe os princípios de algoritmia e programação [7].

Várias entidades disponibilizaram no mercado placas pré-montadas prontas a funcionar e a serem programadas de forma mais fácil e apelativa.

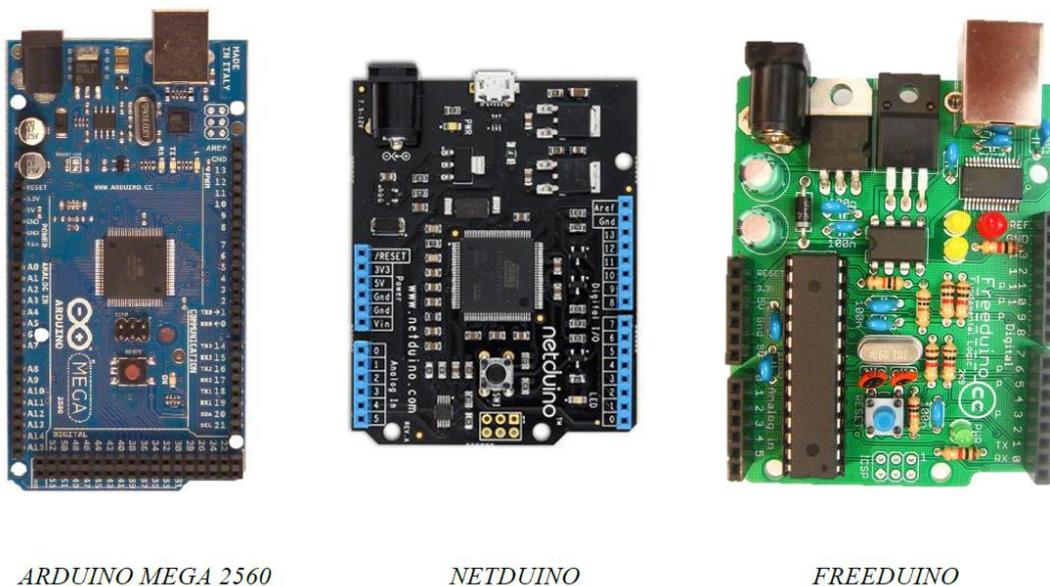


Figura 23 - Placas com microcontrolador de programação [7].

As placas de desenvolvimento apresentadas, tal como a “Arduíno UNO”, são destinadas ao desenvolvimento de aplicações simples, foram construídas com base em código fonte livre, com interfaces que permitem a programação fácil do microcontrolador incorporado na própria placa.

Por outro lado, existem placas de desenvolvimento com características muito mais abrangentes, maior poder de processamento, memória e melhorias (essencialmente eletrónicas) em vários sentidos [7].

2.3.3 Sensores

O uso de sensores nas máquinas de comando numérico está massificado e sem estes seria impossível o correto funcionamento das mesmas. No entanto são muito diversificados os sensores que se podem utilizar nestas máquinas e a sua conexão nem sempre implicam o mesmo número de fios para a sua ligação.

Existem vários tipos de sensores. Numa máquina CNC, podemos ter sensores fim-de-curso, sensores de posição e sensores de velocidade.

Os sensores fim-de-curso, como o nome sugere, são interruptores ou mesmo chaves comutadoras que atuam sobre um circuito no modo liga/desliga quando uma ação mecânica ou ótica acontece no seu elemento atuador.

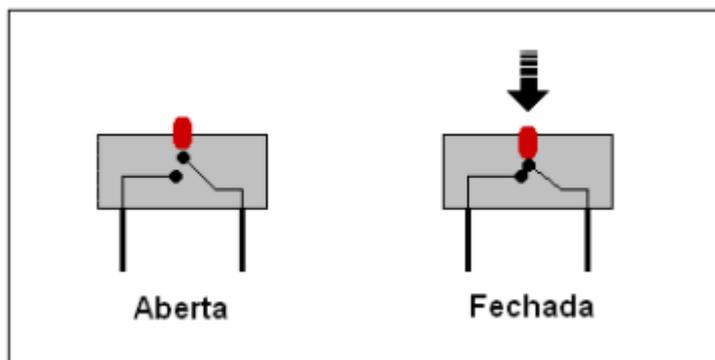


Figura 24 - Exemplo de sensor Mecânico.

A finalidade principal de sensores de fim-de-curso é detetar quando um dispositivo atinge o seu deslocamento máximo, como por exemplo, evitar que um motor continue a funcionar mesmo depois de atingir o ponto máximo pretendido, evitando sobrecarga no motor e no circuito [14].

Os sensores óticos podem servir também como sensores fim-de-curso. Este tipo de sensores tem um elemento de emissão e receção da luz. Quando esse feixe de luz é interrompido abre o circuito como os sensores mecânicos. No entanto os sensores mecânicos têm por principal desvantagem o facto de terem peças móveis sujeitas a desgaste e são mais lentos devido a sua inércia.

Os sensores de posição, designados por encoder, que se encontram entre o motor e o controlador que conta ou reproduz pulsos elétricos a partir do movimento rotacional do seu eixo. O encoder permite fazer a leitura da velocidade, direção e posição do movimento, seja ele rotacional ou linear.

2.3.4 Árvore principal

A árvore de uma máquina-ferramenta é responsável por promover movimento à peça ou à ferramenta. Estas são elementos complexos que necessitam de um projeto apurado e um dimensionamento correto. Grande parte de todos os esforços de maquinação são absorvidos pelas suas chumaceiras, que ligam a árvore à estrutura.

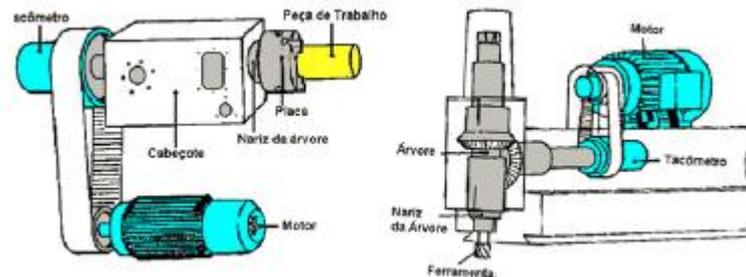


Figura 25 - Ilustração de duas árvores típicas em máquinas-ferramentas.

Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAesYMAF/automacao-cnc?part=2>

O motor para a árvore principal de uma máquina CNC, têm uma grande importância para a qualidade de maquinação. No entanto surgem sempre dúvidas qual será o mais indicado. Existem diversos motores no mercado, resta ao projetista saber qual o que se irá ajustar à sua máquina, isto é, saber os esforços que irão estar em causa no processo de maquinação.

Um método para calcular a potência da árvore a utilizar é através da apara que pretendemos. Para isso é necessário saber o tipo de avanço que se irá utilizar, a penetração da ferramenta e o tipo de material a maquinar.

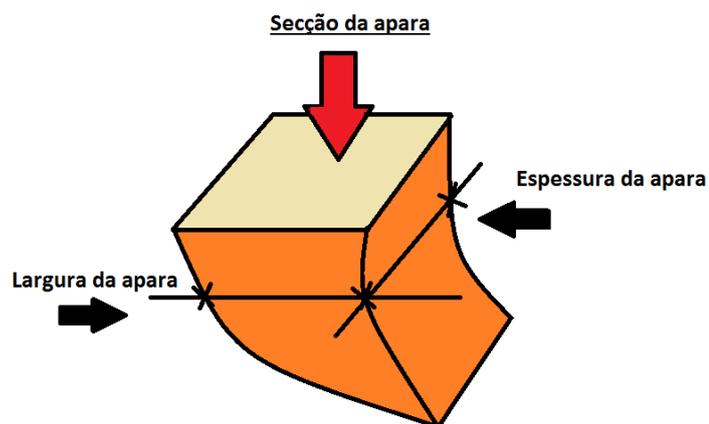


Figura 26 - Ilustração de apara.

A secção da apara pode ser determinada através do produto entre o avanço por rotação, espessura da apara, e o penetramento da ferramenta, largura da apara, como se verifica na equação 1.

Assim temos:

$$S = \text{penetramento} \times \text{avanço por rotação} \quad [1]$$

Para determinar a força de corte, deve-se conhecer o material a maquinar para saber através da tabela 8, qual o coeficiente de força específica (Kc) que se deve utilizar no cálculo, que varia de material para material e do avanço por dente.

Tabela 8-Tabela do Coeficiente de Força Específica.

Fonte: http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/formula4.html

Material	Resistência à Tração e Dureza (MPa)	Coeficiente de Força Específica Kc (MPa)				
		0.1 (mm/dente)	0.2 (mm/dente)	0.3 (mm/dente)	0.4 (mm/dente)	0.6 (mm/dente)
Aço Baixo Carbono (com ligas especiais)	520	2200	1950	1820	1700	1580
Aço Baixo Carbono	620	1980	1800	1730	1600	1570
Aço Duro	720	2520	2200	2040	1850	1740
Aço Ferramenta	670	1980	1800	1730	1700	1600
Aço Ferramenta	770	2030	1800	1750	1700	1580
Aço Cromo-Manganês	770	2300	2000	1880	1750	1660
Aço Cromo-Manganês	630	2750	2300	2060	1800	1780
Aço Cromo-Molibdênio	730	2540	2250	2140	2000	1800
Aço Cromo-Molibdênio	600	2180	2000	1860	1800	1670
Aço Níquel Cromo-Molibdênio	940	2000	1800	1680	1600	1500
Aço Níquel Cromo-Molibdênio	352HB	2100	1900	1760	1700	1530
Aço Inoxidável Austenítico	155HB	2030	1970	1900	1770	1710
Ferro Fundido	520	2800	2500	2320	2200	2040
Ferro Fundido Meehanite	46HRC	3000	2700	2500	2400	2200
Ferro Fundido Duro	360	2180	2000	1750	1600	1470
Ferro Fundido Cinzento	200HB	1750	1400	1240	1050	970
Latão	500	1150	950	800	700	630
Ligas Leves (Al-Mg)	160	580	480	400	350	320
Ligas Leves (Al-Si)	200	700	600	490	450	390
Ligas Leves (Al-Zn-Mg-Cu)	570	880	840	840	810	720

Assim temos que a força de corte (Fc) é o produto entre a secção da avara com o coeficiente de força específica, resistência que o material oferece à deformação.

$$F_c = K \times S \quad [2]$$

Sabendo a Força de corte que necessitamos e arbitrando que a Potência de corte é muito superior à Potência de avanço, pode-se concluir que a Potência efetiva de corte é aproximadamente igual à Potência de corte.

A potência de corte é o produto entre a força de corte calculada pela equação 2 pela velocidade de avanço.

$$P_c = F_c \times V_c \quad [3]$$

Através da potência de corte para o caso mais desfavorável, pode-se aferir a potência pretendida para a árvore principal de uma máquina CNC.

2.4 CAD-CAM

A Informática é uma área de elevado relevo nas máquinas CNC, a elaboração de algoritmos de controlo numérico, assim como a sua análise continua para melhorar e tornar cada vez mais eficiente o algoritmo é um exemplo da contribuição da informática para o desenvolvimento destes equipamentos.

A análise de sinais e sistemas de aquisição de dados, também contribuem para que a informação pretendida seja cada vez melhor e mais rápida.

A tecnologia CAD (*Computer-Aided Design*) veio proporcionar uma maior facilidade ao utilizador, desenhado virtualmente peças que posteriormente são convertidas em códigos para procederem à maquinação da peça. Isto é, do lado do computador é desenvolvido o desenho tridimensional através da tecnologia CAD que posteriormente será convertido em “código G¹³” para ser enviado para o controlador do lado da máquina que irá interpretar e executar as instruções. Essa tecnologia é conhecida por CAM (Computer Aided Manufacturing) [7].

A tecnologia CAD está muito desenvolvida na atualidade. Existem *software* dedicado ao desenho tridimensional que ajuda em muito o utilizador, como por exemplo o *Autodesk Inventor* e o *SolidWorks*.

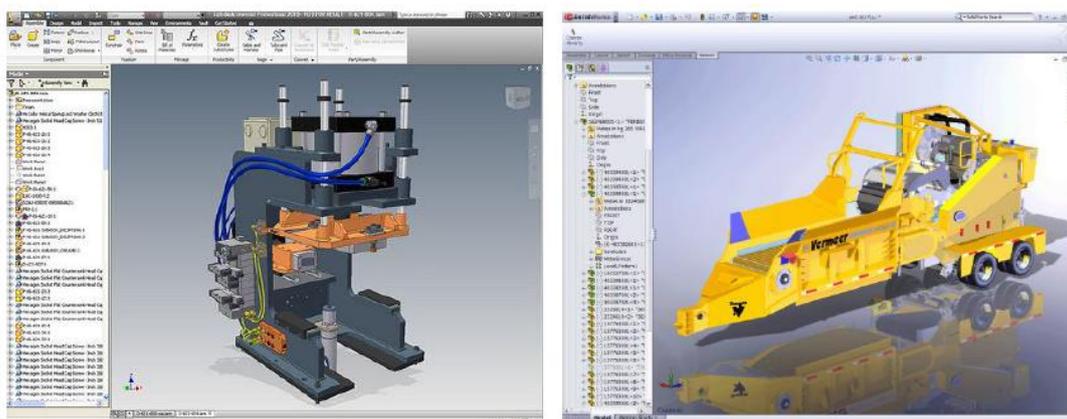


Figura 27 - Autodesk Inventor e SolidWorks. [6]

¹³ É o nome mais comum usar para designar a linguagem de programação relacionada ao controle numérico e suas diversas implementações.

Hoje em dia os programas de tecnologia CAD dispõem de complementos CAM, como Inventor HSM onde se pode simular virtualmente a maquinação das peças desenhadas tridimensionalmente e gerar os “códigos G” para enviar diretamente para a máquina.

Estes complementos têm custos relativamente elevados para poderem ser considerados na utilização de baixo-custo. Para máquinas CNC de baixo-custo existem alguns *softwares* mais baratos e alguns até mesmo gratuitos.

A tabela abaixo apresenta alguns *softwares* livres (*freeware*) e pagos para a tecnologia CAD/CAM em máquinas CNC.

Tabela 9 - Lista de Softwares para CAD/CAM e controlo de máquinas CNC.

CAD		CONTROLO CNC TOTAL	
Programa	Gratuito	Programa	Plataforma
Google sketchup	Sim	Emc2	Linux
Blender	Sim	Axis	Linux
Caligari truespace	Sim	Kcam	Windows 98
Graphiteone cad	Sim	TurboCNC	DOS
Wings 3d	Sim	Mach2/3	Windows
Moi3d	Não	DeskCNC	Windows
Vizion (artcam)	Não	CNCZeus	DOS
SolidWorks	Não	Master5	W95/98/me
Inventor	Não	Deskam	Windows/DOS
Rhinocad	Não	CNCpro	DOS
SolidEdge	Não	USBenc	Windows
AutoCAD	Não	CNCDudez	Windows
Cadkey	Não		
TurboCAD	Não		
Alibre	Não		
CAM		OUTROS INTERESSANTES	
Programa	Gratuito	Programa	Funcionalidades
HeeksCAD/CAM	Sim	SimpleCNC	
G-Simple	Sim	Machinists Tool Box	
FreeMill	Sim	Ace Converter	DXF -> G-code
Dolphin CAD/CAM	Não	CNC Toolkit	
CamBam	Não	ImageToGcode	
Vizion (ArtCam)	Não	NCPlot	Visualizador Gcode
OneCNC	Não	DXF2GCODE	
VirtualGibbs	Não	CNCWrapper	
MasterCAM	Não	FoamWorks	
BOBCAD-CAM	Não	JediCut	
RAM	Não	GMFC	
MeshCAM	Não		
VisualMill	Não		
TurboCADCAM	Não		
DeskCNC	Não		
SheetCAM	Não		
OneCNC	Não		
SprutCam	Não		
EdgeCAM	Não		
ArtCAM	Não		

Após o processamento do Código-G é necessário enviar as linhas de programação para a máquina para se proceder à maquinação. Para isso é necessária a transmissão de dados, de várias maneiras tais como: inserção manual de dados; através de Fitas perfuradas; através de fitas cassetes (fitas magnéticas); através de Disquetes; através da utilização de comunicação RS232C, cuja evolução e desenvolvimento visou principalmente por minimizar a margem de erros de ligação e tempo perdido com a máquina para a inserção desses dados segundo o protocolo DNC (*Direct Numeric Control*).

O protocolo DNC consiste basicamente no envio do programa, bloco por bloco, em modo de texto. O computador que envia o programa apenas aguarda os sinais "X-ON" e "X-OFF", quando o controlador envia o sinal "X-ON", o PC envia blocos, até que o controlador o mande aguardar através do sinal "X-OFF". Sempre que o *Buffer* fica "cheio", a memória armazena os blocos em fila para serem executados.

2.5 CONTROLO

A necessidade de controlar um processo já é bastante antiga. Nasceu no momento em que o Homem passou a manufaturar bens de primeira necessidade. Dessa manufatura saiu o conceito de estruturar os processos envolvidos. Surge então o conceito de processo de manufatura, onde a principal característica do processo era que o Homem era o responsável pelo controlo e pela execução de todos os procedimentos. Esse primeiro conceito consistia num problema de baixa produtividade e a qualidade variar do ser Humano que estivesse a controlar.

Com a criação da máquina a vapor, começou a surgir ideias de para a execução de etapas do seu sistema produtivo. No entanto as primeiras máquinas a vapor não continham elementos de controlo automático, eram dependentes do Homem para controlar as suas ações.

Com a criação do regulador mecânico para controlar automaticamente a pressão do vapor, por James Watt, fez com que o processo de manufatura fosse substituído pelo processo industrial, onde a máquina consegue efetuar uma etapa de um processo autonomamente.

No entanto, só no século XX, é que houve uma grande evolução no controlo com a introdução da eletricidade e os controladores elétricos e eletrónicos, tornando o controlo mais versátil e dinâmico.

A área de controlo visa vários campos relacionados com as máquinas CNC, desde o controlo de fabricação de peças através das cartas de controlo para monitorar o desempenho de um processo, neste caso a verificação de determinadas dimensões após a maquinação, sistemas de controlo analógico ou digital do sinal através dos sensores da máquina, controlo de qualidade do produto acabado, controlo de metrologia entre outros.

No capítulo que se segue, parte prática, é apresentada a escolha dos componentes que foram utilizados para a elaboração da mesma, assim como alguns estudos que foram feitos que findaram em alterações melhorando o desempenho da máquina.

3. Parte Prática

A inexistência de máquinas de controlo numérico na empresa ManLub, Manutenção e Lubrificação Industrial,Lda.¹⁴ e a necessidade de um sistema de gravação de peças maquinadas em fresadoras/tornos convencionais na empresa, levou à elaboração desta máquina.

O objetivo principal foi criar uma máquina CNC capaz de maquinar gravações, aumentando a qualidade das peças realizadas, assim como o aumento da produtividade da empresa.

A máquina desenvolvida na empresa, não só grava peças, como consegue maquinar peças complexas que seriam inexecutáveis em fresadoras convencionais, como será apresentado neste capítulo nos pontos seguintes.

A aplicação prática desta dissertação está estruturada em quatro grandes grupos: a eletrónica e hardware, software de controlo, a mecânica e testes realizados.

A máquina elaborada nesta dissertação segue o princípio de funcionamento de todas as máquinas CNC, desde a ideia do utilizador na elaboração de um código “G” para maquinar até aos movimentos dos eixos da máquina.

- O utilizador disponibiliza o código “G” processado eventualmente por um programa CAM;
- Um programa computacional faz a interação entre o utilizador e a máquina;
- Esse mesmo programa transforma o código “G” em sinais digitais;
- Os sinais são enviados a um sistema eletrónico para o processamento dos sinais;
- Já processados, os sinais são enviados aos drivers dos atuadores;
- Os controladores dos atuadores transformam os sinais processados em movimento mecânico.

¹⁴ Empresa sediada em Valongo com oficina em Rebordosa.

3.1 Eletrónica e Hardware

3.1.1 Controlador geral

A figura 28 apresenta os controladores da máquina CNC, o Arduino UNO e a board CNC de 5 eixos, o controlador que está ligado à máquina é o Arduino Uno havendo a possibilidade de conectar a board CNC. A transmissão dos dados através do Arduino é realizada por porta USB e na board CNC por cabo RS232. O Arduino UNO trata-se de um controlador “aberto”, onde se pode aceder à programação e alterar ou acrescentar conteúdo à programação enquanto a *board* CNC é programada em fábrica e a sua programação inalterável, direcionada para máquinas CNC de 3 a 5 eixos.

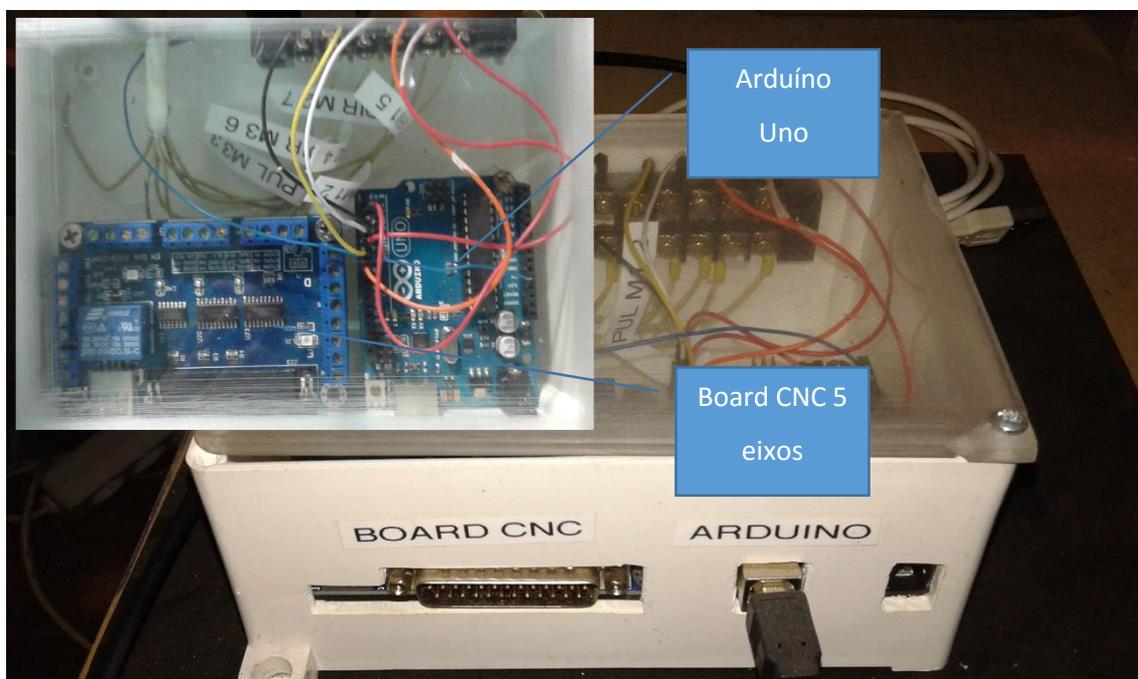


Figura 28 - Controlador Geral Arduíno Uno e Board CNC 5 eixos.

O principal motivo por escolher o Arduino UNO para controlador geral da máquina, é que hoje em dia todos os computadores, essencialmente os portáteis, não dispõem de porta paralela ou porta RS232 mas sim porta USB o que se traduz numa vantagem. Outro motivo por escolher o Arduino Uno é o facto de se poder alterar ou acrescentar programação as vezes que quiser e ser de baixo custo.

3.1.2 Firmware de controlo

O *firmware* é um conjunto de instruções operacionais programadas diretamente numa zona de memória de um dispositivo eletrónico para estabelecer uma relação entre vários

componentes eletrônicos que constituem um dispositivo. O firmware é programado com instruções que vão interpretar determinadas entradas para executar determinadas saídas.

O Arduino Uno utiliza um microcontrolador, “ATMEGA 328P-PU, sinalizado a vermelho na figura 29, que necessita de *firmware* para interpretar sinais para executar saídas.

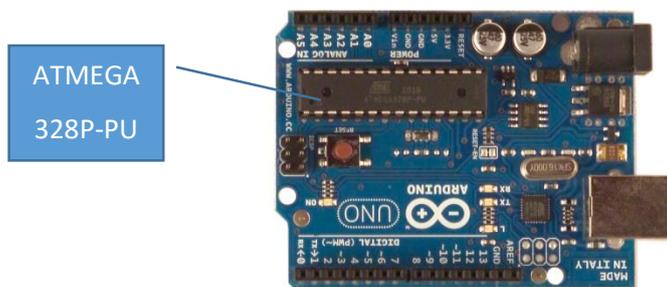


Figura 29 - Arduino Uno.

Deste modo, o Arduino Uno, dispõe de uma zona de memória RAM e uma zona de memória Flash 32K+ EEPROM 1K onde será alojado o *firmware*. Este *firmware* permitirá executar determinados parâmetros nas saídas conforme a leitura das entradas do software instalado no computador ou através de entradas físicas ligadas as entradas do Arduino [15].

A singularidade de o *firmware* ser acolhido na EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*) deve-se ao facto que não perde dados se desligar a alimentação e permite ser apagada ou reescrita várias vezes, o que permite alterar o conteúdo do *firmware* e adapta-lo a uma nova aplicação, o que torna o Arduino um equipamento versátil podendo ser reutilizado em diferentes aplicações [15].

O *firmware* utilizado nesta dissertação é designado de GRBL criado por Simen Skogsrud [16].

Este *firmware* permite um bom desempenho no controlo numérico computadorizado (CNC) devido ao facto de estar escrito em código C otimizado, o que significa que o código foi desenvolvido para utilizar as funções inteligentes que o microcontrolador da ATmel dispõe.

Os programas mais utilizados para o controlo de máquinas de comando numérico estão desenvolvidos para a utilização da porta paralela ou RS232, no entanto é raro o computador portátil ou de pequenas dimensões que disponha dessas portas de comunicação. Através do Arduino e o GRBL permite estabelecer comunicação com a máquina através da porta USB, que está disponível em quase todos os computadores.

O GRBL suporta movimentos lineares, circulares e helicoidais e dispõe de funcionalidades de programação que permite alterar configurações de motores ou de deslocamento enquanto o programa está em funcionamento.

3.1.3 Motores PaP

Os motores escolhidos para a CNC, são motores de passo a passo de ímanes permanentes, porque tem binário estático mantendo a última posição mesmo quando o motor está desligado e devido ao seu excelente binário a baixa rotação proporcionando um posicionamento com elevada precisão. Os motores de passo em relação aos servomotores são mais económicos e mais fáceis de instalar visto que trabalham em malha aberta.

Para calcular o binário necessário do motor, é necessário realizar algumas considerações, assim como alguns dados técnicos a respeito do fuso a ser utilizado, a inércia do rotor do motor que pensamos usar e a carga que será submetida ao deslocamento [17].

Considera-se que o motor está acoplado ao fuso que irá deslocar uma determinada carga conforme a figura 30.

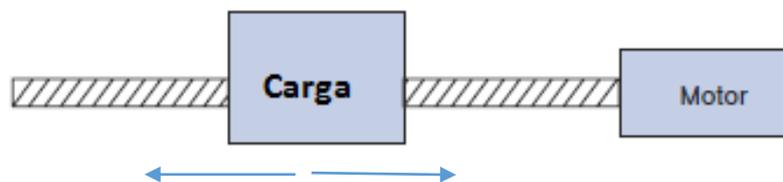


Figura 30 - Esquema de integração entre motor, fuso e carga [17].

Segundo Jacareí, o binário necessário para o motor é definido pela Equação 4:

$$T = 2\pi \times J \times A_c \quad [4]$$

O binário é o produto da inércia com a aceleração, em que T (N.m) corresponde ao binário, J (kg.m²) à inércia do sistema e A_c (rot/seg²) à aceleração.

A inércia (J) corresponde à soma das inércias do rotor, do fuso e da carga. A aceleração é uma estimativa do valor esperado pela experiência do projetista.

A inércia do rotor do motor, que se pensa ser o indicado para esta aplicação, pode-se obter através da tabela 10 com as especificações dos motores.

Tabela 10 - Especificações dos motores PaP.

Electrical Specifications:										
Series Model	Step Angle (deg)	Motor Length (mm)	Rated Current (A)	Phase Resistance (ohm)	Phase Inductance (mH)	Holding Torque (N.cm Min)	Detent Torque (N.cm Max)	Rotor Inertia (g.cm ²)	Lead Wire (No.)	Motor Weight (g)
23HS0601	1.8	41	1.0	5.2	5.5	40	2.5	150	6	470
23HS0405	1.8	41	0.62	12	24	55	2.5	150	4	470
23HS0408	1.8	41	2.0	1.2	2.5	55	2.5	150	4	470
23HS4412	1.8	45	0.62	12	26	80	2.8	190	4	520
23HS4425	1.8	45	2.5	1.0	2.2	80	2.8	190	4	520
23HS5406	1.8	51	0.62	13	28	90	2.8	190	4	560
23HS5410	1.8	51	1.0	5.8	17	90	2.8	190	4	560
23HS5425	1.8	51	2.5	1.2	3.2	90	2.8	190	4	560
23HS5602	1.8	51	0.8	6.8	9.2	70	3.0	230	6	560
23HS6602	1.8	56	1.5	3.2	5.5	80	3.5	280	6	680
23HS6403	1.8	56	2.5	1.2	4.8	110	3.5	280	4	680
23HS6430	1.8	56	3.0	0.8	2.4	110	3.5	280	4	680
23HS6404	1.8	56	4.2	0.4	1.2	110	3.5	280	4	680
23HS6415	1.8	56	1.5	3.6	13.8	110	3.5	280	4	680
23HS7401	1.8	64	1.0	7.5	20	150	5.0	380	4	850
23HS7425	1.8	64	2.5	1.5	4.5	150	5.0	380	4	850
23HS7430	1.8	64	3.0	0.8	2.3	150	5.0	380	4	850
23HS7404	1.8	64	4.2	0.55	1.2	150	5.0	380	4	850
23HS8603	1.8	76	1.5	4.5	7.8	140	6.0	440	6	1050
23HS8425	1.8	76	2.5	1.8	6.5	180	6.0	440	4	1050
23HS8430	1.8	76	3.0	1.0	3.5	180	6.0	440	4	1050
23HS8404	1.8	76	4.2	0.6	1.8	180	6.0	440	4	1050
23HS1430	1.8	100	3.0	1.4	5.5	250	10	680	4	1400
23HS1410	1.8	100	4.2	0.8	3.0	250	10	680	4	1400
23HS2430	1.8	112	3.0	1.6	6.8	280	12	800	4	1700
23HS2410	1.8	112	4.2	0.9	3.8	280	12	800	4	1700

*Note: We can also manufacture products according to customer's requirements.

Fonte: http://www.motionking.com/Products/Hybrid_Stepper_Motors/23HS_Stepper_Motor_57mm_1.8degree.htm

Segundo a tabela 10, pode-se verificar que a inércia para o motor (Jm) 23HS2430 é de 800 g.cm². este valor é equivalente a **80.10⁻⁶ Kg.m²**.

Segundo [17], a inércia do fuso pode ser calculada pela Equação 5:

$$J_f = 762 \times D^4 \times L \quad [5]$$

Para calcular o momento de inércia do fuso como se aproxima de uma forma cilíndrica simples e como são normalmente feitos de aço ou alumínio, pode-se usar a equação 5 baseada nas dimensões, D(m) diâmetro do fuso e L(m) comprimento do fuso, para componentes feitos em aço.

O fuso previsto para aplicar na CNC, é um fuso de 16 mm de diâmetro em que o comprimento máximo é de 650 mm com passo de 5mm.

Se $D=16 \times 10^{-3}$ m e $L=0.65$ m, temos que $J_f=32 \times 10^{-6}$ kg.m²

A carga também é estimada de acordo com a experiência do projetista, deve-se calcular o pior caso. A carga prevista para o eixo mais carregado será igual a 80 Kg.

Segundo [17], para um sistema de parafuso, a inércia referente à carga é aproximadamente calculada pela Equação 6:

$$J_w = (W \times p^2) / (4 \times 10^7) \quad [6]$$

A inércia referente à carga é igual ao produto da massa W(kg) com o passo do fuso p(mm). Portanto $J_w=50 \times 10^{-6}$ kg.m², visto que W=80Kg e p=5mm.

A inércia total é igual à soma das três parciais já calculadas, a inércia do rotor do motor, a inércia do fuso e a inércia referente à carga movimentada. Somando estas três inércias parciais obtemos que $J_t= 162 \times 10^{-6}$ kg.m².

Considera-se ainda que a eficiência do fuso, o coeficiente de atrito dos rolamentos e o desalinhamento do eixo do motor e fuso aumente a inércia em até 60 %.

Assim obtém-se uma inércia total de 259.2×10^{-6} kg.m².

Estes cálculos foram efetuados com a finalidade de deslocar uma carga, nas máquinas CNC, temos deslocamento de cargas, mas também temos os esforços de maquinação que provoca alterações da inércia total. Para ser rigoroso no dimensionamento dos motores, será necessário fazer uma análise das forças presentes na maquinação, como se trata de uma máquina para gravações, as forças exercidas pela fresa não serão muito elevadas, no entanto deve-se subdimensionar a escolha dos motores para que se possa maquinar peças que implicam forças mais elevadas do que no processo de gravação.

O último parâmetro para calcular o binário é a aceleração. As máquinas existentes no mercado, tem uma velocidade máxima de trabalho na ordem de 3500 mm/min para motores do género do 23HS2430. Esse valor corresponde a 0.085 segundo para percorrer um passo (5mm). O movimento mais comum dos eixos são movimentos trapezoidais, ou seja, inicia o movimento em zero aumentando até a velocidade máxima, mantem a velocidade constante e começa a diminuir a velocidade até parar. Segundo [17], é possível determinar a aceleração pela equação 7.

$$Ac = \frac{4.5 \times D}{t^2} \quad [7]$$

A aceleração irá depender do D, rotações e t em segundos. Assim se a carga se movimenta 5mm (1 rotação completa) em 0.085 segundos, temos que **Ac= 622,8 rot/s²**.

Substituindo os valores calculados na equação 4, encontra-se o valor do binário estático exigido ao motor. Esse binário é o estimado para cumprir os requisitos máximos da máquina.

Assim temos que:

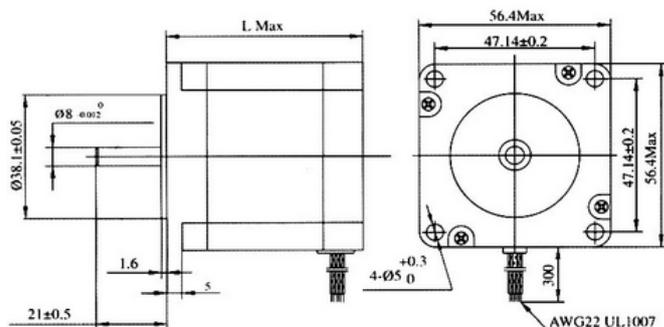
$$T = 2\pi \times 0.0002592 \times 622.8$$

$$T = 1.0142 \text{ N.m}$$

O motor 23HS2430 tem uma capacidade de 2.8 N.m, bem superior ao binário necessário para o projeto. No entanto o preço entre este motor e um motor de capacidade inferior não é significativo. Foi então selecionado o motor 23HS2430, alcançando assim uma elevada capacidade de binário aumentando a capacidade de maquinação da máquina podendo trabalhar para além das gravações.

Características do motor 23HS2430:

Drawing:



General Specification:

Step angle accuracy: $\pm 5\%$ (full step, not load)
 Resistance accuracy: $\pm 10\%$
 Inductance accuracy: $\pm 20\%$
 Temperature rise: 80°C Max (rated current, 2 phase on)
 Ambient temperature ----- $20^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$
 Insulation resistance: $100\text{M}\Omega$ Min, 500VDC
 Insulation Strength ----- 500VAC for one minute

Wiring:

Red: A+
 Green: A-
 Yellow: B+
 Blue: B-

Fonte: <http://www.ebay.com/itm/3-axis-Nema23-stepper-motor-425oz-in-400W-power-supply-CNC-controller-kit-/300488126022?ssPageName=ADME:L:OC:GB:3160>

Figura 31 - Características e especificações gerais do motor PaP.

3.1.4 Drivers dos motores PaP

O driver selecionado para controlar o motor 23HS2430, foi o CW5045.

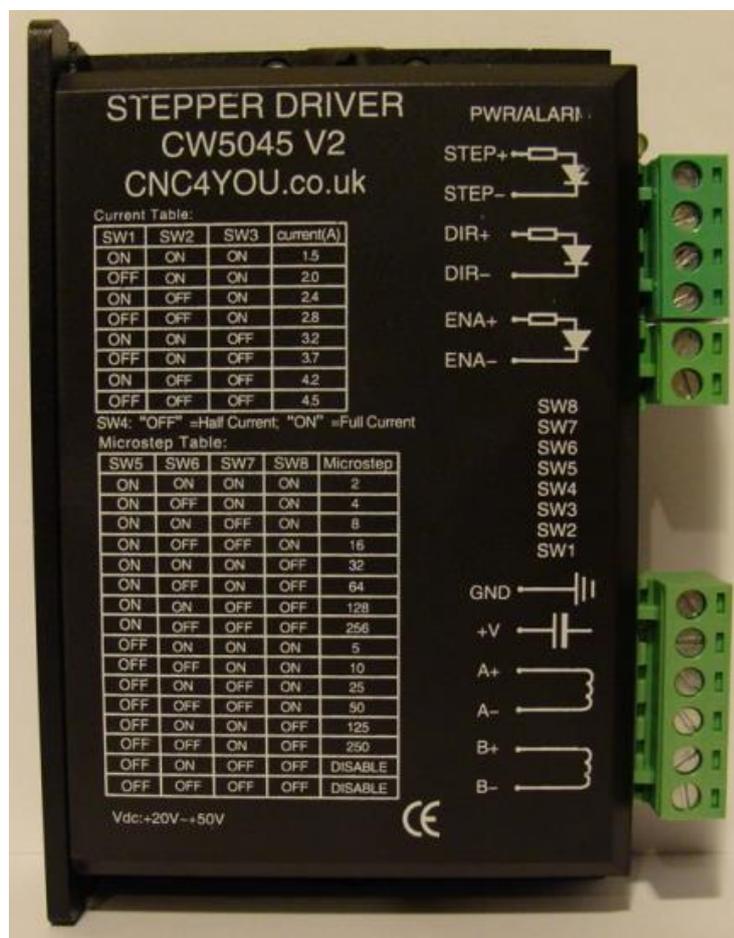


Figura 32 - Stepper driver CW5045 V2.

É um driver robusto, acessível, com possibilidade de controlar motores bipolares ou unipolares, é alimentado de 20V a 50V, pode-se variar a corrente de alimentação através da regulação dos interruptores variando de 1.5A – 4.5A e ainda existe a possibilidade de escolher o passo consoante o fuso métrico ou *imperial* instalado na máquina.

Descrição dos pinos:

- VCC+: Ligação da fonte de alimentação DC positiva;
- GND: Ligação da fonte de alimentação DC negativa;
- A+,A-: Ligação do enrolamento da primeira fase do motor;
- B+,B-: Ligação do enrolamento da segunda fase do motor;
- STEP+,STEP-: Ligação dos pulsos de 5V com duração de 10 μ s;
- DIR+,DIR-: Ligação da direção do motor;
- ENA+,ENA-: Permitir a entrada do motor. Deixar aberto se não for necessário;

Para configurar o driver com o motor selecionado é necessário colocar os interruptores no estado correto. A tabela 11 mostra as várias possibilidades de configuração.

Tabela 11 - Configuração do driver.

SW1	SW2	SW3	Current (A)
ON	ON	ON	1.5
OFF	ON	ON	2
ON	OFF	ON	2.4
OFF	OFF	ON	2.8
ON	ON	OFF	3.2
OFF	ON	OFF	3.7
ON	OFF	OFF	4.2
OFF	OFF	OFF	4.5

SW4 OFF = HALF CURRENT SW4 ON = FULL CURRENT

SW5	SW6	SW7	SW8	Microstep
ON	ON	ON	ON	2
ON	OFF	ON	ON	4
ON	ON	OFF	ON	8
ON	OFF	OFF	ON	16
ON	ON	ON	OFF	32
ON	OFF	ON	OFF	64
ON	ON	OFF	OFF	128
ON	OFF	OFF	OFF	256
OFF	ON	ON	ON	5
OFF	OFF	ON	ON	10
OFF	ON	OFF	ON	25
OFF	OFF	OFF	ON	50
OFF	ON	ON	OFF	125
OFF	OFF	ON	OFF	250
OFF	ON	OFF	OFF	DISABLE
OFF	OFF	OFF	OFF	DISABLE

Fonte: <http://www.astrosurf.com/mcmtii/images32/CW5045.pdf>

O motor selecionado anteriormente requer 3 A de corrente, como se pode confirmar através da tabela 10. Assim temos que configurar o driver para uma corrente de 2.8A, colocando o SW1 - OFF, o SW2 - OFF e o SW3 - ON, pretende-se a corrente total selecionada, coloca-se o SW4 - ON. O motor em cada passo roda 1.8°, em 360°, implica dar 200 passos para percorrer uma volta completa. O passo do fuso previsto é de 5mm, chega-se à conclusão que em 200 passos, uma volta completa, anda 5mm. Para simplificar configurou-se para 1/5 métrico o driver, assim implica que quando o motor rodar 200 passos a porca se desloque 1 milímetro, assim coloca-se o SW5 - OFF, SW6 - ON, SW7 - ON e SW8 - ON, como está ilustrado na figura 33.

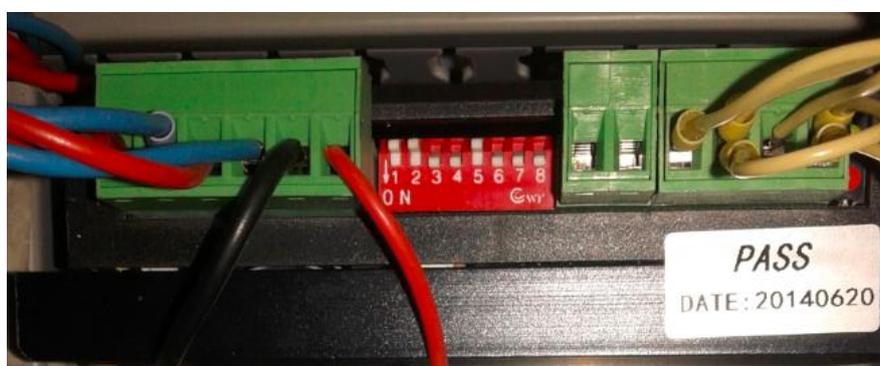


Figura 33 - Configuração dos interruptores.

3.1.5 Transformador

Para alimentar os drivers dos motores, é necessário um transformador que reduza a tensão dos 230 Volts para entre 20 Volts a 50 Volts que se trata da capacidade de alimentação de cada driver. Esse mesmo driver tem de possuir uma corrente superior a 9 A, pois se considerarmos o caso mais excessivo, os três motores a trabalhar em simultâneo e se cada um consumir aproximadamente 3 A, necessitamos de uma corrente de saída superior a 9 A.

O transformador selecionado apresenta como corrente de saída 11 A, com frequência de saída 47-63Hz, voltagem de saída 36 Volts e potência de 400W.



Figura 34 - Transformador 230V/36V.

Sabendo que cada motor consome aproximadamente 3 A e que a tensão de saída do transformador é de 36 V, obtemos uma potência 108W por motor. Se tivermos os três motores a funcionar em simultâneo temos uma potência de 324W. Sendo o transformador de 400W, conclui-se que foi bem selecionado.

3.1.6 Sensores

Para segurança da máquina é necessário colocar fins-de-curso para limitar o máximo e mínimo em cada eixo. Assim foi escolhido um sensor ótico para colocar nas extremidades de cada eixo, limitando o movimento do mesmo para salvaguardar a estrutura da máquina se ocorrer algum erro de programação.

O sensor escolhido foi o *F04660 Optical Endstop*, como está ilustrado na figura 35. É um sensor de custo reduzido, pode ser ligado ao Arduíno, uma vez que é alimentado a 5V e o sinal de saída é 0V (ou valor reduzido) se estiver aberto e 5V (ou valor inferior mas elevado em relação ao estado aberto) se estiver interrompido.

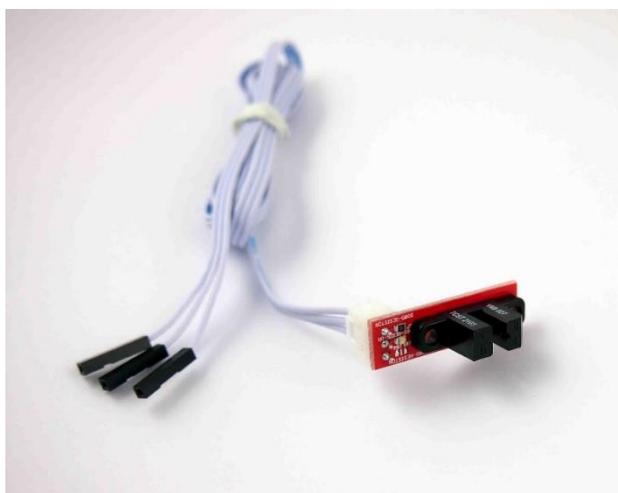


Figura 35 - Sensor F04660 Optical Endstop.

Este sensor apresenta um Led que indica o estado em que se encontra. Quando o Led está desligado, significa que está interrompido e o sinal que sai do sensor é de aproximadamente 5V.

Quando o Led está ligado, significa que não está interrompido e o sinal que sai do sensor é de 0V ou valor muito baixo



Figura 36 - Sensor ótico interrompido e aberto.

3.1.7 Motor da árvore principal

Inicialmente foi colocado como motor da árvore principal uma mini furadora elétrica com velocidade regulável, mas de baixa capacidade de maquinação. Não aguentava os esforços exercidos e provocando vibrações no material maquinado.



Figura 37 - Mini furadora da árvore principal.

Devido à má maquinação, foi necessário substituir o motor por outro que fosse apropriado. Assim fez-se um estudo da potência de corte necessária para um determinado processo de maquinação.

Para um processo de desbaste de alumínio, utilizando uma fresa de duas navalhas de diâmetro 5mm; profundidade de corte de 0.5mm; largura de corte da apara de 0.2mm; Velocidade de corte de 30m/min; Avanço por dente de 0.1 e rendimento do motor de 80%.

Como é evidenciado anteriormente, primeiramente é necessário calcular a secção da apara em que consiste no produto da largura da apara com o penetramento da ferramenta:

Penetramento da ferramenta = 0.5mm

Largura da apara = 0.2mm

Assim, obtém-se uma secção de 0.1mm².

Após calculada a secção da apara é necessário determinar o coeficiente de força específica, relacionando o tipo de material a maquinar, alumínio, com o avanço por dente (0.1 mm/dente) na tabela 8. Relacionando estas duas variáveis, obtém-se um Kc de 580 MPa.

Utilizando uma velocidade de corte de 30m/min e uma fresa de diâmetro 5mm, através da equação 3, calcula-se uma velocidade de rotação de 1910 r.p.m.

Sabendo a velocidade de rotação, pode-se determinar a velocidade de avanço, utilizando a equação 2. Resultando uma velocidade de avanço de 382 mm/min.

Reunindo estes parâmetros todos e sabendo que o motor pode ter um rendimento na ordem dos 80%, pode-se determinar a potência de corte através da equação 4.

Portanto, Pc=0.461 Kw, sabendo que S=0.1 mm², Kc=580 MPa, Vf=382 mm/min e rendimento=80%.

A seleção no novo motor para árvore principal da CNC, deve ter uma potência de saída acima dos 0.461KW, uma rotação superior a 1910 r.p.m, regulável, e rolamentos capazes de absorver os esforços exercidos no processo de maquinação.

Reunindo estes requisitos, o motor da Kress 1050 FME foi o selecionado. O motor possui de 6 velocidades reguláveis até uma velocidade máxima de 29000 r.p.m, uma potência de saída de 600 watts, suporta pinças de aperto até diâmetro 8 e possui rolamentos de esferas duplos para um melhor desempenho de fresagem.



Figura 38 - Motor Kress 1050 FME.

3.1.8 Esquema da ligação elétrica

Para facilitar as ligações dos componentes elétricos, foi elaborado uma ilustração que mostra como se deve interligar todos estes componentes.

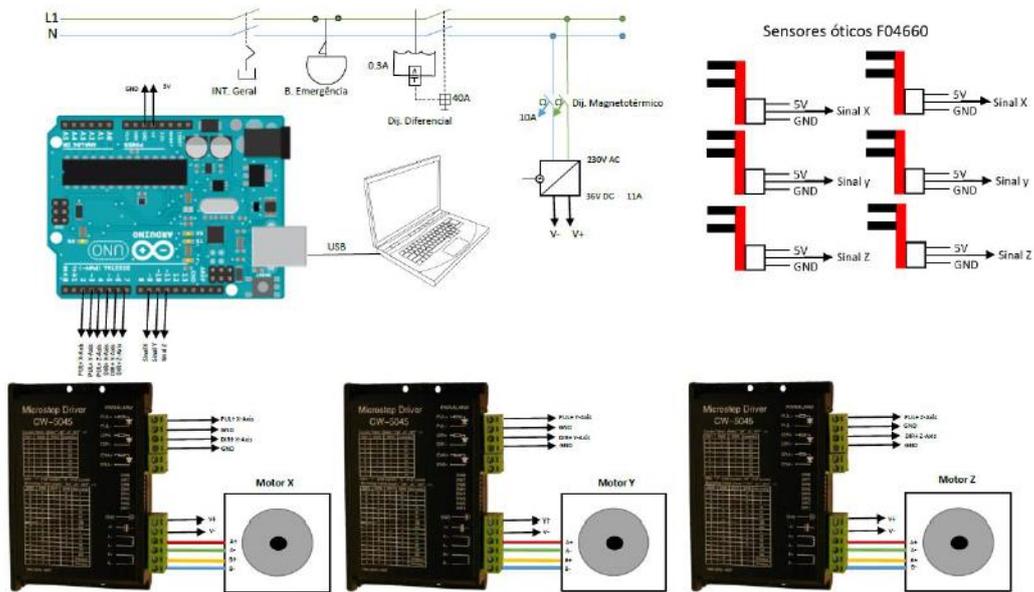


Figura 39 - Esquema da ligação elétrica.

Este esquema das interligações dos diversos componentes encontra-se no anexo B em maior escala.

Para facilitar a substituição dos motores, foram colocadas fichas de conexão rápida nos seus terminais como está ilustrado na figura 40.

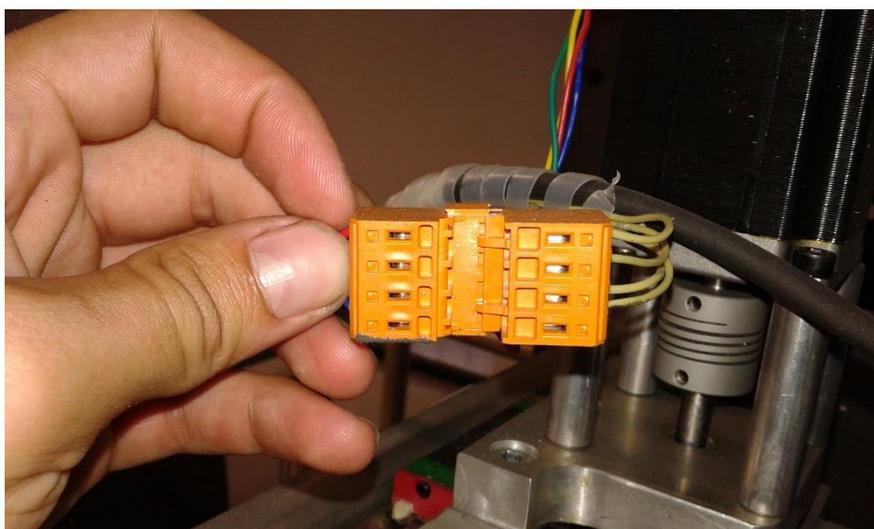


Figura 40 - Conexão rápida dos motores PaP.

3.2 Software de controlo

3.2.1 Software de comunicação

As máquinas CNC possuem um interface para carregar os arquivos necessários para a maquinação. As características que contribuem para um bom software de controlo são:

- Fácil operação;
- Execução em tempo real;
- Baixo custo;
- Fácil atualização;
- Fácil instalação e configuração.

Para transmitir o código gerado pelo software CAD, é utilizado um software JAVA, *Universal GcodeSender*, que permite comunicar com o Arduino via USB, movimentando os eixos por intermedio dos controladores dos motores.

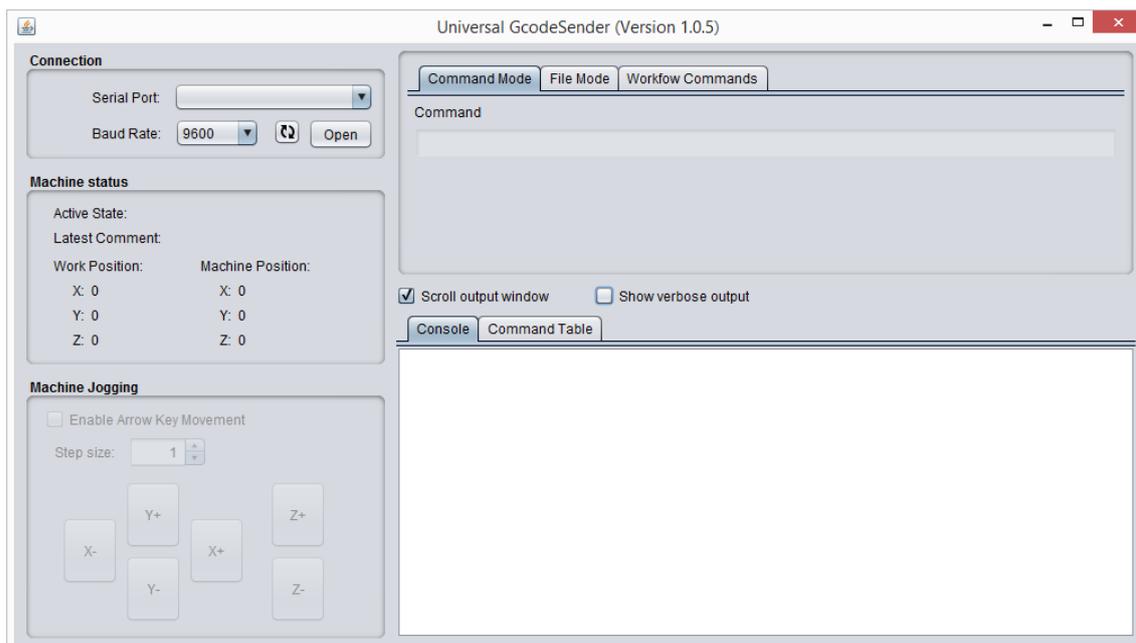


Figura 41 - Software Universal GcodeSender.

Este software depois de estabelecer comunicação com o Arduino é necessário configurar os parâmetros.

Para ter acesso aos parâmetros, deve-se escrever na linha de comando duas vezes o símbolo do dólar (\$\$), como mostra a figura42.

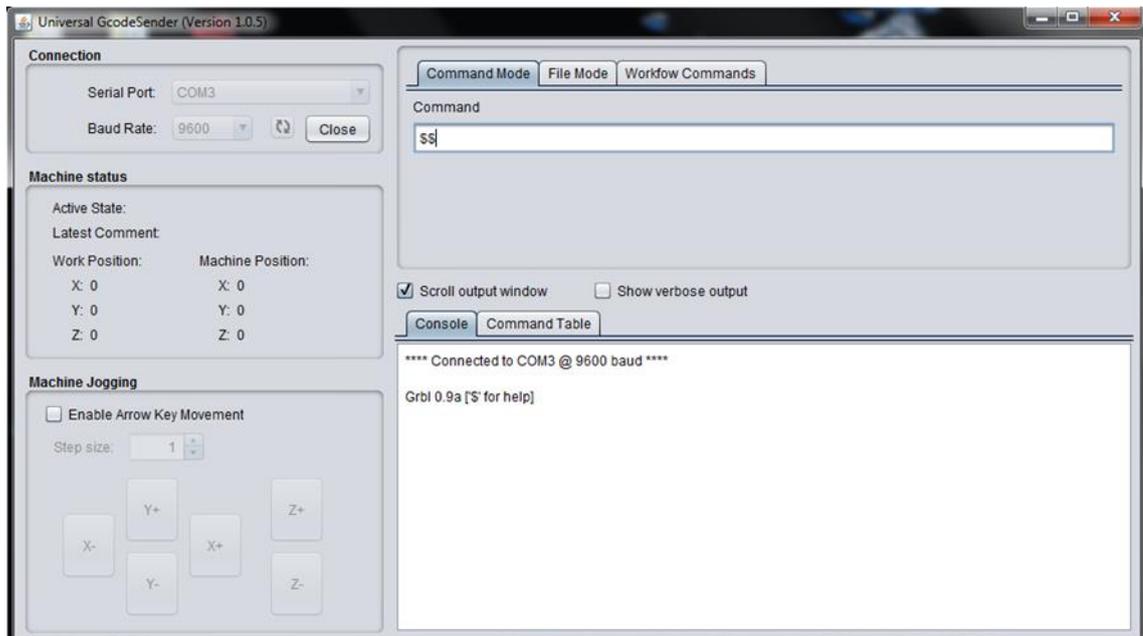


Figura 42 - Software Universal GcodeSender configuração.

Após a introdução dos símbolos, \$\$, na linha de comando, irá aparecer na consola uma lista dos parâmetros.

Estes parâmetros dizem respeito à configuração da máquina. Desde a velocidade da máquina em vazio, aceleração, resolução dos arcos, sensores fim-de-curso ativos ou inativos.

Estes parâmetros encontram-se explicados ao pormenor na página da internet, <https://github.com/grbl/grbl/wiki/Configuring-Grbl-v0.8>.

Para a máquina desenvolvida nesta dissertação os três primeiros parâmetros dizem respeito à quantidade de passos que o motor deve dar para que se desloque 1 mm. O fuso aplicado na máquina tem um passo de 5mm, que corresponde andar 5mm numa volta completa do motor. Na configuração dos drivers dos motores selecionou-se 1/5, fazendo com que se ande 1mm numa volta completa do motor. Assim como o motor selecionado roda 1.8° por passo, necessita de 200 passos para rodar 360°. Em suma para a máquina se deslocar 1 mm, necessita de 200 passos.

3.2.2 Software CAD/CAM

Existem vários softwares CAD CAM no mercado hoje em dia. Neste projeto, foi utilizado o inventor com a extensão HSM, uma vez que foi lecionado durante o mestrado.

Este software permite desenhar tridimensionalmente e simular virtualmente a maquinação das peças desenhadas.

O inventor auxiliou não só na simulação de maquinação de peças, como o desenvolvimento completo da máquina com análise de tensões.

O HSM ainda contempla de uma função para transmitir os códigos desenvolvidos com as máquinas CNC.

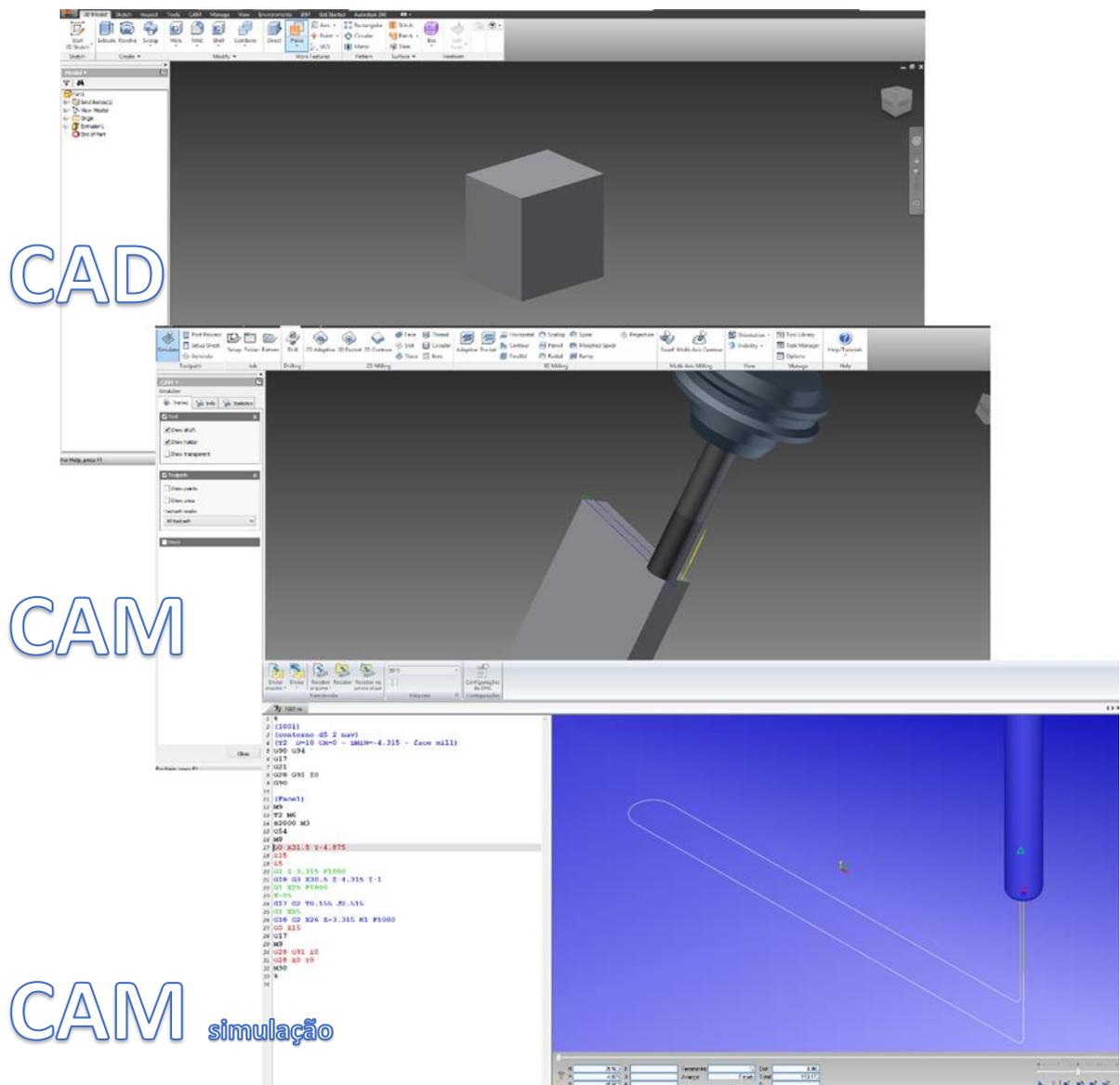


Figura 43 - Janelas das variáveis do Inventor.

3.3 Parte Mecânica

3.3.1 Estrutura

A estrutura¹⁵ da máquina CNC desenvolvida nesta dissertação está dividida em partes menores com arranjos geométricos simples para facilitar a maquinação de todas as partes, assim facilita o transporte da máquina como a sua montagem. Estes arranjos traduziram-se numa máquina de bancada com 2 eixos na estrutura da árvore, como se pode verificar na figura 44 do modelo inicial da CNC.

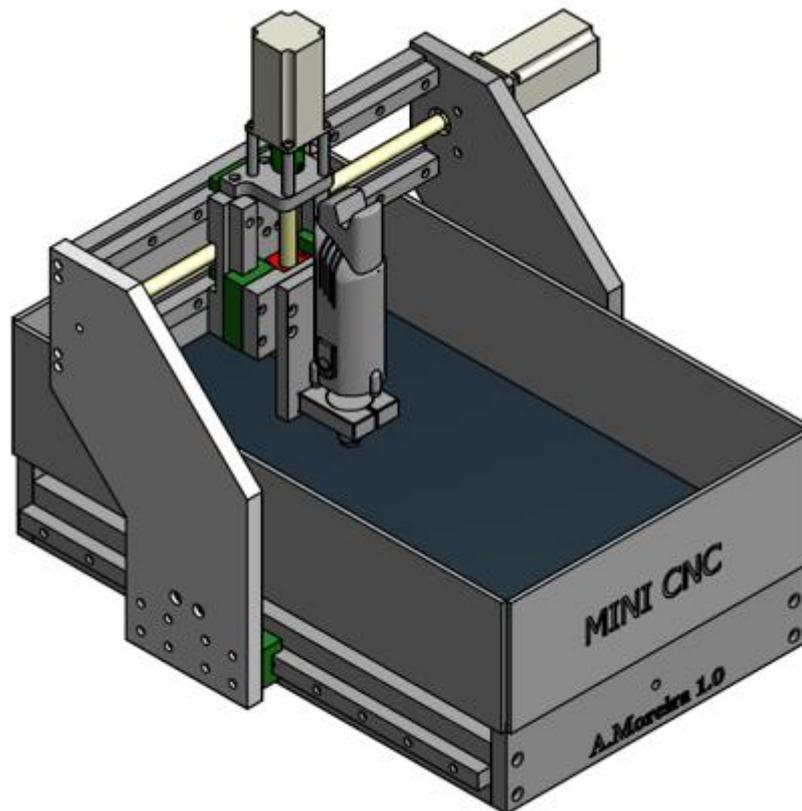


Figura 44 - Modelo inicial da CNC.

Relativamente ao material da estrutura da máquina, tratando-se de uma máquina de dimensões pequenas e como finalidade a gravação em peças, foi selecionado o alumínio laminado por ser excelente à corrosão, leve, resistente (depende da sua secção), excelentes propriedades para maquinação.

¹⁵ Todas as peças que foram projetadas para a máquina, encontram-se em 2D no anexo C.

3.3.2 Fusos

Como foi referido anteriormente nos cálculos para a seleção dos motores PaP, os fusos escolhidos são fusos de diâmetro 16mm e passo de 5mm.

Os fusos escolhidos foram os SFU 1605-3¹⁶. Juntamente com o fuso foi encomendado a porca de esferas como se vê na figura 45.



Figura 45 - Conjunto fuso + porca de esferas SFU1605-3.

Como se verifica através da figura 45, o fuso não vem maquinado nas extremidades, havendo a necessidade de tornear o fuso para as dimensões necessárias para conectar ao motor. Num dos lados será maquinado para colocar um rolamento 6001 a fazer de batente e no lado oposto outro rolamento 6001 com um prolongamento para conectar o motor através do acoplamento.

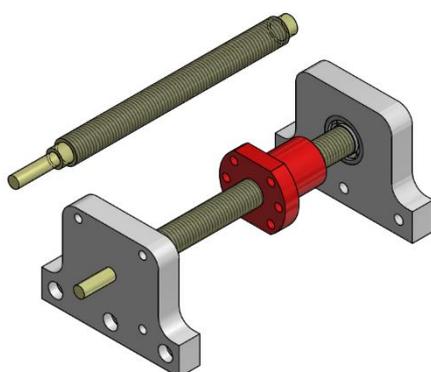


Figura 46 - Modelo do fuso maquinado.

¹⁶ No anexo D, encontra-se a tabela com as características dimensionais do fuso.

3.3.3 Acoplamento

Inicialmente, foi pensado construir um acoplamento rígido, como ilustra a figura 47, para garantir o alinhamento do motor com o fuso.



Figura 47 - Modelo do 1º Acoplamento.

Após análise de algumas máquinas similares à que foi projetada, chegou-se à conclusão, que o acoplamento deveria ser flexível. Pois permite o reajuste de pequenos desalinhamentos do motor com o fuso e ainda previne o controlo dos esforços aplicados, funcionando como um fusível mecânico. Assim optou-se por um acoplamento flexível feito em duralumínio e resistente a um binário máximo de 2N.m, figura 48.



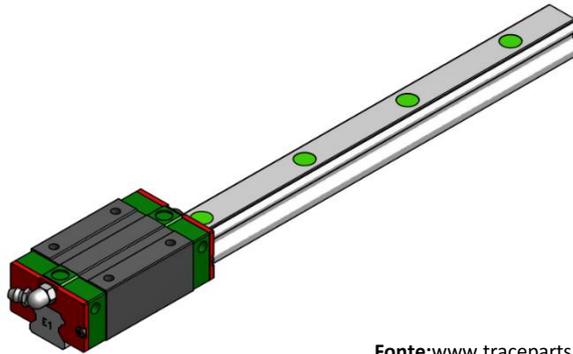
Figura 48 - Acoplamento flexível.

3.3.4 Guias Lineares

Nas máquinas CNC é de extrema necessidade a transmissão de precisão por parte dos motores as diversas partes mecânicas da máquina. Assim as guias lineares devem possuir o mínimo de folga mecânica, excelente rigidez e deslocamentos suaves.

As guias selecionadas, foram da HIWIN, em que o patim tem referência HGH-20-CA-ZA-H, traduz se num patim da serie HG, de bloco quadrado, tamanho 20mm, com possibilidade de ser montado horizontalmente ou verticalmente. É um patim de alta precisão usado nas máquinas industriais de precisão.

A guia para esse patim tem como referência HGR-20- (Comprimento) -C com tolerâncias de altura que varia dos 12 aos 37 μm consoante o comprimento da guia.



Fonte:www.traceparts.com

Figura 49 - Modelo da Guia Linear.

As características dimensionais do patim e da guia encontram-se no anexo 4.

3.3.5 Fixação do motor PaP

A fixação dos motores de passo à estrutura da máquina é feita por quatro peças cilíndricas em alumínio.

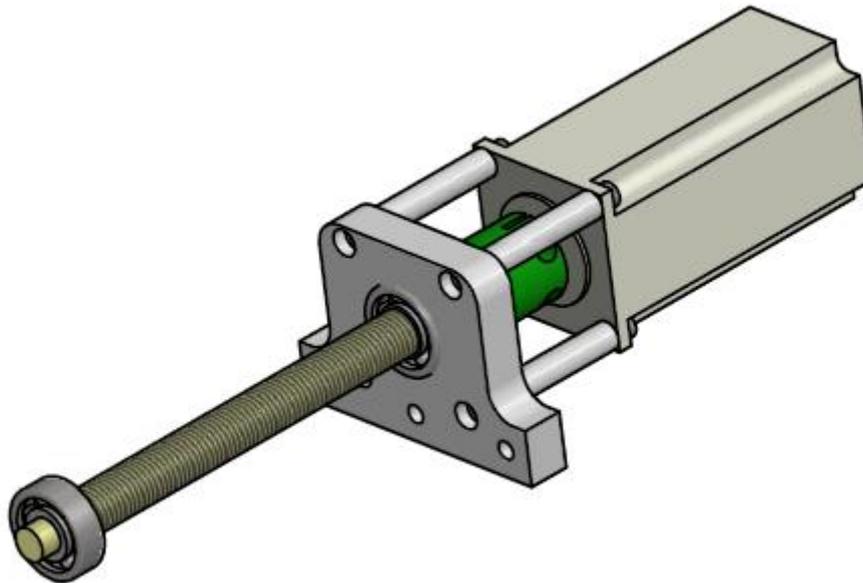


Figura 50 - Modelo da fixação do motor de passo.

Essas quatro peças fixam o motor de maneira a que o espaço ocupado pelos parafusos que irão segurar seja mínimo, havendo espaço suficiente para o acoplamento que está aplicado no motor e no fuso.

3.3.6 Fixação do motor da árvore

O sistema de fixação inicial para a mini drill, era constituído por duas peças de alumínio, onde havia a fixação por meio de aperto, figura 51.

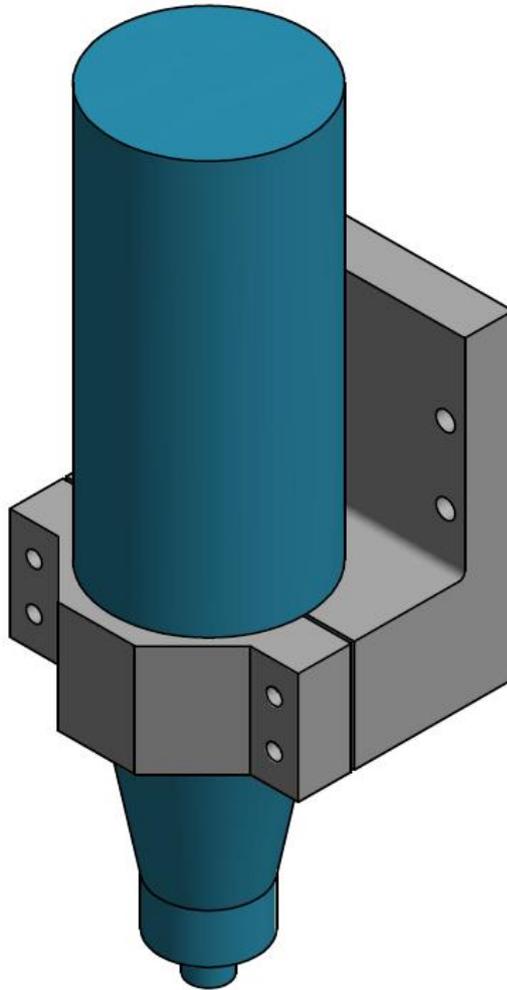


Figura 51 - Primeiro suporte para fixação do motor da árvore.

Como a mini drill não era apropriada para o processo de maquinação, nem para ser fixada a qualquer estrutura, houve a necessidade de substituir o motor da árvore principal pelo motor da Kess. Devido a estrutura deste novo motor, idealizou-se uma estrutura nova apropriada para fixar o motor. De modo aproveitar a furação do primeiro suporte na estrutura da máquina, construiu-se um segundo suporte, figura 52.

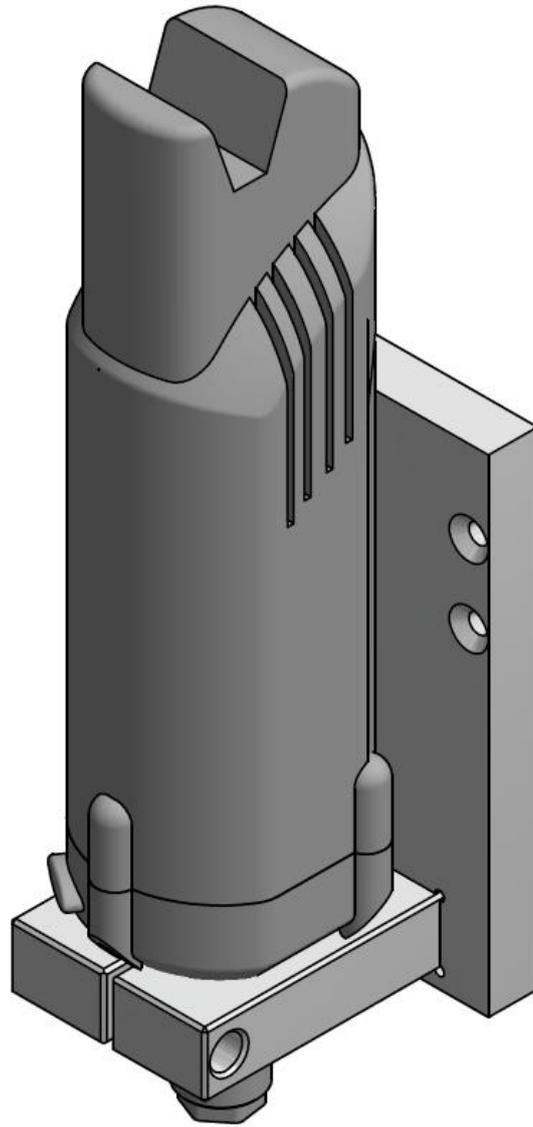


Figura 52 - Segundo suporte para fixação do motor da árvore.

A fixação do motor a este suporte é através de uma peça de aperto, numa zona do motor apropriado à sua fixação. Existia várias propostas, por parte da empresa que fornece o motor Kress, do sistema de fixação. No entanto optou-se por este sistema por ser simples e de rápida maquinação.

A simplicidade do suporte de fixação também irá diminuir os esforços do motor de passo no eixo do z, visto que houve diminuição de massa em relação ao primeiro suporte.

3.3.7 Análise de tensões de mesa de trabalho

Inicialmente foi aplicado na CNC, uma mesa de trabalho de 10mm de espessura de alumínio, onde seriam fixadas as peças a maquinar.

Durante a fase experimental, ao realizar as primeiras gravações, verificou-se que existia zonas da peça que não eram gravadas com a mesma profundidade.



Figura 53 - Gravação em peça de nylon.

Como se pode comprovar através da figura 53, existe um desfasamento de profundidade da esquerda para a direita.

Para verificar a flexão devido a base de alumínio, colocou-se um comparador na árvore principal, numa extremidade a 0, e fez-se deslocar de 10 em 10 mm no eixo do X, registando os valores apontados no comparador, como ilustra a figura 54.

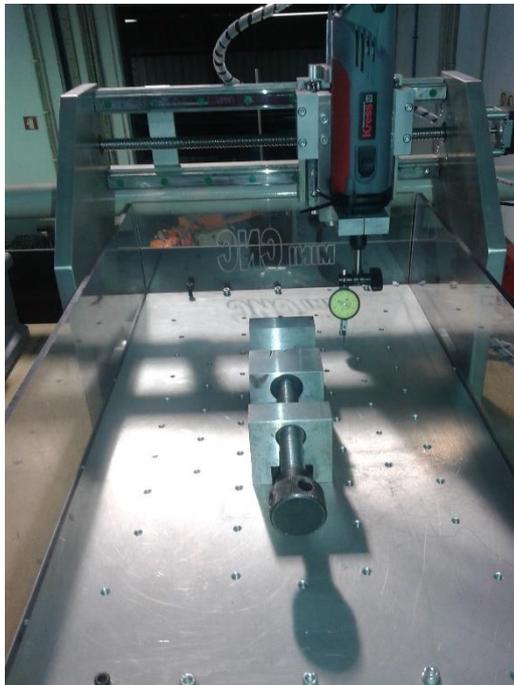


Figura 54 - Verificação experimental do desfasamento em Z.

Na base da máquina, encontra-se uma prensa que fixa as peças de pequenas dimensões para serem maquinadas. Esta prensa tem de massa 5kg.

Após a recolha dos dados verificou-se o seguinte:

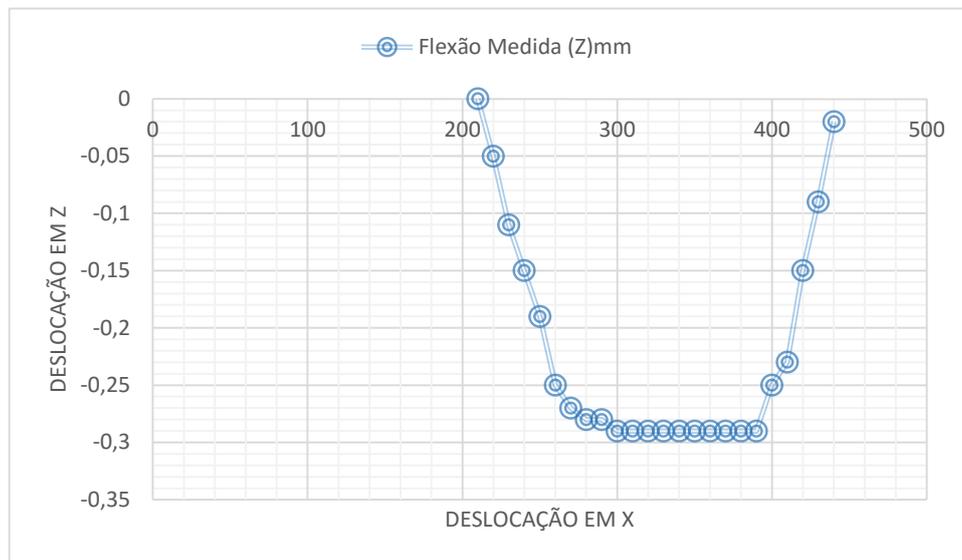


Gráfico 4 - Resultados do desfasamento em Z.

Com base no gráfico 3, conclui-se que de facto existe uma flexa na zona central, onde está colocada a prensa, que pode ser a origem dos problemas da irregularidade de profundidade de gravação.

Para comprovar o desfasamento existente, fez-se uma análise de tensões, através do software Autodesk Inventor.

Após desenhado o modelo tridimensional, existe uma opção designada de “Análise de Tensões” no menu “Aplicações” do Inventor, onde contém um conjunto de ferramentas que simulam as condições reais de funcionamento, definindo o tipo de material, aplicação das cargas, pressões, tipos de apoios e apresentações de resultados.

Nesta simulação, após a apresentação dos resultados, pode-se verificar os valores das tensões obtidas pela simulação, comparando-as com os valores limite de tensão do material.

O inventor oferece comandos que permitem o refinamento da malha, pois para ocasiões onde se prevê uma concentração de esforços, considera-se nesse ponto uma malha mais fina para obter um resultado eficaz das características específicas.

Como se pode ver na figura 54, a prensa está a provocar uma pressão na base de alumínio. Essa pressão tem de ser calculada para poder simular computacionalmente o desfasamento provocado pela mesma na placa de alumínio.

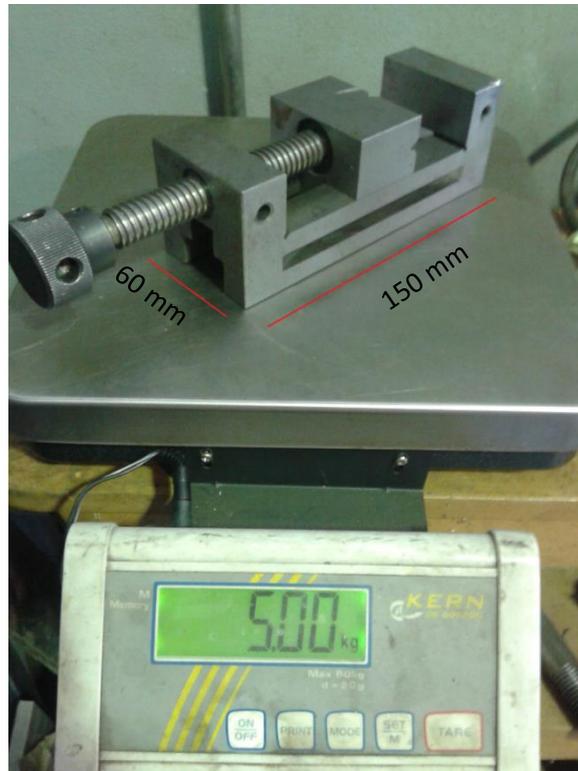


Figura 55 - Dimensões e massa da prensa.

Para determinar a pressão exercida pela prensa, basta dividir a força que a mesma está a aplicar na área em contacto. Assim temos que a força é aproximadamente 50 N e que a área é 0.009 m^2 . Resultando de uma pressão de 5555.5 Pa.

Após a simulação da base da CNC em alumínio, restringida nas extremidades e com uma pressão de 0.0055 MPa, obteve-se o seguinte resultado em relação ao desfasamento.

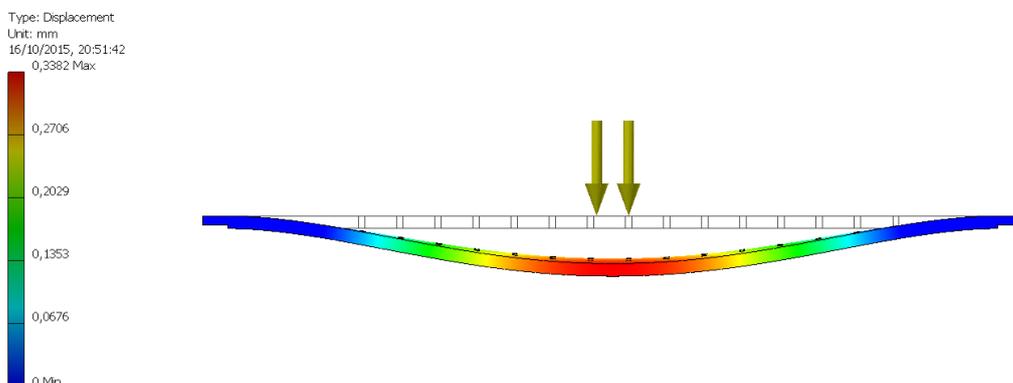


Figura 56 - Resultado da simulação sobre a flexão no tampo de alumínio.

O resultado máximo da flexão calculada pela simulação foi de 0.3382 mm. Em comparação com o resultado prático, conclui-se que são valores concordantes. Esse facto comprova que a irregularidade da profundidade de maquinação, deve-se à base que sofre um deslocamento provocado pelo peso da prensa neste caso em particular. No anexo E, encontra-se mais resultados desta simulação.

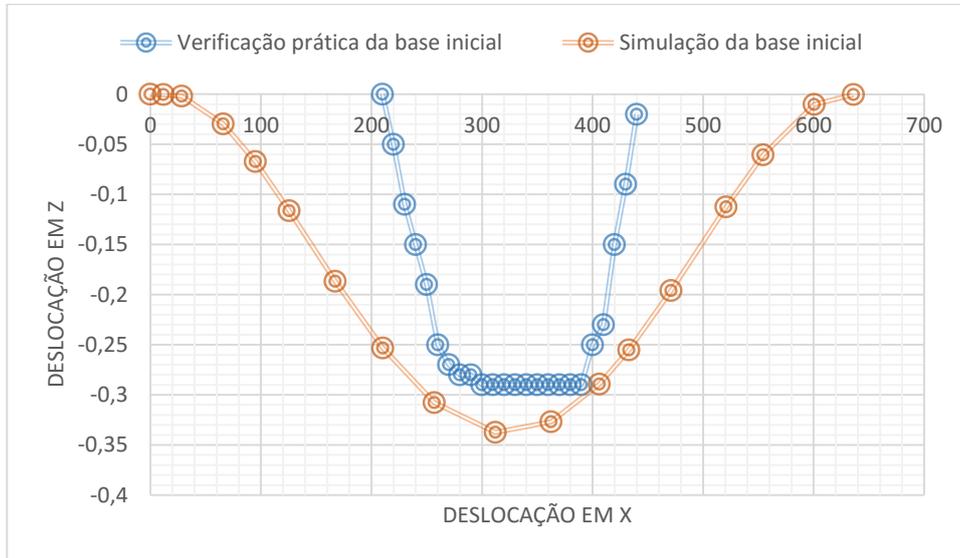


Gráfico 5 - Comparação dos resultados da verificação prática com a simulação da base inicial.

Verifica-se que existe a mesma tendência de flexão na verificação prática com a simulação. No entanto os valores iniciais e finais não são concordantes com a simulação. Na verificação prática, como se verifica na figura 54, foi impossível iniciar na extremidade da base devido à estrutura da máquina, sucedendo a iniciação da verificação prática nos 200 mm e admitindo que a flexão seria de 0 mm nesse ponto.

Para atenuar esta flexão alterou-se a estrutura da base de forma a tornar mais resistente. Essa alteração consistiu em colocar barras soldadas ou aparafusadas por baixo da base inicial como ilustra a figura 57.

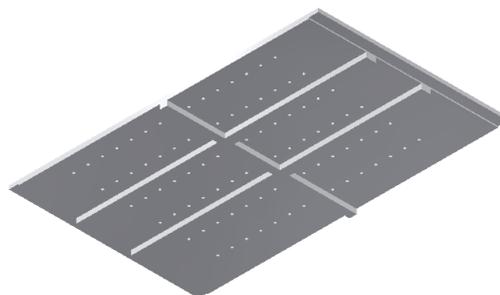


Figura 57 – Base inicial alterada

Simulou-se de igual modo o tampo com as alterações. Os resultados desta simulação são expostos na figura 58.

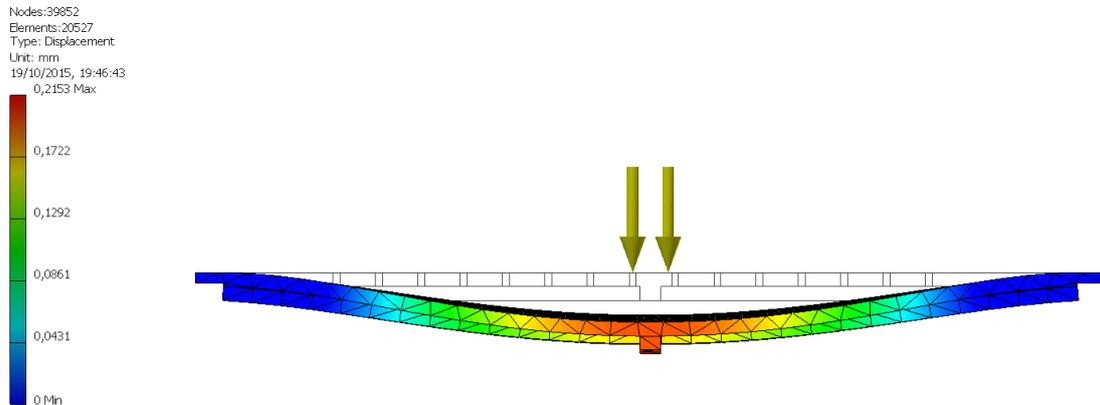


Figura 58 - Resultado da simulação sobre a flexão no tampo de alumínio alterado.

Com esta simulação verificou-se que com a colocação das barras por baixo do tampo inicial, melhorava a flexão existente para 0.2153 mm.

No gráfico seguinte comparam-se os valores da verificação prática inicial do tampo com a respetiva simulação e a simulação do tampo alterado com a barras.

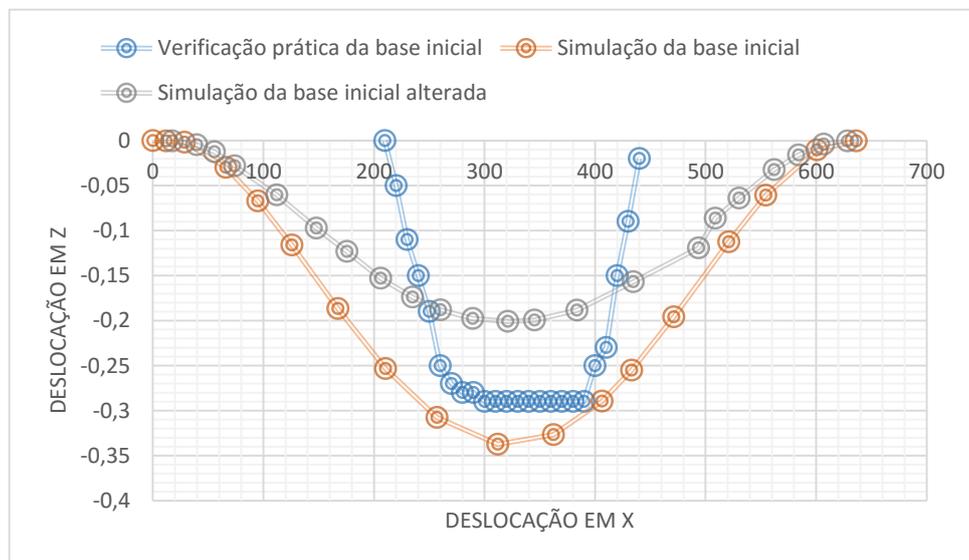


Gráfico 6 - Comparação dos resultados da verificação prática com a simulação da base inicial e a simulação da base inicial alterada.

Verifica-se uma melhoria significativa em relação ao tampo inicial, no entanto ainda não é suficiente para minimizar a flexão verificada nas gravações.

Pensou-se alterar a estrutura aplicando uma barra com perfil em “I” por baixo da base já existente. No entanto optamos por aplicar um conjunto de perfis bosch¹⁷ já idealizado para este fim, figura 57.

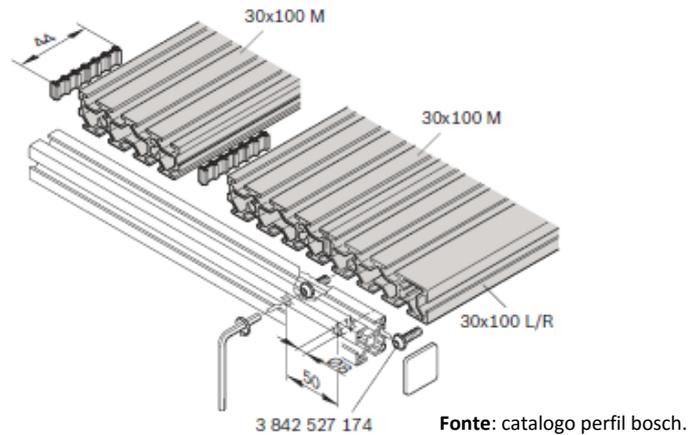


Figura 59 - Conjunto de perfis bosch.

O conjunto é dividido em 4 partes, encaixando-se umas nas outras formando uma base sólida, com rascos onde irá deslizar umas peças que servirão para fixar as peças a maquinar.

Fez-se uma análise estática do comportamento da estrutura através do simulador do Inventor, como se fez para o tampo da placa de alumínio colocada inicialmente na máquina. Esta análise é aproximada, uma vez a malha aplicada ao modelo tridimensional é uma malha grossa, para que a simulação não colapsasse o cálculo.

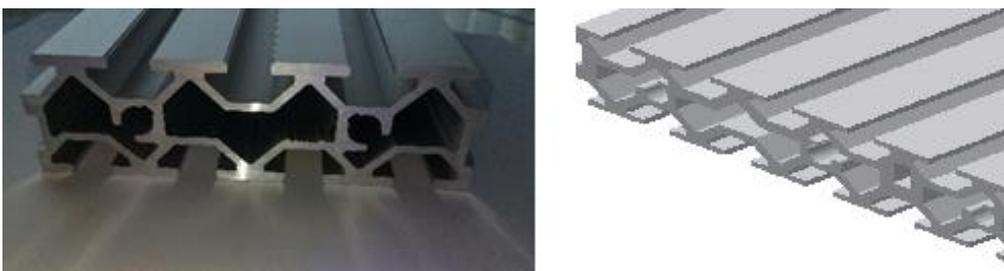


Figura 60 - Diferença do perfil real do perfil simulado.

Na simulação foi aplicada na mesma uma pressão de 0.0055 MPa, como se tinha feito para o primeiro tampo, obtendo-se o seguinte resultado em relação ao desfasamento.

¹⁷ Encontra-se no anexo F todos os dados referentes ao perfil bosch.

O resultado desta segunda simulação¹⁸, com um perfil bosch, resulta um desfasamento de 0.005812 mm. O que corresponde a uma melhoria significativa em relação a placa de alumínio inicial.

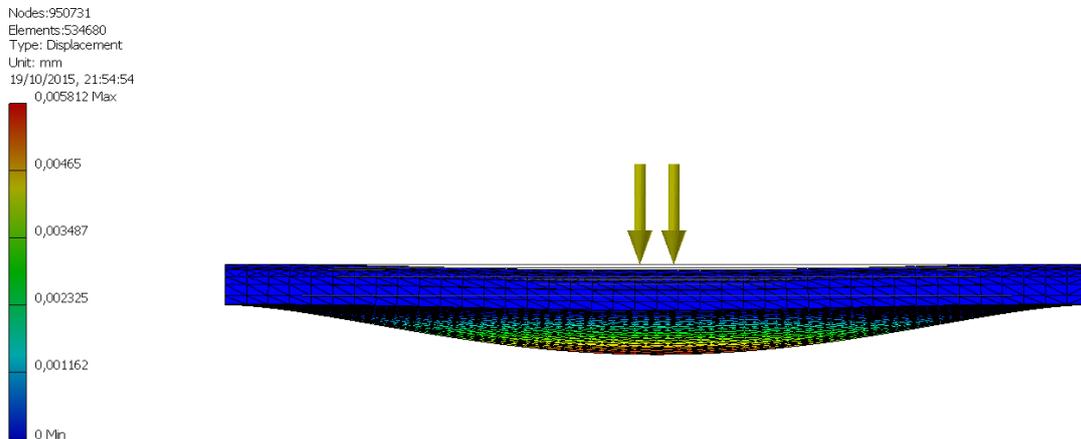


Figura 61 - resultado da simulação sobre a flexão no perfil bosch.

Para comprovar essa melhoria, realizou-se o mesmo teste prático, comparou-se a superfície do novo tampo, como se tinha feito inicialmente. Numa extremidade coloca-se o comparador a 0, e fez-se deslocar de 10 em 10 mm no eixo do X, registando os valores apontados no comparador, como ilustra a figura 60.

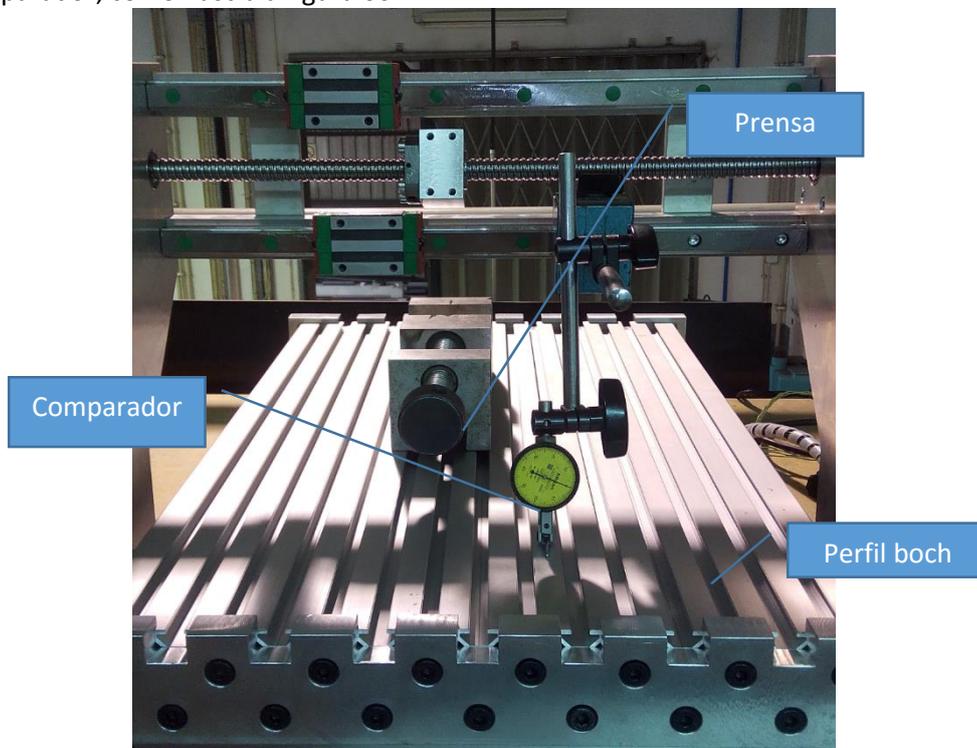


Figura 62 - Teste prático do desfasamento com a nova base da máquina.

¹⁸ No anexo G encontra-se todos os dados referentes a simulação do perfil bosch.

Após a realização do teste prático, o valor mais elevado registado foi de 0.02 mm. Esse valor prático é um pouco superior ao que se tinha previsto na análise de tensões, no entanto é suficiente para que se possa realizar gravações sem problemas de flexão.

No gráfico seguinte pode-se comparar os resultados das três simulações realizadas.

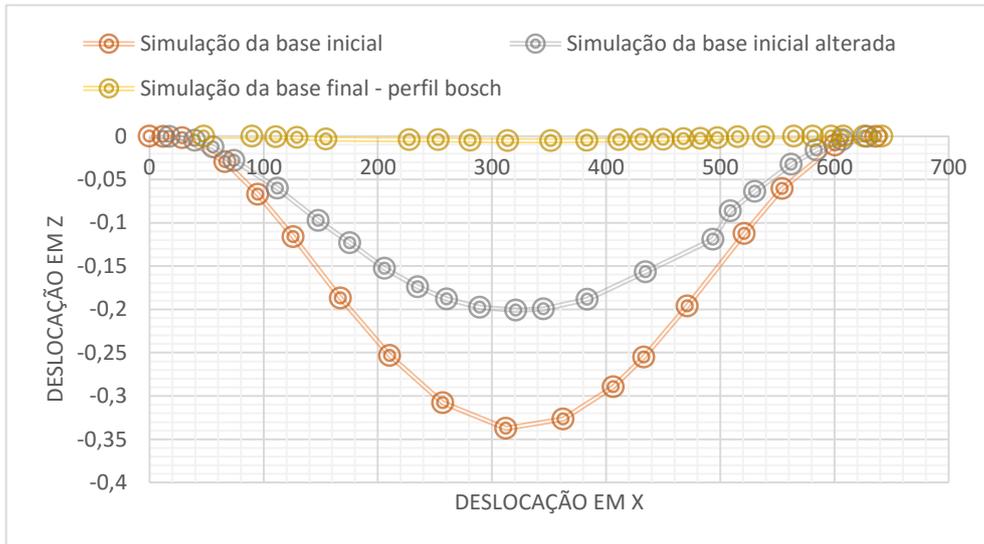


Gráfico 7 - Comparação dos resultados das três simulações.

No gráfico 7, verifica-se a elevada taxa de melhoria com a colocação do perfil bosch em substituição à placa de alumínio. Verifica-se ainda que a colocação das barras na placa inicial melhoraria o comportamento da mesma em relação a flexão para metade.

3.3.8 Montagem

Para assegurar a montagem correta e o bom funcionamento da máquina, é necessário garantir o alinhamento de todas as peças. A montagem desta máquina inicia-se pela base da máquina, constituída pelas guias que sustentam toda a estrutura da máquina. Esta primeira etapa é crucial garantir a perpendicularidade das peças que constituem a base, para isso foi utilizado um esquadro, como é observável na figura 61. Ao encaixar as peças, em simultâneo, coloca-se o fuso do eixo do X, à fêmea do fuso é apertado uma peça, perpendicularmente, que servirá para estabelecer o movimento simultâneo das placas laterais.

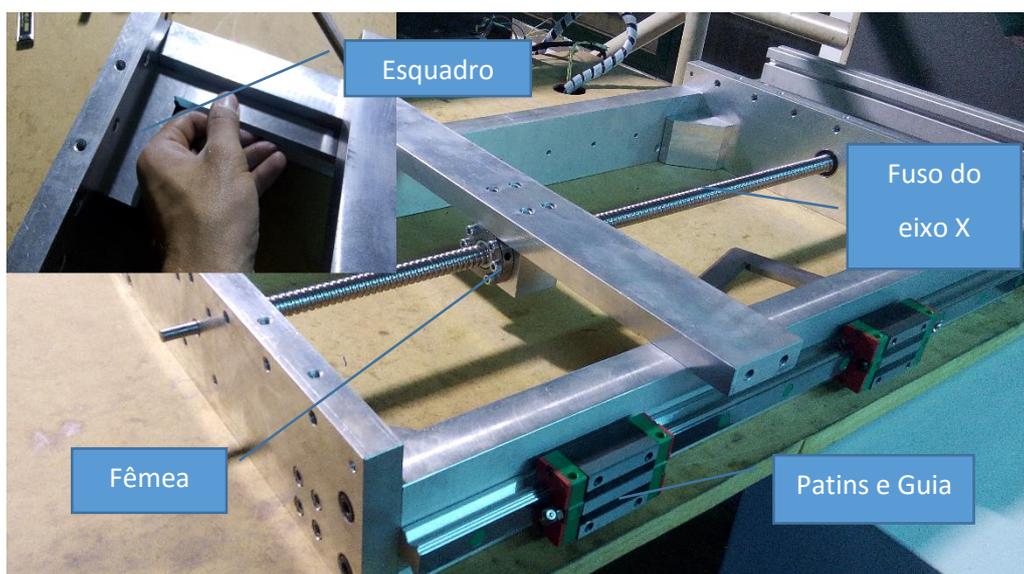


Figura 63 - Montagem da base da máquina.

Após a montagem da base, segue a colocação das placas laterais. Ao colocar as placas laterais, em simultâneo coloca-se o fuso do eixo Y que irá travar o deslocamento horizontal do fuso que faz batente nos rolamentos colocados nas paredes da máquina. É necessário verificar que não existe nenhuma folga no fuso para evitar irregularidades no deslocamento. Ao colocar as placas laterais, deve-se montar em simultâneo as guias do eixo Y, figura 65, com auxílio do esquadro para garantir a perpendicularidade entre as peças.

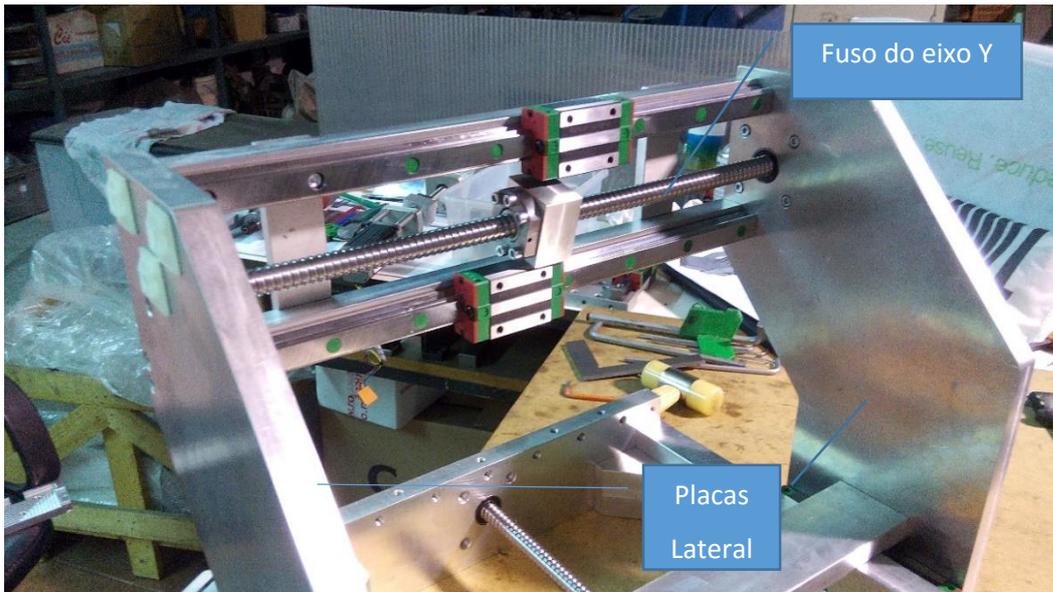


Figura 65 - Montagem das placas laterais.

Depois de aplicadas as placas que servem de base à máquina e as laterais, coloca-se os motores correspondentes ao eixo X e ao eixo Y. Estes motores são fixados por quatro veios, figura 64, proporcionando espaço para a colocação do acoplamento que irá transmitir o movimento do motor ao fuso.

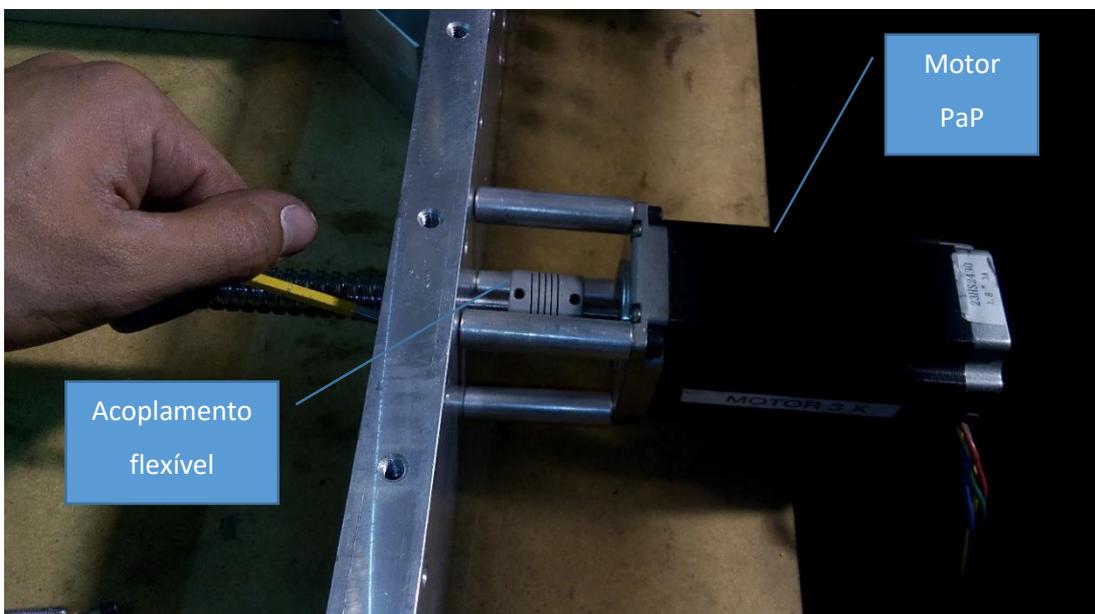


Figura 64 - Montagem dos motores de passo no eixo Y.

Após a fixação dos motores, segue a colocação do conjunto que irá suportar a árvore da máquina. A árvore será movimentada pelo eixo Z, por um fuso à semelhança do eixo do X e Y.

O primeiro passo é apertar a placa principal aos patins do eixo X e à fêmea, uniformizando movimento em X, como se verifica na figura 64.

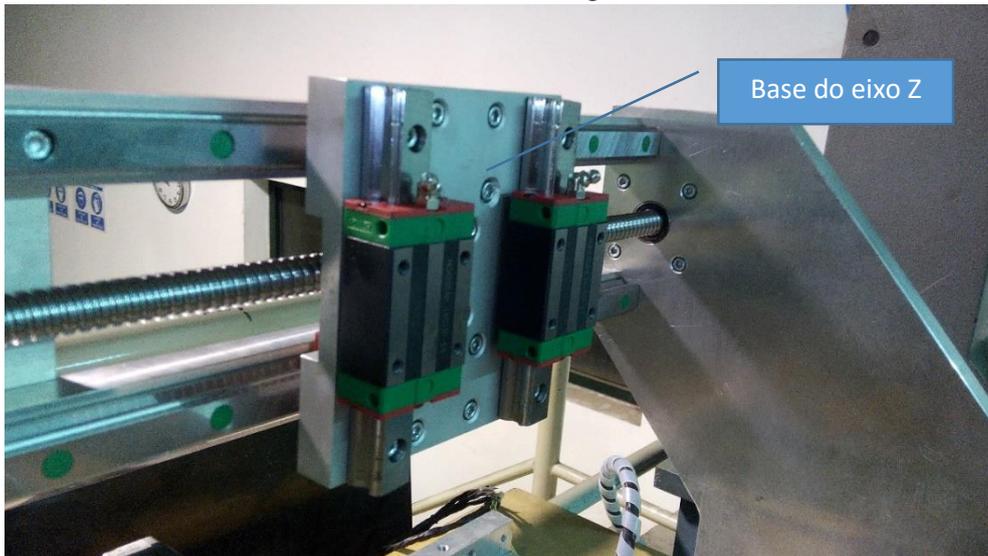


Figura 66 - Montagem da placa principal do eixo z.

Seguidamente coloca-se o fuso ao mesmo tempo que se aparafusa as peças que servem como batente, nestas peças foi realizada uma caixa para alojar um rolamento para poder rodar o fuso. Neste processo, à semelhança dos anteriores, é necessário garantir que não existe folga no fuso, para não alterar as medidas durante a maquinação. No cima do conjunto é colocado o motor que irá promover o movimento em Z. Este motor foi afixado de igual forma, por quatro veios em alumínio dando espaço para colocar o acoplamento.

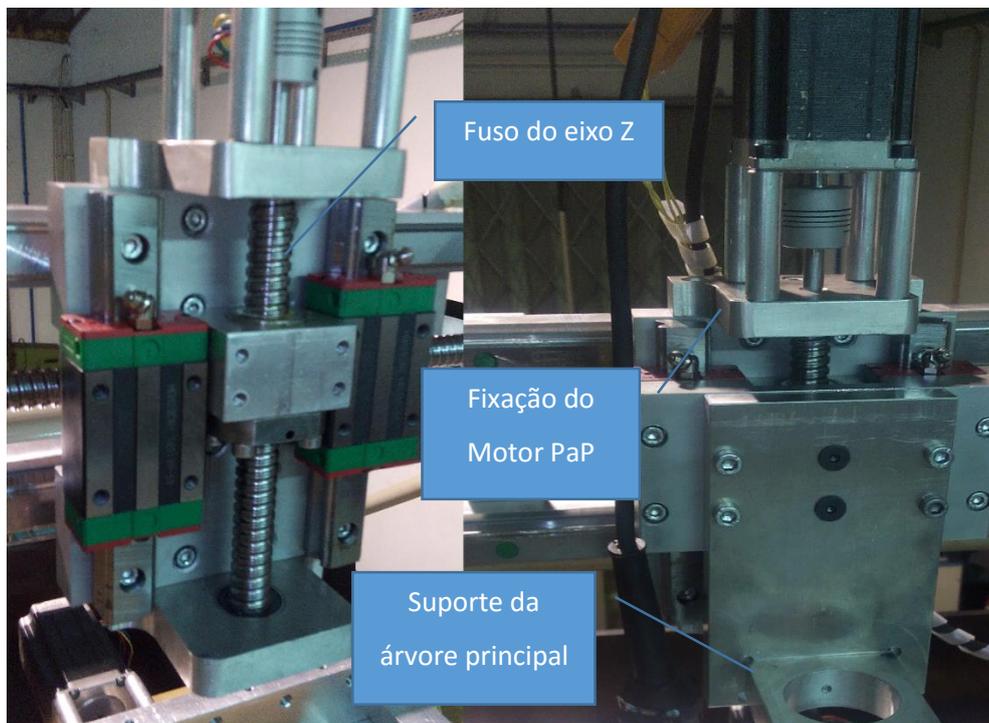


Figura 67 - Montagem do conjunto do eixo Z.

Após aplicar o fuso e o motor cola-se a peça que servirá de apoio à árvore principal da máquina como se vê na figura 67. Esta peça está apertada aos cursores e à fêmea do fuso, movimentando-se verticalmente. Este suporte foi desenvolvido para fixar o motor na zona apropriada ao carregamento lateral, não danificando o motor.

O tampo da CNC, foi alterado de uma placa de alumínio de 10 mm de espessura para um perfil bosch com espessura de 30 mm. Esse novo tampo projetado para a máquina, é dividido em 4 partes, havendo a necessidade de unir essas peças para uniformizar o tampo. Assim desenvolveu-se duas peças em alumínio para unir os perfis e aplicar a estrutura da máquina. Essas peças foram maquinadas numa Fresadora ferramenta CNC¹⁹, figura 68, através do software CAD/CAM da Autodesk inventor 2016.

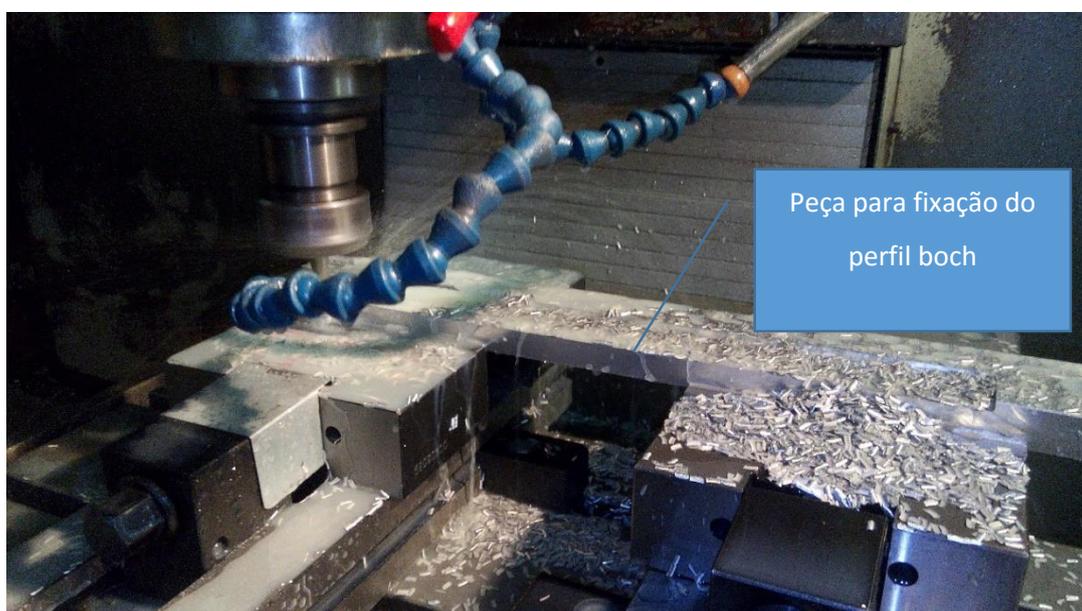


Figura 68 - Maquinação das peças para união de perfil bosch.

Após a maquinação das peças uniu-se os perfis perfazendo o novo tampo para a máquina. Este novo tampo é munido de ranhuras onde podem deslizar porcas para fixar de maneira mais prática as peças a maquinar como se verifica na figura 70.

De seguida, foi colocado e aparafusado ao resto da estrutura da máquina. Foi colocado nas laterais da máquina umas placas em policarbonato para impedir que o material proveniente da maquinação fosse para as guias laterais, provocando atrito no seu deslizamento.

¹⁹ V-25H LEADWELL, adquirida pela empresa ManLub, após os primeiros testes na mini CNC desenvolvida nesta dissertação.

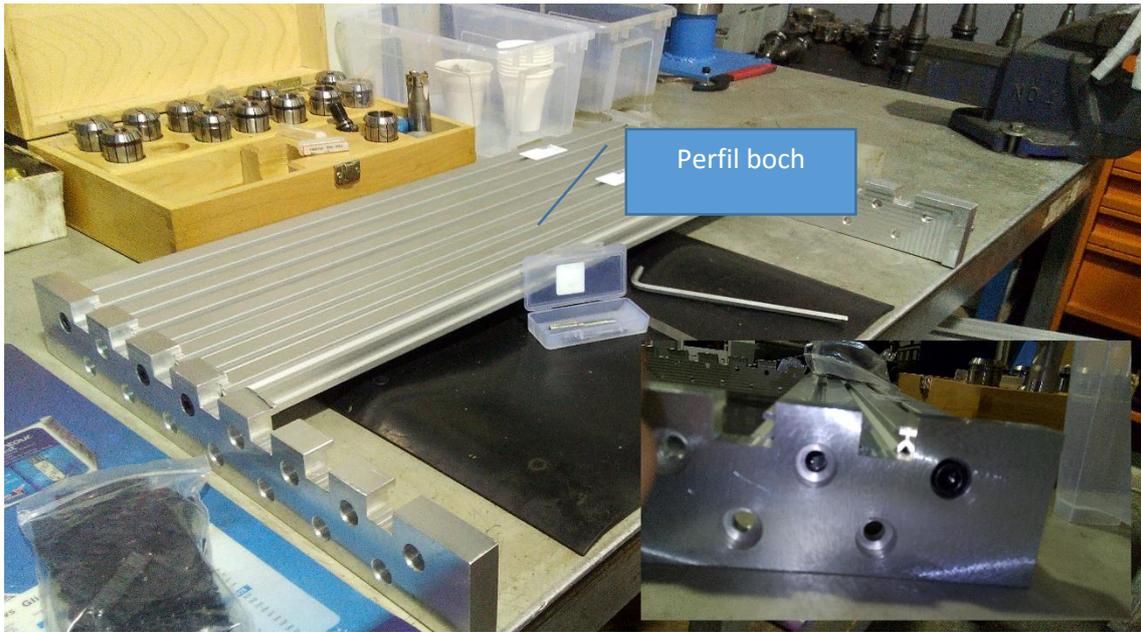


Figura 70 - Montagem do tampo da máquina.

Foi colocado em cada eixo os respectivos sensores de fim de curso, como se pode ver no canto direito inferior da figura 69.

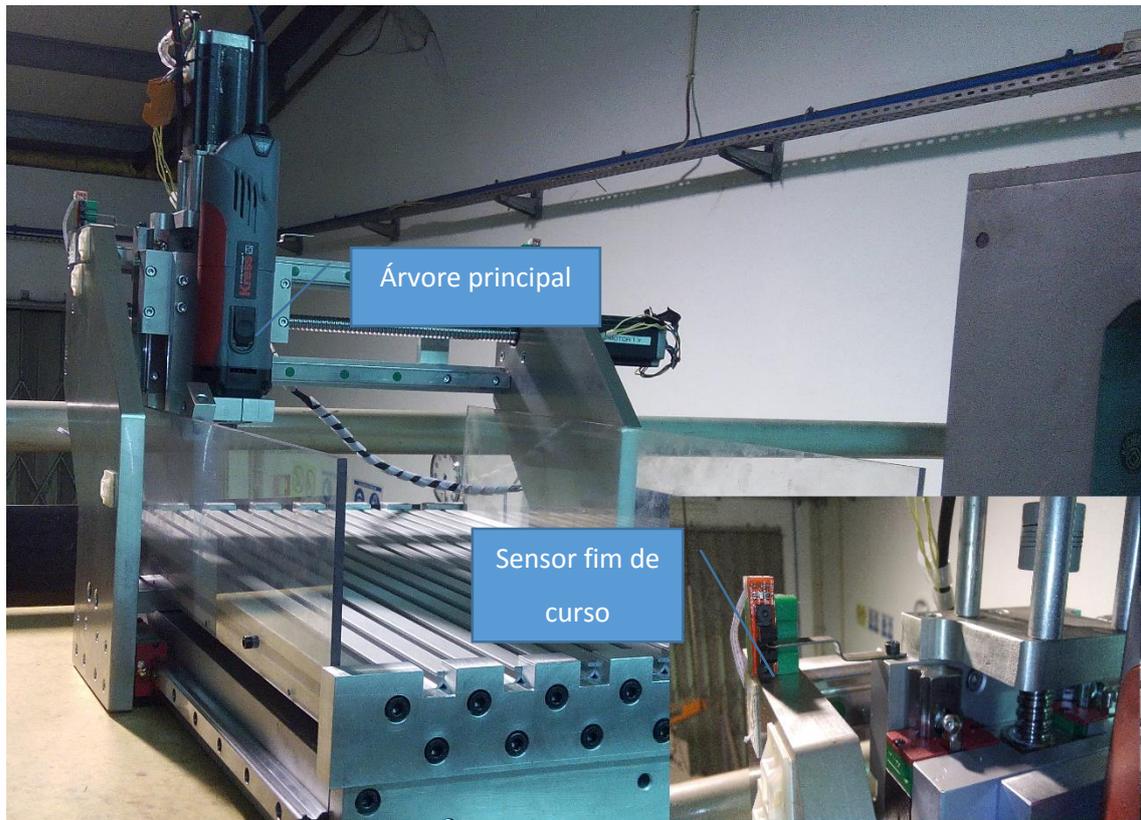


Figura 69 - Montagem final da Máquina.

3.4 Testes práticos

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos com a realização de peças na máquina desenvolvida.

O principal objetivo do desenvolvimento desta máquina, era realizar gravações em peças de diversos materiais. A máquina foi testada gradualmente, isto é, realizou-se as primeiras gravações em materiais com durezas baixas, como o nylon, alumínio, madeira e reynobond até matérias de durezas superiores como os aços com tratamento térmico. Na figura 71, pode-se ver algumas gravações em materiais de fácil maquinação.

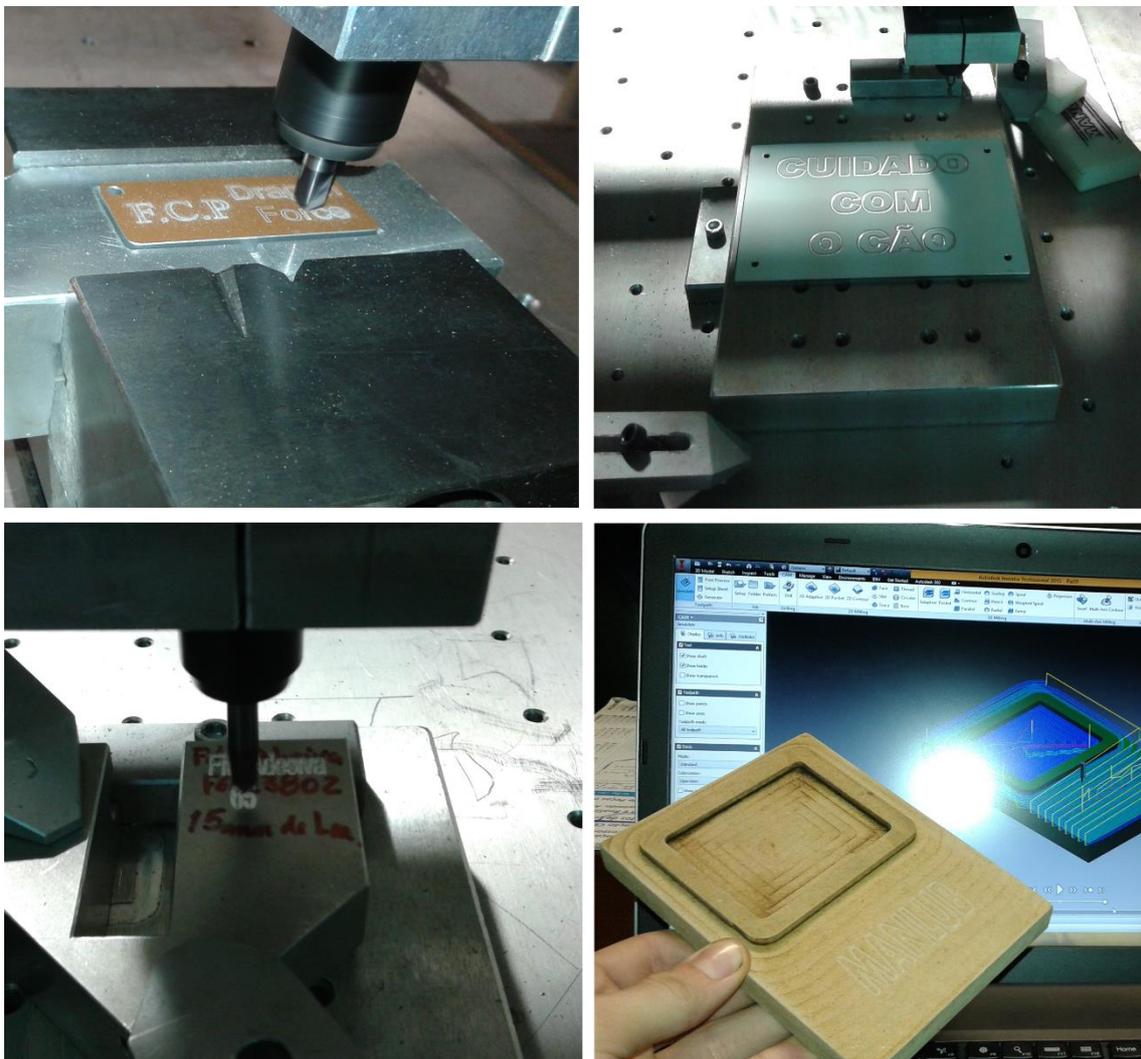


Figura 71 - Exemplos de peças gravadas na máquina desenvolvida.

Os primeiros resultados foram satisfatórios o que nos remeteu para experimentar materiais diferentes e ir para além das gravações.

Testamos a máquina a gravar em aço K110, tratando-se de um aço resistente ao desgaste e abrasivo, com uma fresa em “V”. O resultado dessa gravação é ilustrado na figura 72

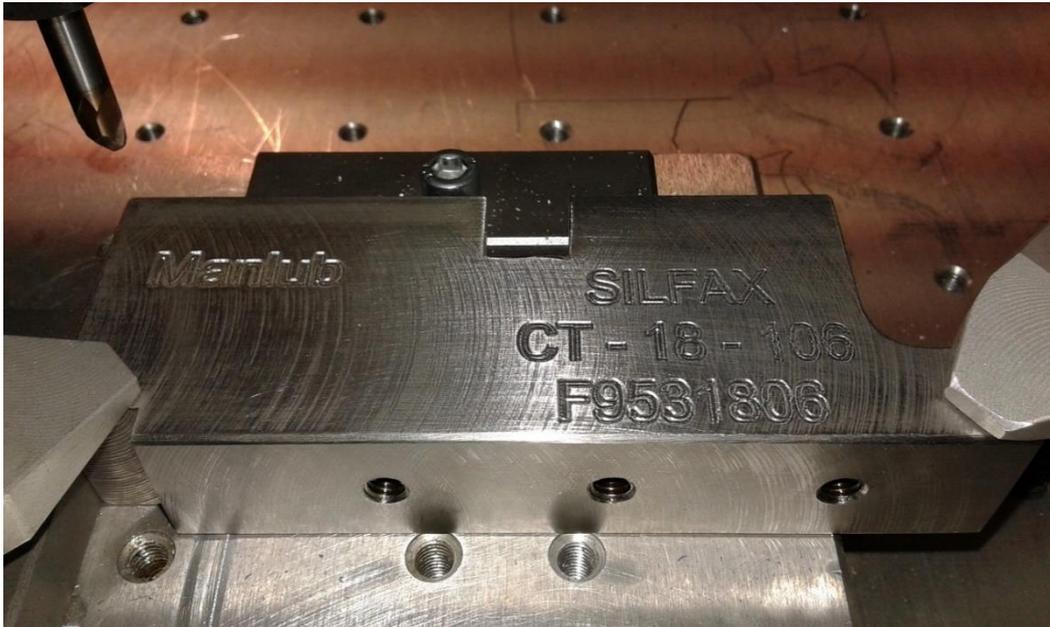


Figura 72 Gravação em aço K110.

Verificou-se que a máquina conseguiria ir além das gravações. Maquinou-se um contorno numa placa de alumínio de 10 mm com uma fresa de topo raso com 4 navalhas de diâmetro 5mm. O contorno foi realizado por incrementos de 0.1mm de profundidade. Na figura 73, pode-se verificar a realização do mesmo.

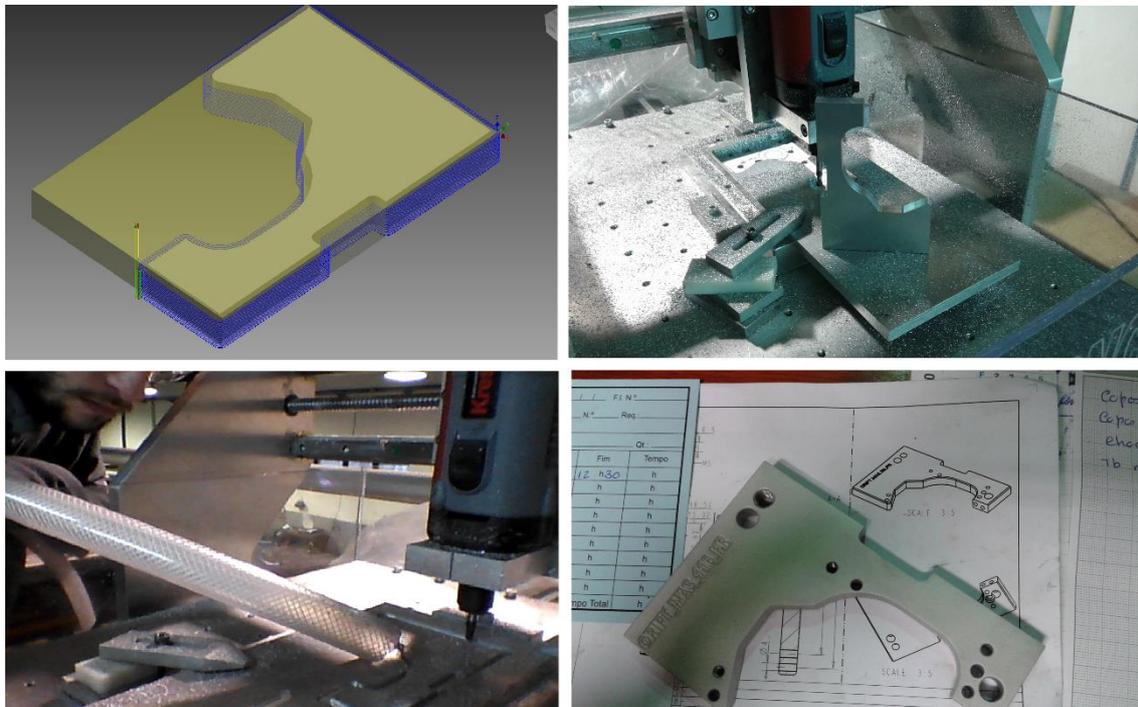


Figura 73 - Maquinação em alumínio.

Uma das peças que exigiu maior dedicação, foi a pedido de um cliente para fabricar um tampo de travões de bicicleta descontinuado no mercado. Houve a necessidade de desenhar tridimensionalmente a peça, esse desenho ficou aproximado em relação à peça que servia de amostra, uma vez que se tratava de uma peça produzida por injeção e não havia mecanismos de medição tridimensional.

Como se tratava de uma peça com relevo, era um ótimo teste à máquina.

O processo de maquinação dividiu-se em 2 fases. Uma primeira fase, primeiro aperto, foi desbastar o material a mais com uma fresa de 2 navalhas com 4 mm de diâmetro. Após o desbaste inicial, foi colocada uma fresa esférica de 2 mm procedendo-se ao acabamento, terminando um lado da peça. Virou-se a peça apertando-se com 4 parafuso, garantindo o mesmo posicionamento da peça. Nesta segunda fase à semelhança da primeira desbastou-se o material a mais com a mesma fresa e com uma esférica procedeu-se ao acabamento. Terminando a segunda fase, cortou-se a peça do material a mais que serviria para fixar a peça. Pode-se verificar todo este processo na figura 74.

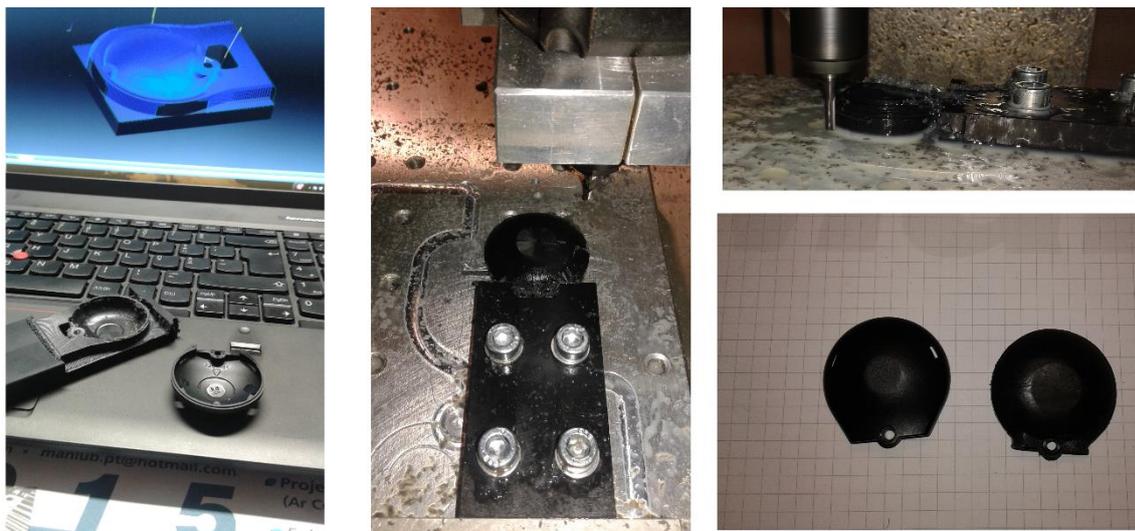


Figura 74 - Maquinação do tampo de bicicleta.

4. TRABALHO FUTURO

Em termos de trabalho futuro, existem vários caminhos de desenvolvimento que podem ser seguidos.

Seria relevante a execução de um manual de utilização da máquina, onde se explicasse todos os procedimentos a executar para a realização de uma gravação. Assim sendo, faria com que qualquer pessoa, conseguisse utilizar a máquina. Nesse mesmo documento criar um plano de manutenção preventiva onde se estimulasse a controlos visuais, vibrações ou aquecimento, desmontagens parciais, limpeza de elementos e reposições preventivas de peças deterioradas.

Outro caminho como tarefas a executar futuramente, seria o estudo metrológico da máquina para aferir o grau de desempenho da mesma. Esse estudo seria através de análise de peças maquinadas, verificando todas as dimensões que se teria idealizado. Com esse estudo aferir eventuais problemas.

Um outro trabalho é o controlo da árvore principal através do programa criado habilitando os comandos de ligar, desligar e escolher a velocidade de rotação.

5. CONCLUSÕES

A presente dissertação pretendeu solucionar um problema concreto numa empresa. Esse problema caracterizava-se pela dificuldade de executar gravações em peças sem haver desalinhamento na gravação ou a danificação das mesmas. Para solucionar esse problema foi realizada uma máquina-ferramenta CNC para executar gravações.

O desenvolvimento desta máquina-ferramenta, permitiu abordar e empregar distintos temas abordados em meio académico na prática o que consentiu na descoberta de técnicas desconhecidas.

Todas as peças pertencentes à máquina foram projetadas e maquinadas pelo autor na empresa. A maioria das peças foram maquinadas em máquinas-ferramentas convencionais, como o torno mecânico e a fresadora convencional.

A implementação da máquina na empresa, fez com que as peças fossem gravadas com melhor acabamento e sem danificarem as peças. A máquina desenvolvida, para além de executar as gravações, consegue maquinar pequenas peças de alumínio como é ilustrado nos testes práticos. Esse facto veio impulsionar a empresa a implementar o CAD/CAM na empresa, com aquisição do software Autodesk Inventor 2016, de um centro de maquinação CNC e de um torno CNC.

Algumas peças foram submetidas a simulações de tensões, nomeadamente o tampo da máquina que fazia flexa com peças de maior massa, provocando uma gravação dissemelhante. Essa alteração já contou com a maquinação no centro de maquinação CNC, adquirido pela empresa, onde essa maquinação foi gerada pelo autor através do software HSM adquirido pela empresa.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] P.Aldabaldetrecu, "Interempresas," 1 Fevereiro 2012. [Online]. Available: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/1435-Evolucion-tecnica-de-la-maquina-herramienta-Resena-historica.html>.. [Acedido em 4 Janeiro 2015].
- [2] C.J.Antunes, "Coladaweb," [Online]. Available: <http://www.coladaweb.com/historia/historia-da-industria>.. [Acedido em 4 Janeiro 2015].
- [3] R.LStoeterau, "Introdução ao Projeto de Máquina - Ferramentas Modernas," 2014.
- [4] G.E.THYER, "Computer Numerical Control of Machine Tools," Oxford:Butler & Tanner Ltd, 1991.
- [5] I. Gardner Business Media, "World achine Tool Production & Consumption," 2015.
- [6] Pruvot, Concepção e cálculos das máquinas-ferramentas Vol.1- Generalidades Morfologia, Plano geral, França: Polytechniques et Universitaires Romandes, 1993.
- [7] J. D. d. S. Pereira, "Máquinas CNC de Baixo-Custo," Guimarães , 2012.
- [8] R. Batista, "Tendências do corte por Arranque de Apara-Maquinagem," 2010.
- [9] H. Correia e J. Ferreira, "Controlo de Motores de Passo para Máquinas CNC de Baixo Custo," Guimarães, 2012/2013.
- [10] R. A. d. A. Queiroz, "Motores de Passo," Universidade Salvador-Unifacs.
- [11] B. S. e. J. Costa, "Análise e desenvolvimento de um servo motor com estrutura de controlo.," Guimarães, 2012-2013.
- [12] V. Turchetti, "Estudo de Encoders Ópticos Baseados no Efeito Moiré e projeto de um Kit de Encoder Didático," 2007.

- [13] C. R. e. J. Oliveira, "Controlo de Mesa Rotativa," Uminho - Guimarães , 2013.
- [14] P. M. Wendling, "Sensores," UNESP-Universidade Estadual Paulista, 2014.
- [15] J. D. d. S. Pereira, "Firmware de controlo no arduíno," Universidade do Minho, Guimarães-Portugal, 2010/2011.
- [16] "GitHub," [Online]. Available: <https://github.com/simen>. [Acedido em 19 Julho 2015].
- [17] P. H. I. C. Ltda, Tecnologia Eletromecânica, Jacareí: São Paulo , 2013.
- [18] G. E. THYER, "Computer Numerical Control of Machine Tools," Oxford:Butler & Tanner Ltd, 1991.
- [19] "Acoplamento," [Online]. Available: <ftp://ftp.pi.ifes.edu.br/academico/Lucas%20Guesse/T%E9cnico%20em%20Pesca/Maquinas%20e%20Motores/Recupera%E7%E3o%20a%20Prova/Aula%2039%20-%20Acoplamento.pdf>. [Acedido em 19 Fevereiro 2015].
- [20] rumoautopecas. [Online]. Available: http://www.rumoautopecas.com.br/images/_product/238/237669/junta-homocinetica-citroen-xantia-1-6-1-8-16v-2-0-ano-93-ate-98-zx-1-9-2-0-16v-ano-91-ate-97-26-x-23--22567.jpg. [Acedido em 19 Fevereiro 2015].
- [21] manutencaoesuprimentos. [Online]. Available: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/imagem/segmentos/acoplamentos-flexiveis-de-eixo-2.jpg>. [Acedido em 19 Fevereiro 2015].
- [22] "imprimindo3d," [Online]. Available: http://www.imprimindo3d.com.br/wp-content/uploads/2012/06/IMG_1122.jpg. [Acedido em 19 Fevereiro 2015].
- [23] Dicionário da Língua Portuguesa, 8.ªedição, Porto Editora, 2000.

7. ANEXOS

ANEXO A

World Machine-Tool Output & Consumption Survey

ANEXO B

Esquema da Ligação Elétrica

ANEXO C

Desenhos 2D da Estrutura da Máquina

ANEXO D

Dimensões do fuso

ANEXO E

Dados do perfil bosch

ANEXO F

Análise de Tensões no tampo inicial

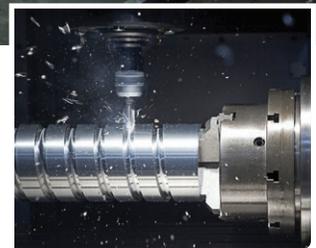
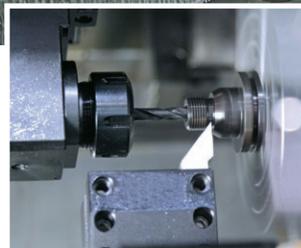
ANEXO G

Análise de Tensões no perfil bosch



GARDNER
RESEARCH

2015 World Machine-Tool Output & Consumption Survey





THE WORLD SURVEY AT A GLANCE

In a competitive global manufacturing marketplace, increasing productivity is the name of the game. One way to increase productivity is via a more skilled work force. Another way to improve productivity is through more efficient equipment, like machine tools. It's very easy to look at these two means of achieving higher productivity as strictly competitive, for example when labor bemoans the introduction of robots or other more efficient capital equipment. But, in reality, higher skilled labor and more efficient machine tools are complementary. Higher skilled labor is necessary to make the most of more efficient machine tools and vice versa. Therefore, it's the appropriate combination of the two that lead to higher standards of living.

How these two factors of production are combined is governed by their relative costs. In recent years, the skill set of manufacturing laborers around the world has been on the rise. This is evident in the improved quality of machined parts around the world. But, a higher skilled workforce demands higher wages and other benefits. At the same time, interest rates around the globe are hitting all-time lows, which has significantly lowered the cost of capital equipment. The dynamic of rising wage rates and declining interest rates means that it is now relatively cheaper to increase productivity through capital equipment investment. Because machine tools have a hand in virtually everything that is manufactured, the level of investment in machine tools is a sign of which countries are investing with an eye to the future of a more highly skilled workforce. Current machine tool purchasing trends show that the strongest manu-

facturing countries are making greater investments in the latest machine tool technology.

Global machine tool consumption was \$75.3 billion, an increase of just 0.3 percent in 2014. But, among the 10 largest machine tool consuming countries, which generally corresponds with the 10 largest global economies, machine tool consumption increased 1.7 percent in 2014. In the other 15 countries used to estimate the global total, machine tool consumption contracted 7.9 percent in 2014. So, the countries with a stronger manufacturing base made a much larger relative investment to enhance the productivity gap between them and everyone else.

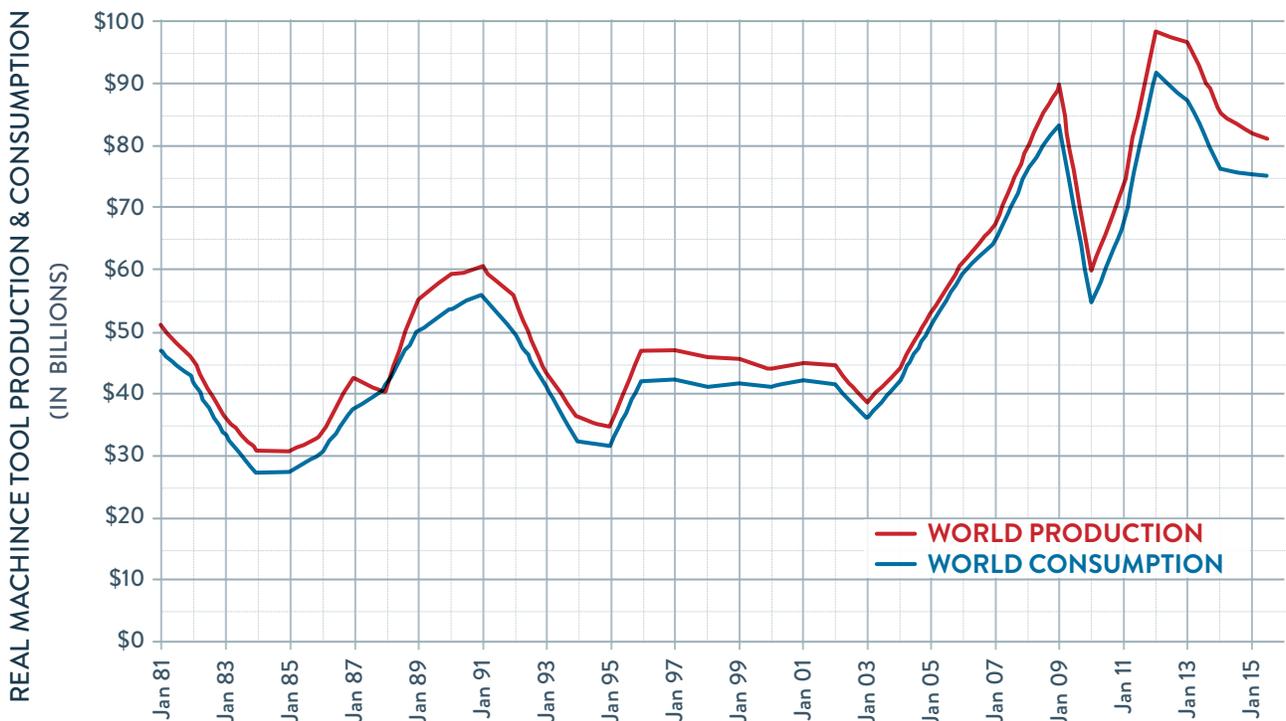
World machine tool production fell for the third year in a row to \$81.2 billion. In 2014, world production fell by 3.1 percent. The rate of contraction in production moderated in 2014 as machine tool builders brought inventory levels down, bringing supply into a better balance with demand. This is an indication that machine tool prices around the world should be firming up.

Looking ahead to 2015, Gardner Research is forecasting world machine tool consumption will fall 0.4 percent to \$75.0 billion. However, the ten largest machine tool consumers will see a decline of 1.1 percent while the remaining 15 countries will see consumption increase 3.7 percent.

For detailed charts on world consumption and production and forecasts for the top 25 consuming countries, please visit the international page of Gardner's corporate web site:

www.gardnerweb.com/forecast/international.htm

WORLD MACHINE TOOL PRODUCTION & CONSUMPTION





CONSUMERS OF MACHINE TOOLS

China remained the world's largest consumer of machine tools by a wide margin. However, China's consumption of machine tools has dropped to \$31.8 billion in 2014 from \$40.8 billion in 2011 – a 22 percent decline over three years. Because China's money supply is growing at nearly its slowest rate in more than two decades and its industrial production has grown at a continually slower rate since January 2012, we think China's machine tool consumption will decline again in 2015. We are forecasting \$28.6 billion of machine tool consumption in China.

At \$8.1 billion, machine tool consumption was essentially unchanged in the U.S., which is the world's second largest machine tool consumer. We expect machine tool consumption to increase to \$10.4 billion in 2015. You can read our rationale for why that is likely to happen in the December 2014 feature article in *Modern Machine Shop* magazine.

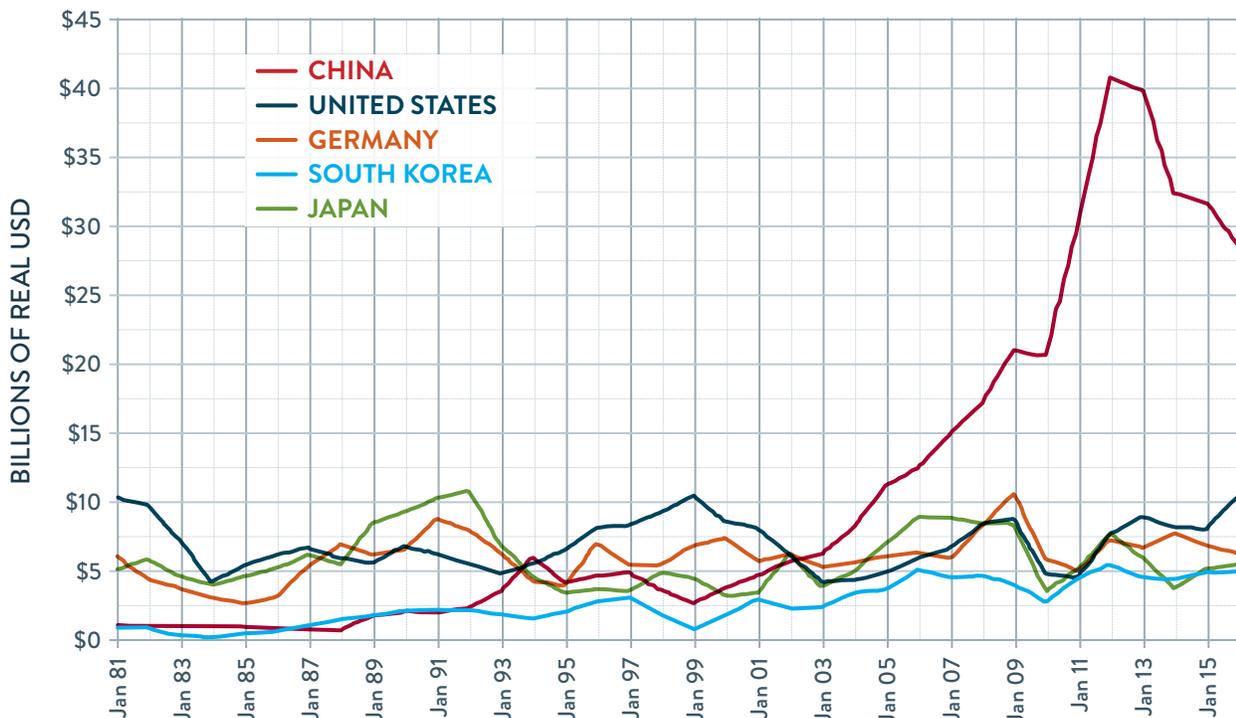
Germany remained the third largest machine tool consumer in the world. However, Germany's consumption dropped by 10.8 percent, which was the second largest percent decline of any country in the top 10 consumers. Germany's money supply, industrial production, and capacity utilization are all growing at decelerating rates. There-

fore, we think machine tool consumption in Germany is likely to fall by another 8 percent in 2015.

Japan and South Korea remained in the top five consuming countries. But, they flip flopped places with Japan moving up to number four and South Korea falling to number five. In 2014, Japan's machine tool consumption increased 39.4 percent, which was the largest increase of any country. Japan should see an increase in consumption in 2015 as well, albeit a much smaller one. Consumption increased by 13.2 percent in South Korea in 2014. Like Japan, it should see a smaller increase in 2015.

Two countries that have seen significant declines in machine tool consumption are India and Brazil. In 2011, both countries consumed close to \$2.5 billion and were ranked numbers six and seven in the world, respectively. But, in 2014 India consumed just \$1.4 billion of machine tools and Brazil just \$1.0 billion. However, India seems to be turning around as we think consumption will increase in 2015 for the second year in a row. Brazil looks to be a different story. We think consumption will drop to \$0.7 billion in 2015 as both its industrial production and capacity utilization are contracting at rapidly accelerating rates.

MACHINE TOOL CONSUMPTION – TOP 5 COUNTRIES





PRODUCERS OF MACHINE TOOLS

China has been the world's largest producer of machine tools since 2009. But, its production has fallen to \$23.8 billion from its peak of \$29.5 billion in 2011. Given the nature of China's machine tool market and the cooling off of its economy, production is likely to decline further in 2015.

For the second year in a row, Germany was the second largest producer of machine tools. However, production declined roughly 20 percent in 2014. It's also the world's largest exporter of machine tools.

In Japan, machine tool production dropped nearly 50 percent

from 2011 to 2013. But, production rebounded in 2014, increasing to \$12.8 billion. This put Japan in third place in the world, just \$0.1 billion behind Germany.

South Korea moved up one spot to number four while Italy fell one spot to number five. Both countries produced more than \$5 billion of machine tools.

Since 2011, really even as far back as 2007, Brazil's machine tool production has taken a dramatic hit. Since 2011, machine tool production in Brazil has dropped nearly 70 percent to \$0.3 billion from \$0.9 billion.

ABOUT THE SURVEY

This is the 50th edition of an independent annual survey that collects statistics from machine tool consuming and producing countries and compares them in real U.S. dollars. It is conducted through the research department of Gardner Business Media, Inc., Cincinnati, Ohio USA, by Steve Kline, director of market intelligence, and Nancy Eigel-Miller, research manager.

This year's data on production, exports and imports was collected from official sources, including trade associations and government ministries, in 27 countries which consume and produce virtually all of the world's machine tools. Consumption is calculated by adding imports to and subtracting exports from production. The data typically is reported in local currencies then converted to U.S. dollars. After converting to U.S. dollars, all of the data in the 2014 survey also was inflation-adjusted using the Bureau of Labor Statistics' Producer Price Index for capital equipment to provide a better historical comparison.

When calculating these world totals, we use the top 25 consuming or producing countries from that year. So, for example, total world consumption in 2002 is from a different set of countries than the total world consumption in 2010. Since the number of reporting countries changes from year to year, this provides a reasonable approximation because the top 25 consuming or producing countries account for roughly 95% of all consumption and production.

SOURCES. The revised data for 2013 and estimated data for 2014 are sourced at government agencies or trade associations. Also, special assistance came from the fifteen-member CECIMO consortium (Brussels, Belgium) and the Association for Manufacturing Technology (McLean, VA).

DEFINITIONS. A machine tool is usually defined as a power-driven machine, not portable by hand, and powered by an external source of energy. It is designed specifically for metalworking either by cutting, forming, physico-chemical processing, or a combination of these techniques.

Machine tools are traditionally broken down into two categories: metalcutting and metal forming. Metalcutting machines typically cut

away chips or swarf and include (but are not limited to) broaching machines, drilling machines, electrical-discharge machines, lasers, gearcutting machines, grinders, machining centers, milling machines, transfer machines, and turning machines such as lathes. Metal forming machines typically squeeze metal into shape and include (but are not limited to) bending machines, cold-heading machines, presses, shears, coil slitters, and stamping machines.

Data presented in the WMTS are solicited for metalcutting machines (codes 8456-8461 under the Harmonized Tariff System) and for metal forming machines (8462-8463) and are solicited for complete machines only, not including parts or rebuilt machines.

EXCHANGE RATES. All data reported in domestic currencies are translated into U.S. dollars using the average daily exchange rate for the year (not the end-of-year rate) as reported at www.oanda.com in the historical section. All analysis is done in real U.S. dollars.

SCOPE. Information from the 27 countries represented in the survey does not include all machine tool production and trade activity in the world but is thought to encompass more than 95% of all activity. In some cases, like South Africa and some Southeast Asian or Eastern European countries, a measurable machine tool market exists, but data is not supplied by the local market or is difficult to estimate.

"SHIPMENTS" VS. "ORDERS." Many countries, in addition to contributing statistics to this Survey, also track orders for new machine tools. These are, by their nature, different sets of numbers, and they may or may not be related.

This Survey is based on actual shipments of new machine tools from the factories in which they are produced. In contrast, the various order compilations in individual countries around the world are based on bookings for machines that will be shipped in the future. The time lag between these two events can vary greatly. An in-stock lathe might be shipped one day after the order is placed; whereas a complex engine-machining line might take a year to be delivered after the order has been received. On average in the U.S., orders lead shipments by four to five months. That is likely a common lead time for other countries.



CONSUMERS OF MACHINE TOOLS

MILLIONS OF U.S. DOLLARS

COUNTRY	2013	2014	2015*
1. China, P. Rep.	\$31,900.0	\$31,700.0	\$28,600.2
2. United States	8,048.5	8,056.3	10,412.4
3. Germany	7,573.4	6,758.2	6,232.8
4. Japan	3,695.8	5,150.2	5,427.5
5. South Korea	4,320.0	4,891.0	4,959.9
6. Italy	2,098.4	2,266.9	2,340.6
7. Russia	2,054.5	2,030.2	1,729.9
8. Mexico	1,924.2	1,708.9	1,884.4
9. Taiwan	1,629.0	1,687.0	1,877.2
10. India	1,337.7	1,416.5	1,506.9
11. Canada	1,342.0	1,235.0	1,361.8
12. Turkey	1,261.0	1,227.0	1,266.9
13. United Kingdom	1,077.5	1,087.2	1,362.1
14. Switzerland	1,126.1	1,081.8	1,030.4
15. Brazil	1,464.9	1,014.6	661.1
16. France	1,113.8	977.3	1,018.6
17. Austria	734.0	663.7	665.3
18. Spain	426.1	534.8	605.8
19. Czech Republic	435.5	464.3	567.8
20. Australia	374.7	333.0	357.2
21. Netherlands	342.5	303.9	310.8
22. Belgium	190.4	221.2	230.4
23. Argentina	210.0	195.7	137.3
24. Portugal	209.6	166.5	209.3
25. Sweden	194.2	161.3	242.1
26. Finland	121.9	115.5	132.6
27. Denmark	63.0	59.6	66.2
TOTAL	\$ 75,268.7	\$ 75,507.6	\$ 75,197.5

— * 2015 VALUES ARE FORECASTED —

PRODUCERS OF MACHINE TOOLS

MILLIONS OF U.S. DOLLARS

COUNTRY	% CUTTING MACHINES	2013	2014
1. China, P. Rep.	59%	\$24,700.0	\$23,800.0
2. Germany	71%	15,268.7	12,957.2
3. Japan	83%	11,333.6	12,831.6
4. South Korea	74%	5,150.0	5,631.0
5. Italy	51%	5,475.9	5,074.7
6. United States	75%	4,956.1	4,900.4
7. Taiwan	82%	4,537.0	4,700.0
8. Switzerland	84%	3,242.8	3,111.7
9. Austria	51%	1,217.0	1,101.2
10. Spain	60%	1,285.1	1,083.0
11. United Kingdom	77%	1,007.1	931.9
12. Turkey	27%	719.0	722.0
13. France	61%	797.3	698.9
14. India	83%	576.0	645.3
15. Czech Republic	82%	697.2	625.9
16. Canada	-	685.0	571.0
17. Netherlands	-	428.8	380.5
18. Brazil	81%	417.5	280.0
19. Belgium	-	317.8	254.0
20. Russia	-	210.9	234.4
21. Finland	-	191.8	170.2
22. Mexico	-	140.6	144.0
23. Australia	-	160.0	143.4
24. Sweden	9%	163.4	135.7
25. Portugal	75%	119.2	102.1
26. Denmark	-	49.3	45.0
27. Argentina	59%	36.2	37.5
TOTAL	-	\$83,883.3	\$ 81,312.6



IMPORTERS OF MACHINE TOOLS

MILLIONS OF U.S. DOLLARS

	COUNTRY	2013	2014	2014 Imports* as % of Consumption
1.	China, P. Rep.	\$10,100.0	\$11,200.0	35%
2.	United States	5,268.4	5,241.5	65%
3.	Germany	3,012.6	2,783.5	41%
4.	Russia	1,922.4	1,869.1	92%
5.	Mexico	1,907.6	1,655.3	97%
6.	South Korea	1,386.0	1,496.0	31%
7.	Italy	992.2	1,021.0	45%
8.	Turkey	1,037.0	989.0	81%
9.	Belgium	857.6	911.6	412%
10.	Canada	900.0	902.0	73%
11.	Brazil	1,263.8	901.2	89%
12.	United Kingdom	902.9	893.1	82%
13.	France	982.3	876.4	90%
14.	India	797.0	811.1	57%
15.	Taiwan	640.0	740.0	44%
16.	Japan	745.1	715.7	14%
17.	Switzerland	683.6	583.4	54%
18.	Czech Republic	477.0	507.7	109%
19.	Austria	461.3	416.9	63%
20.	Spain	324.7	404.8	76%
21.	Netherlands	452.1	401.1	132%
22.	Australia	286.0	264.9	80%
23.	Sweden	288.1	239.2	148%
24.	Argentina	194.6	166.4	85%
25.	Portugal	154.8	121.6	73%
26.	Denmark	119.2	108.2	182%
27.	Finland	109.6	97.2	84%

– * INCLUDES MACHINES IMPORTED FOR RE-EXPORT –

EXPORTERS OF MACHINE TOOLS

MILLIONS OF U.S. DOLLARS

	COUNTRY	2013	2013	2014 Exports* as % of Consumption
1.	Germany	\$ 10,707.9	\$ 8,982.5	69%
2.	Japan	8,382.9	8,397.1	65%
3.	Italy	4,369.6	3,828.8	75%
4.	Taiwan	3,548.0	3,753.0	80%
5.	China, P. Rep.	2,900.0	3,300.0	14%
6.	Switzerland	2,800.3	2,613.3	84%
7.	South Korea	2,216.0	2,236.0	40%
8.	United States	2,176.0	2,085.6	43%
9.	Spain	1,183.7	953.0	88%
10.	Belgium	985.0	944.4	372%
11.	Austria	944.2	854.5	78%
12.	United Kingdom	832.5	737.8	79%
13.	Czech Republic	738.7	669.3	107%
14.	France	665.8	598.0	86%
15.	Turkey	495.0	484.0	67%
16.	Netherlands	538.4	477.7	126%
17.	Canada	243.0	238.0	42%
18.	Sweden	257.3	213.6	157%
19.	Brazil	216.4	166.5	59%
20.	Finland	179.5	151.9	89%
21.	Denmark	105.5	93.6	208%
22.	Mexico	124.1	90.4	63%
23.	Australia	71.3	75.3	53%
24.	Russia	78.8	73.3	31%
25.	Portugal	64.4	57.1	56%
26.	India	35.3	39.9	6%
27.	Argentina	20.8	8.2	22%

– * INCLUDES RE-EXPORT MACHINES –



TRADE BALANCE

MILLIONS OF U.S. DOLLARS

COUNTRY	2013	2014
1. Japan	\$ 7,637.8	\$ 7,681.4
2. Germany	7,695.3	6,199.0
3. Taiwan	2,908.0	3,013.0
4. Italy	3,377.4	2,807.8
5. Switzerland	2,116.7	2,029.9
6. South Korea	830.0	740.0
7. Spain	859.0	548.2
8. Austria	482.9	437.6
9. Czech Republic	261.7	161.6
10. Netherlands	86.3	76.6
11. Finland	69.9	54.7
12. Belgium	127.4	32.8
13. Denmark	-13.7	-14.6
14. Sweden	-30.8	-25.6
15. Portugal	-90.4	-64.5
16. United Kingdom	-70.4	-155.3
17. Argentina	-173.8	-158.2
18. Australia	-214.7	-189.6
19. France	-316.5	-278.4
20. Turkey	-542.0	-505.0
21. Canada	-657.0	-664.0
22. Brazil	-1,047.4	-734.7
23. India	-761.7	-771.2
24. Mexico	-1,783.5	-1,564.9
25. Russia	-1,843.6	-1,795.8
26. United States	-3,092.4	-3,155.9
27. China, P. Rep.	-7,200.0	-7,900.0

– TRADE BALANCE = EXPORTS MINUS IMPORTS –

PER-CAPITA CONSUMPTION

MILLIONS OF U.S. DOLLARS

COUNTRY	CONSUMPTION USD (Millions)	POPULATION (Millions)	CONSUMPTION (USD per Capita)
1. Switzerland	\$ 1,081.8	8.13	\$ 133.06
2. South Korea	4,891.0	50.22	97.39
3. Germany	6,758.2	80.82	83.62
4. Austria	663.7	8.51	77.99
5. Taiwan	1,687.0	23.37	72.19
6. Czech Republic	464.3	10.53	44.09
7. Japan	5,150.2	127.02	40.55
8. Italy	2,266.9	60.78	37.30
9. Canada	1,235.0	35.67	34.62
10. United States	8,056.3	318.86	25.27
11. China, P. Rep.	31,700.0	1,360.72	23.30
12. Finland	115.5	5.47	21.12
13. Belgium	221.2	11.20	19.75
14. Netherlands	303.9	16.82	18.07
15. United Kingdom	1,087.2	64.31	16.91
16. Sweden	161.3	9.64	16.73
17. Portugal	166.5	10.43	15.96
18. Turkey	1,227.0	77.70	15.79
19. France	977.3	66.02	14.80
20. Australia	333.0	23.13	14.40
21. Russia	2,030.2	143.70	14.13
22. Mexico	1,708.9	122.33	13.97
23. Spain	534.8	46.50	11.50
24. Denmark	59.6	5.66	10.53
25. Brazil	1,014.6	202.77	5.00
26. Argentina	195.7	41.45	4.72
27. India	1,416.5	1,238.89	1.14



USD TO REPORTING CURRENCY

	COUNTRY	REPORTING CURRENCY	2013	2014	CHANGE
1.	Argentina	USD	1.000	1.000	0%
2.	Australia	USD	1.000	1.000	0%
3.	Austria	EUR	1.370	1.216	-11%
4.	Belgium	EUR	1.370	1.216	-11%
5.	Brazil	USD	1.000	1.000	0%
6.	Canada	USD	1.000	1.000	0%
7.	China, P. Rep.	USD	1.000	1.000	0%
8.	Czech Republic	CZK	0.050	0.044	-13%
9.	Denmark	EUR	1.370	1.216	-11%
10.	Finland	EUR	1.370	1.216	-11%
11.	France	EUR	1.370	1.216	-11%
12.	Germany	EUR	1.370	1.216	-11%
13.	India	USD	1.000	1.000	0%
14.	Italy	EUR	1.370	1.216	-11%
15.	Japan	JPY	0.010	0.008	-14%
16.	Mexico	USD	1.000	1.000	0%
17.	Netherlands	EUR	1.370	1.216	-11%
18.	Portugal	EUR	1.370	1.216	-11%
19.	Russia	USD	1.000	1.000	0%
20.	Spain	EUR	1.370	1.216	-11%
21.	South Korea	USD	1.000	1.000	0%
22.	Sweden	EUR	1.370	1.216	-11%
23.	Switzerland	EUR	1.370	1.216	-11%
24.	Taiwan	USD	1.000	1.000	0%
25.	Turkey	EUR	1.370	1.216	-11%
26.	United Kingdom	GBP	1.649	1.553	-6%
27.	United States	USD	1.000	1.000	0%

MARKET INTELLIGENCE PROVIDED BY

GARDNER RESEARCH

gardnerweb.com/research

View these and other Gardner Research reports at GARDNERWEB.COM

- Metalworking Capital Spending Survey
- Tooling & Workholding Survey
- World Machine Tool Survey
- Plastics Capital Spending Survey
- Gardner Business Index
- Top Shops Benchmarking Survey
- Media Usage in Manufacturing Facilities

A PRODUCT OF



GARDNER

Business Media, Inc.

Media that move manufacturing

6915 Valley Avenue Cincinnati, OH 45244-3029
Phone: 513.527.8800 Fax: 513.527.8801

gardnerweb.com

ANEXO A

World Machine-Tool Output & Consumption Survey

ANEXO B

Esquema da Ligação Elétrica

ANEXO C

Desenhos 2D da Estrutura da Máquina

ANEXO D

Dimensões do fuso

ANEXO E

Dados do perfil bosch

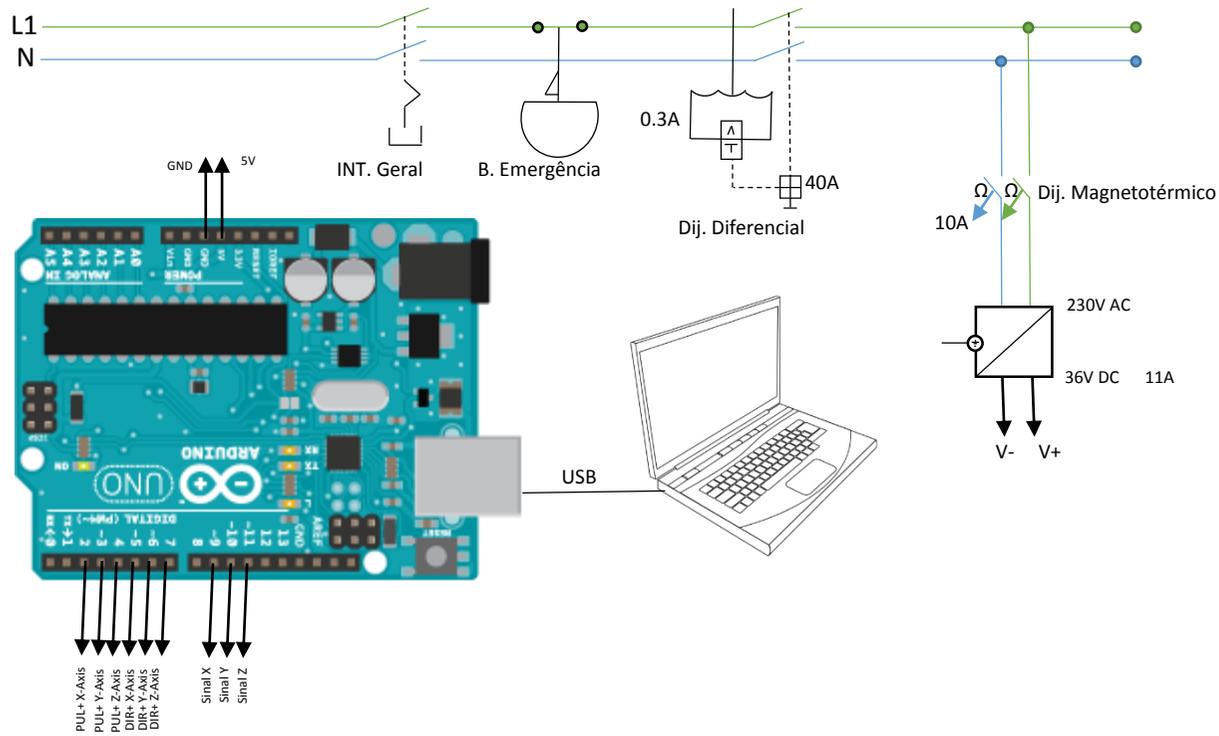
ANEXO F

Análise de Tensões no tampo inicial

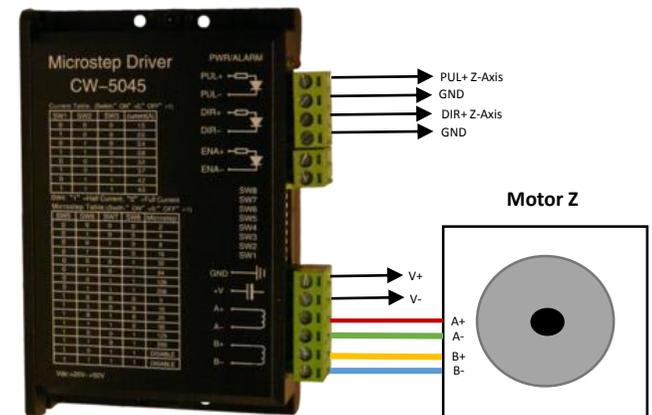
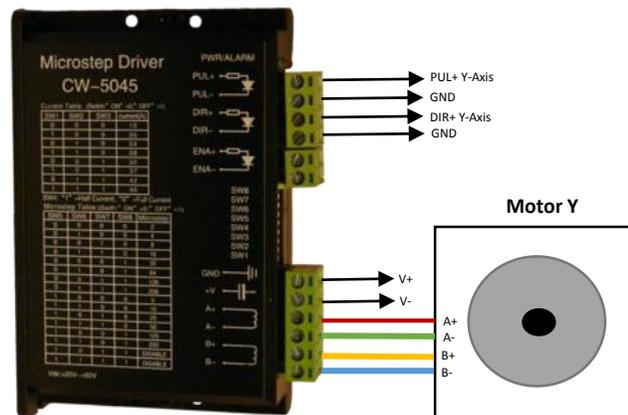
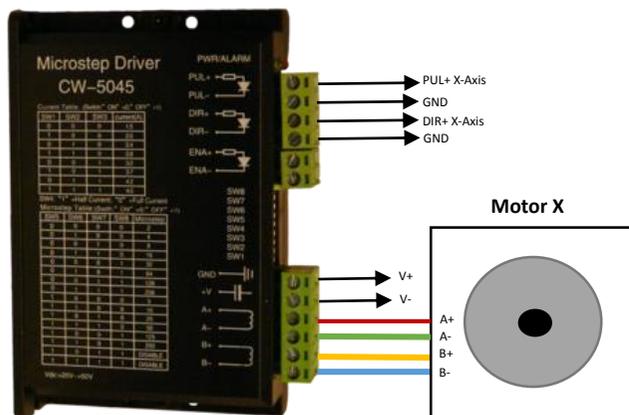
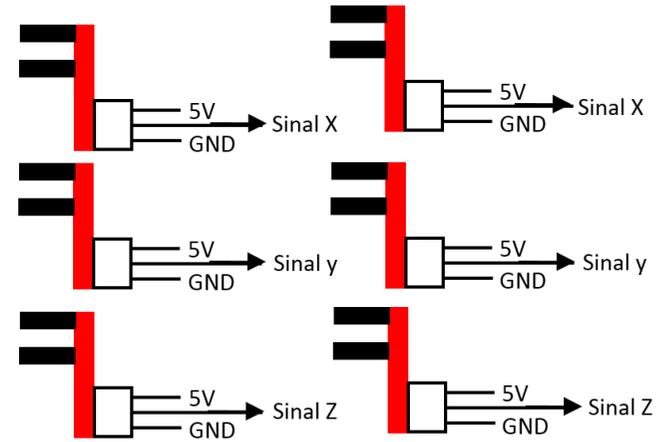
ANEXO G

Análise de Tensões no perfil bosch

ESQUEMA DE LIGAÇÃO ELETRICA



Sensores óticos F04660



ANEXO A

World Machine-Tool Output & Consumption Survey

ANEXO B

Esquema da Ligação Elétrica

ANEXO C

Desenhos 2D da Estrutura da Máquina

ANEXO D

Dimensões do fuso

ANEXO E

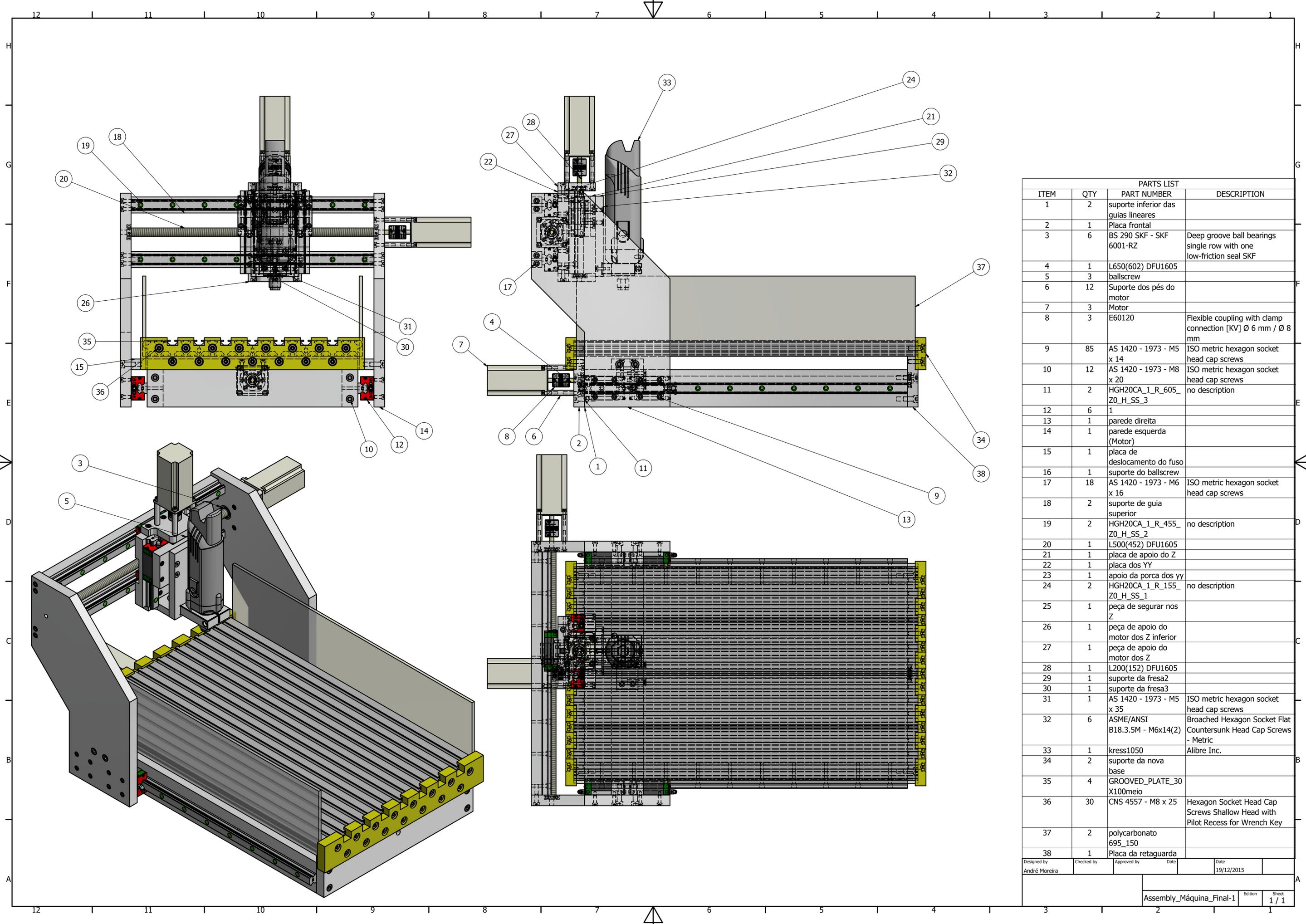
Dados do perfil bosch

ANEXO F

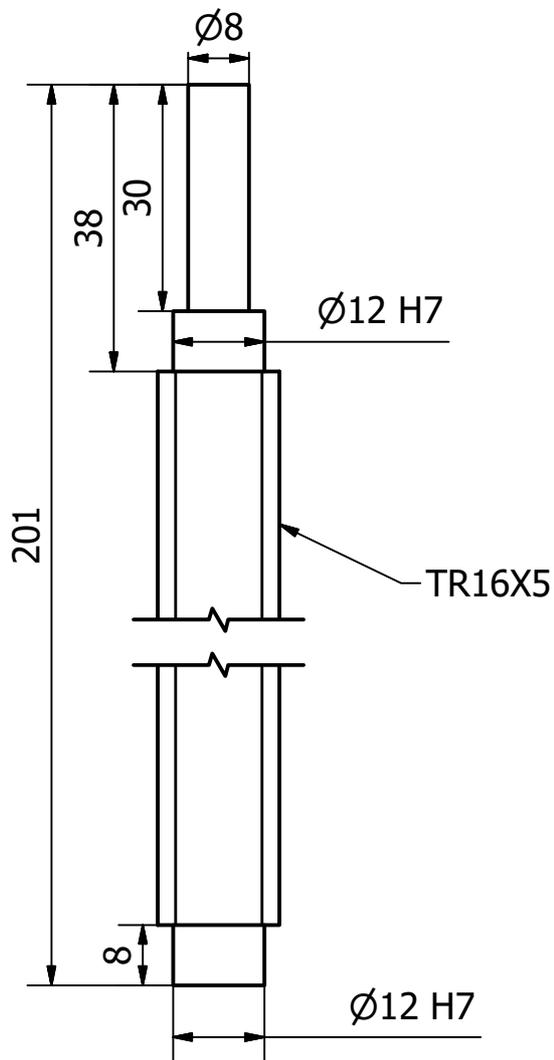
Análise de Tensões no tampo inicial

ANEXO G

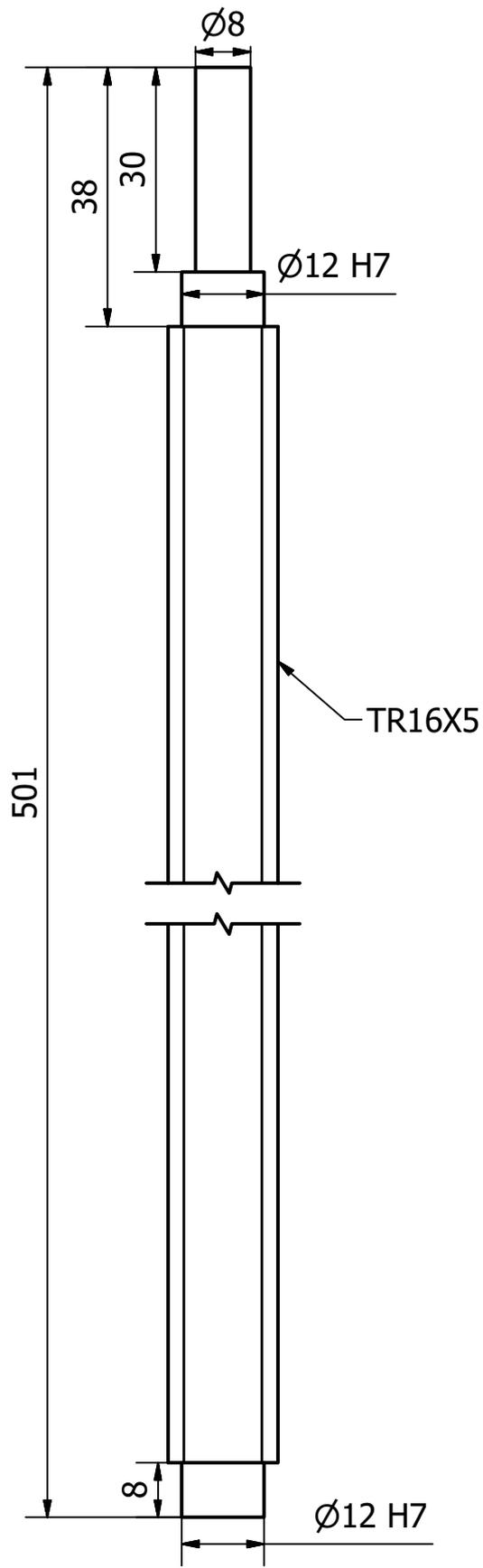
Análise de Tensões no perfil bosch



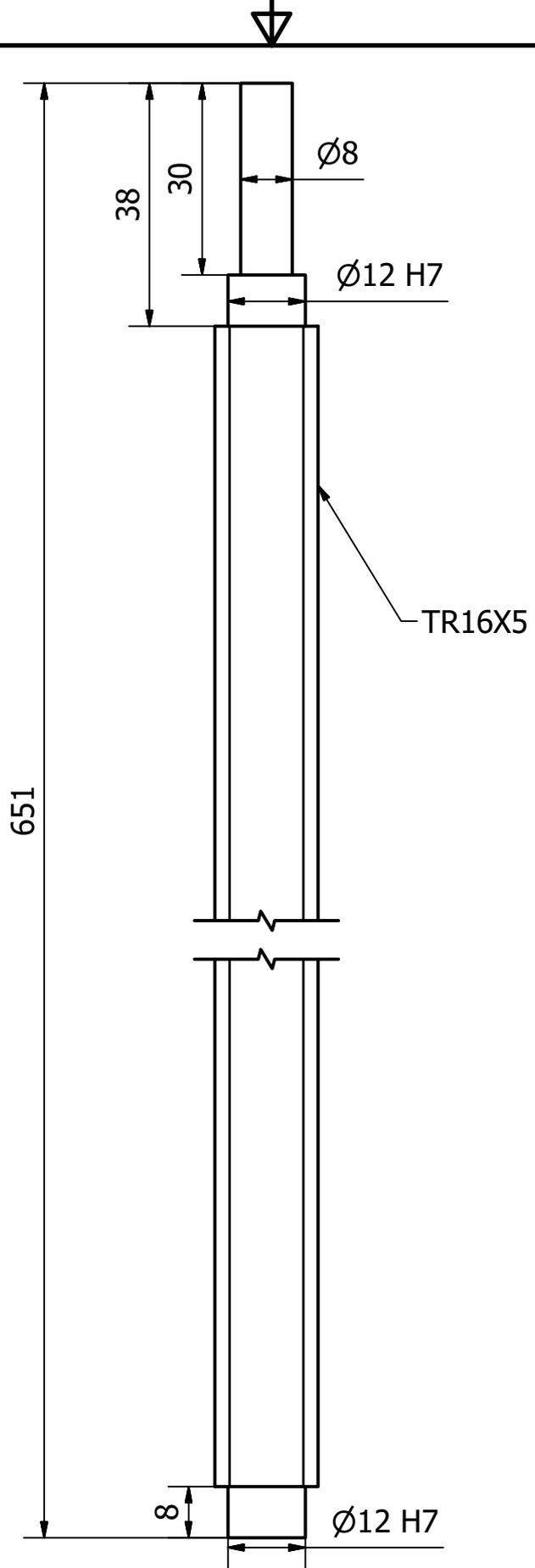
PARTS LIST				
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION	
1	2	suporte inferior das guias lineares		
2	1	Placa frontal		
3	6	BS 290 SKF - SKF 6001-RZ	Deep groove ball bearings single row with one low-friction seal SKF	
4	1	L650(602) DFU1605		
5	3	ballscrew		
6	12	Suporte dos pés do motor		
7	3	Motor		
8	3	E60120	Flexible coupling with clamp connection [KV] Ø 6 mm / Ø 8 mm	
9	85	AS 1420 - 1973 - M5 x 14	ISO metric hexagon socket head cap screws	
10	12	AS 1420 - 1973 - M8 x 20	ISO metric hexagon socket head cap screws	
11	2	HGH20CA_1_R_605_Z0_H_SS_3	no description	
12	6	1		
13	1	parede direita		
14	1	parede esquerda (Motor)		
15	1	placa de deslocamento do fuso		
16	1	suporte do ballscrew		
17	18	AS 1420 - 1973 - M6 x 16	ISO metric hexagon socket head cap screws	
18	2	suporte de guia superior		
19	2	HGH20CA_1_R_455_Z0_H_SS_2	no description	
20	1	L500(452) DFU1605		
21	1	placa de apoio do Z		
22	1	placa dos YY		
23	1	apoio da porca dos yy		
24	2	HGH20CA_1_R_155_Z0_H_SS_1	no description	
25	1	peça de segurar nos Z		
26	1	peça de apoio do motor dos Z inferior		
27	1	peça de apoio do motor dos Z		
28	1	L200(152) DFU1605		
29	1	suporte da fresa2		
30	1	suporte da fresa3		
31	1	AS 1420 - 1973 - M5 x 35	ISO metric hexagon socket head cap screws	
32	6	ASME/ANSI B18.3.5M - M6x14(2)	Broached Hexagon Socket Flat Countersunk Head Cap Screws - Metric	
33	1	kress1050	Alibre Inc.	
34	2	suporte da nova base		
35	4	GROOVED_PLATE_30 X100meio		
36	30	CNS 4557 - M8 x 25	Hexagon Socket Head Cap Screws Shallow Head with Pilot Recess for Wrench Key	
37	2	polycarbonato 695_150		
38	1	Placa da retaguarda		
Designed by		Checked by	Approved by	Date
André Moreira				19/12/2015
Assembly_Máquina_Final-1			Edition	Sheet
			1 / 1	1 / 1



Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 19/12/2015	
			L200(152) DFU1605	Edition	Sheet 1 / 1

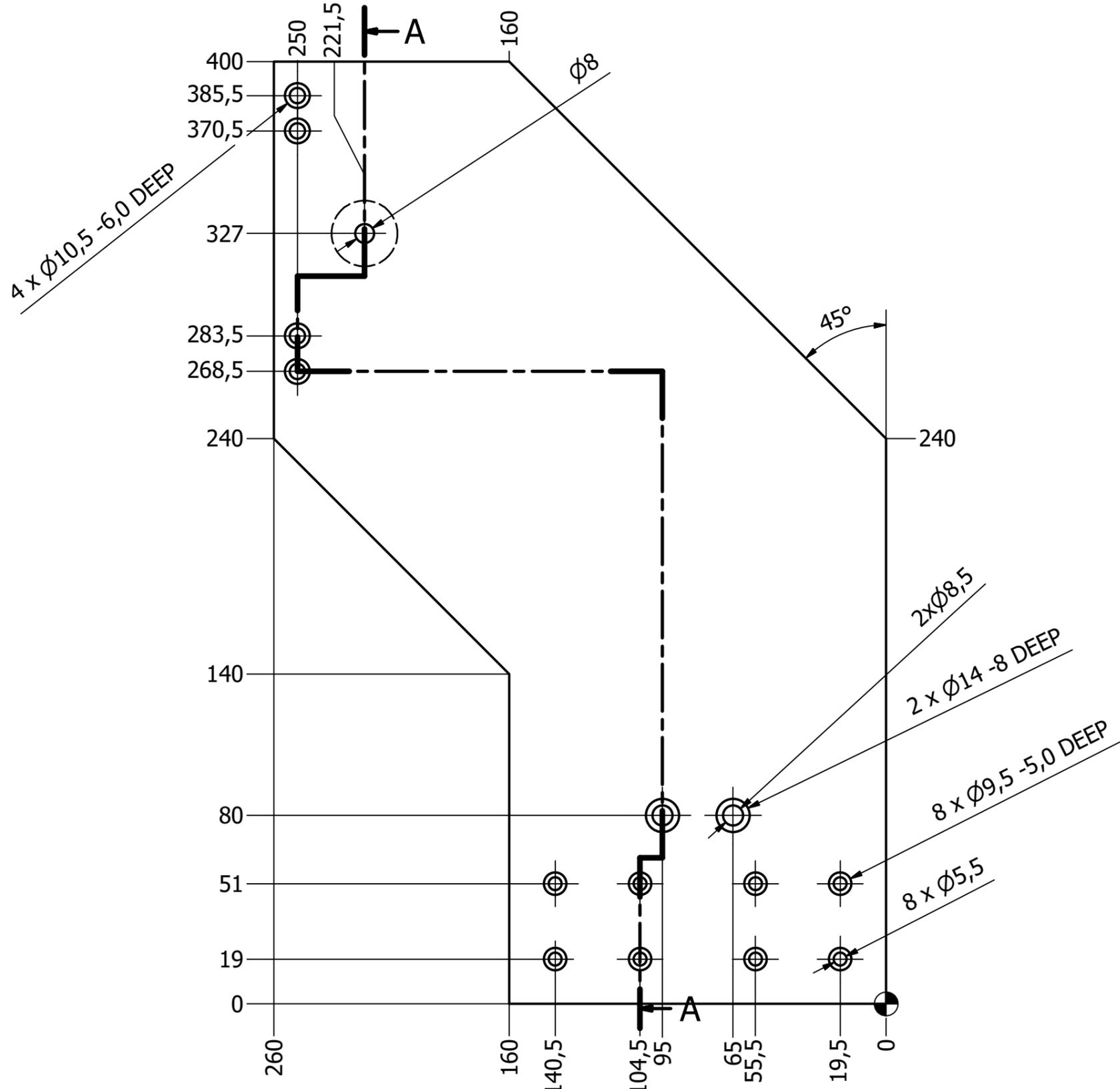
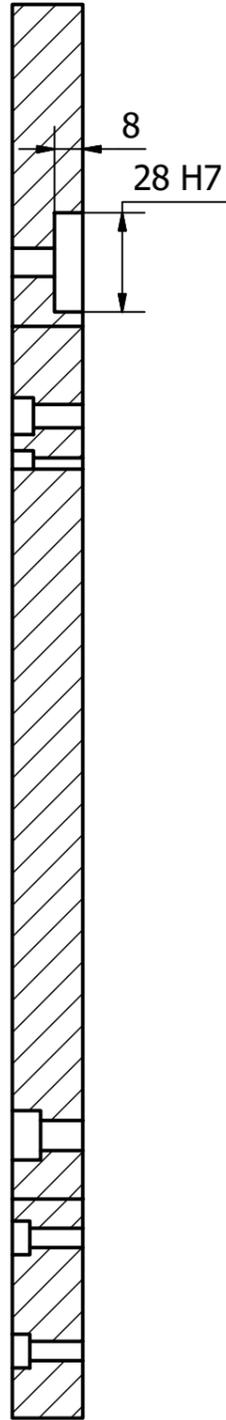


Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 19/12/2015	
			L500(452) DFU1605		
			Edition	Sheet 1 / 1	



Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 19/12/2015	
			L650(602) DFU1605		
			Edition	Sheet 1 / 1	

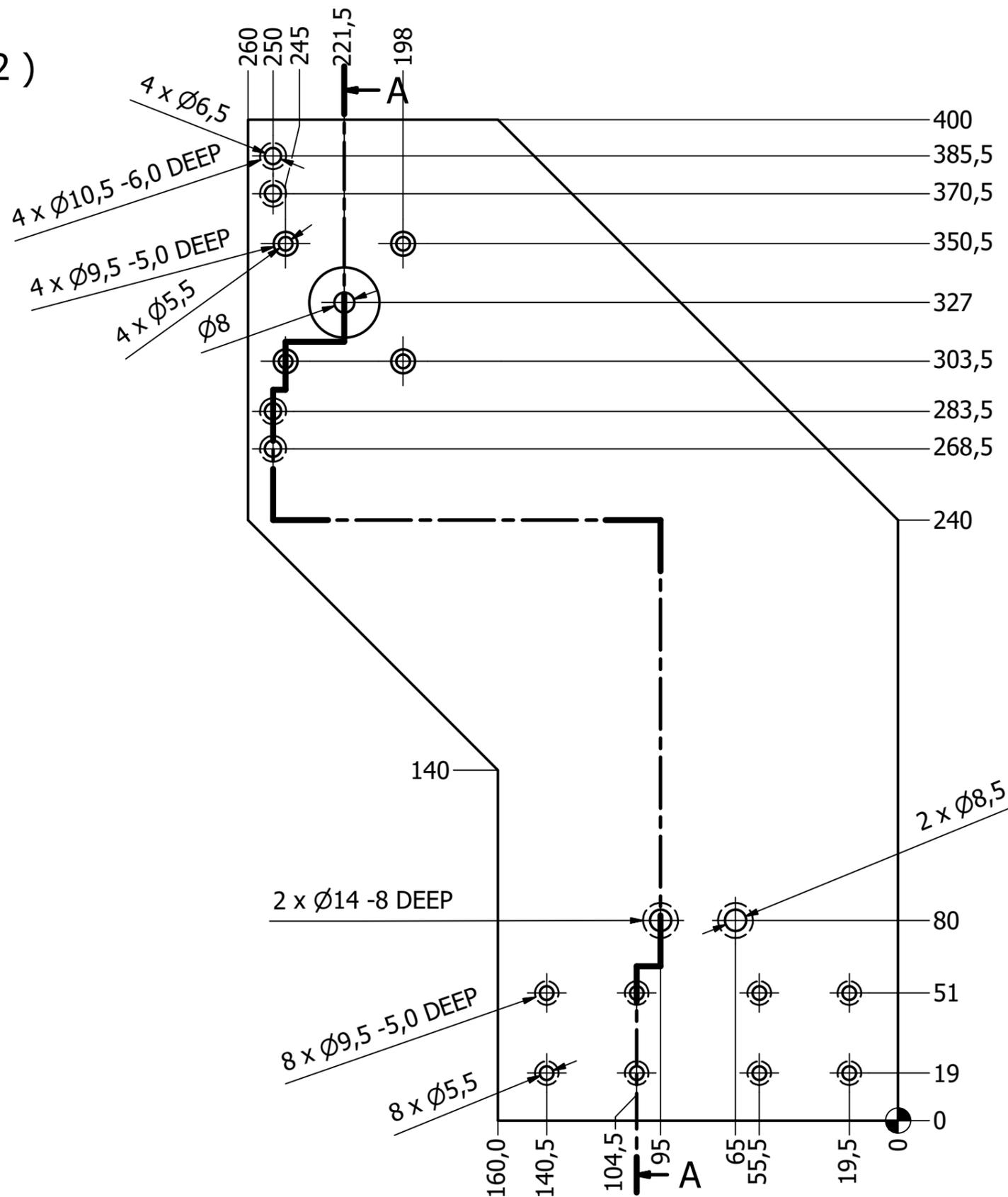
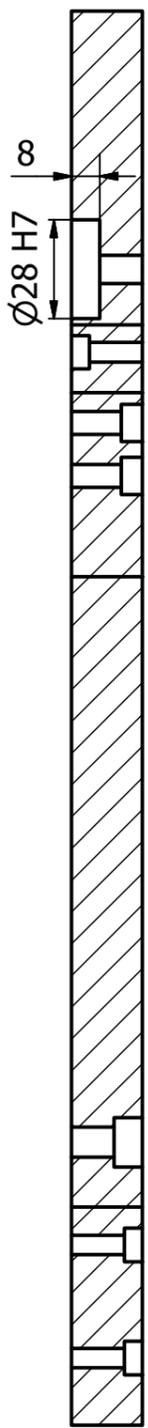
A-A (1:2)



Escala: 1:2

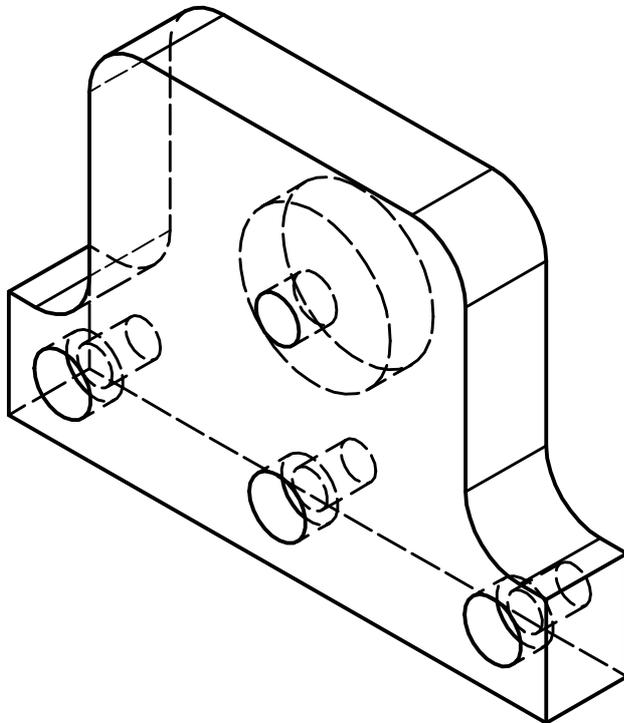
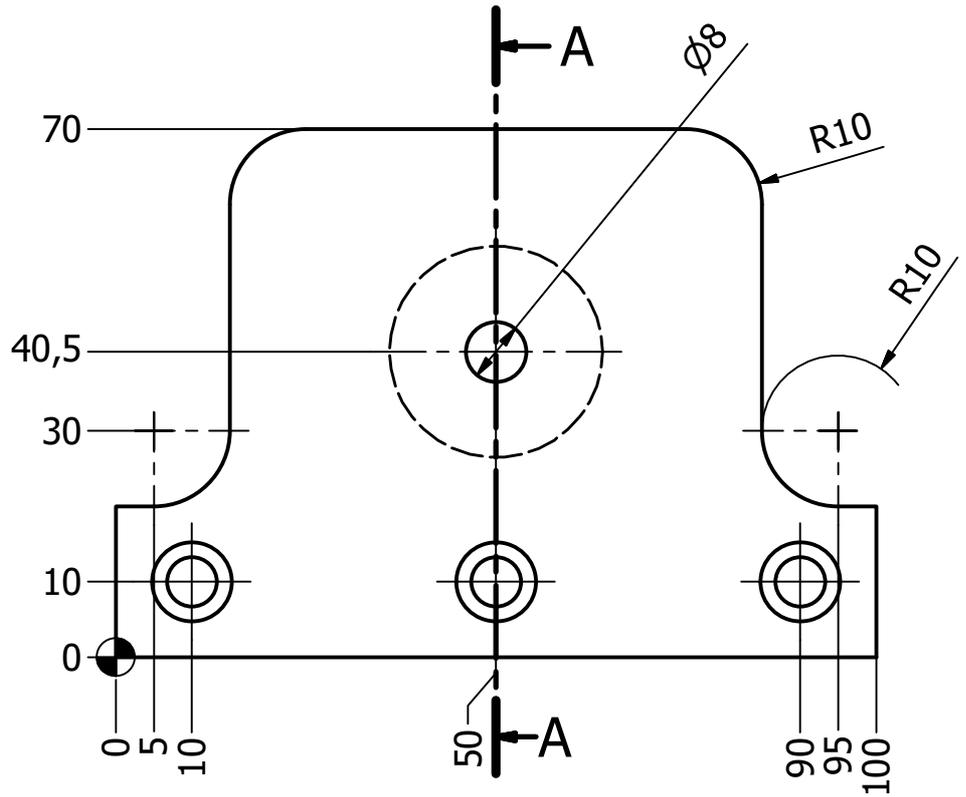
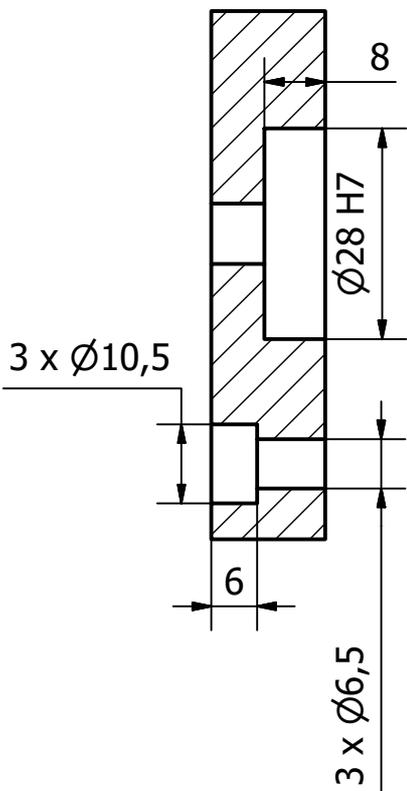
Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 19/12/2015	
			parede direita		
			Edition	Sheet 1 / 1	

A-A (1:2)



Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 19/12/2015	
parede esquerda (Motor)			Edition	Sheet 1 / 1	

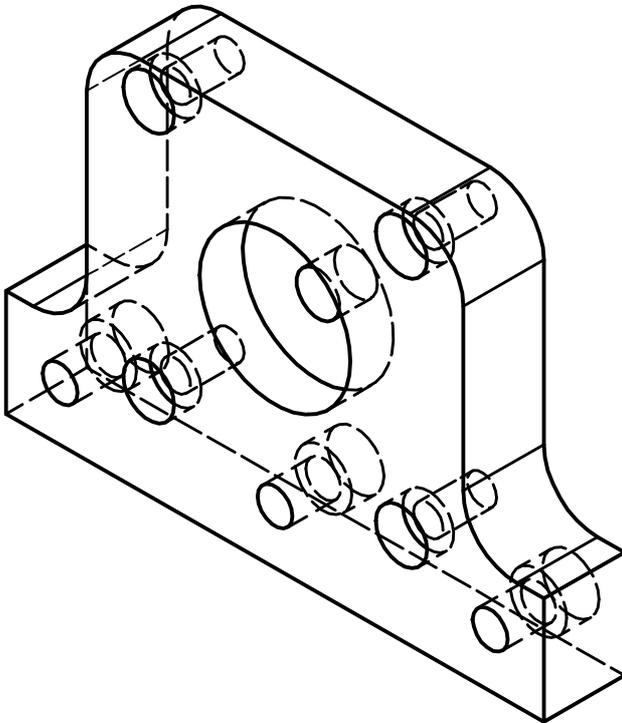
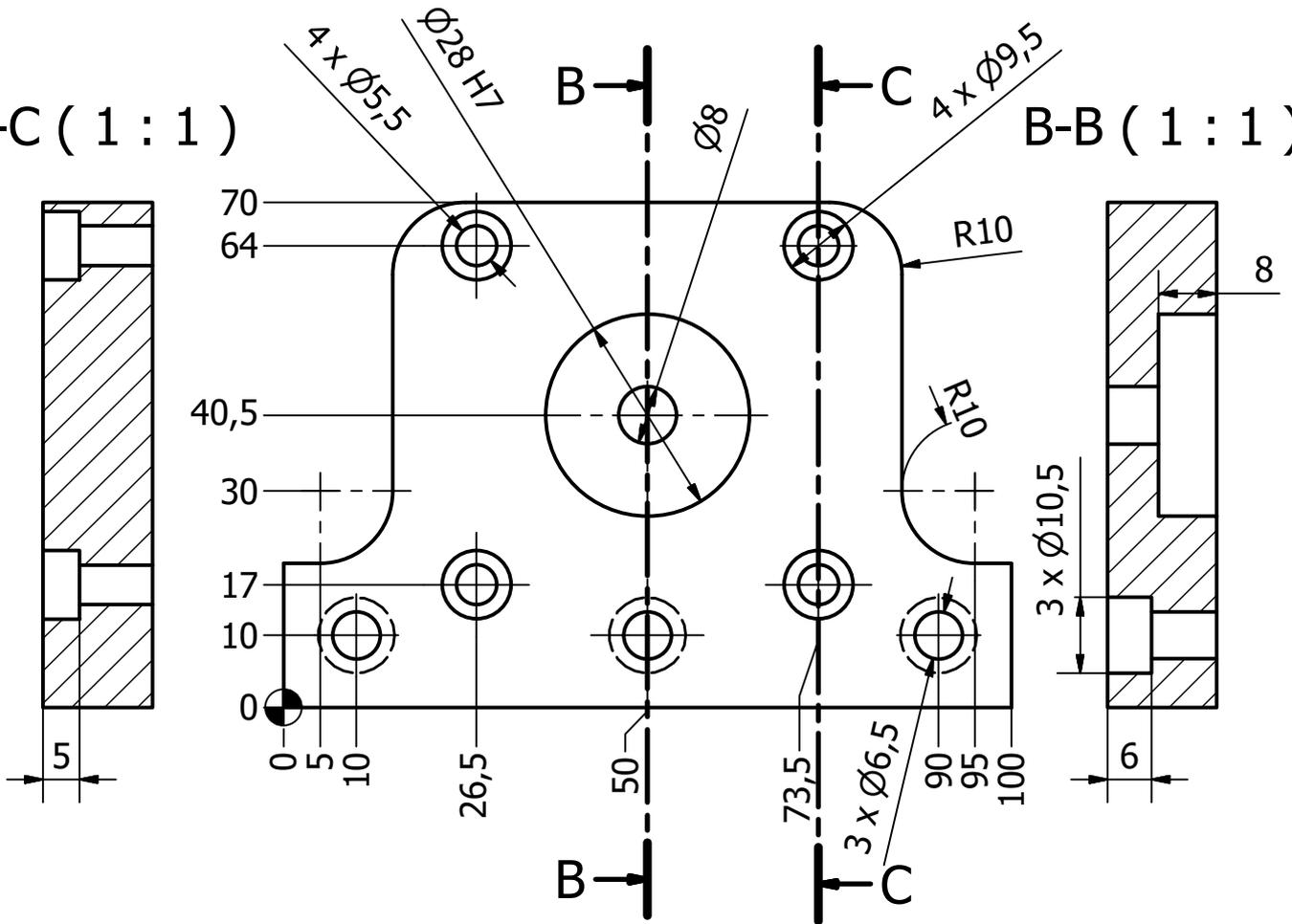
A-A (1 : 1)



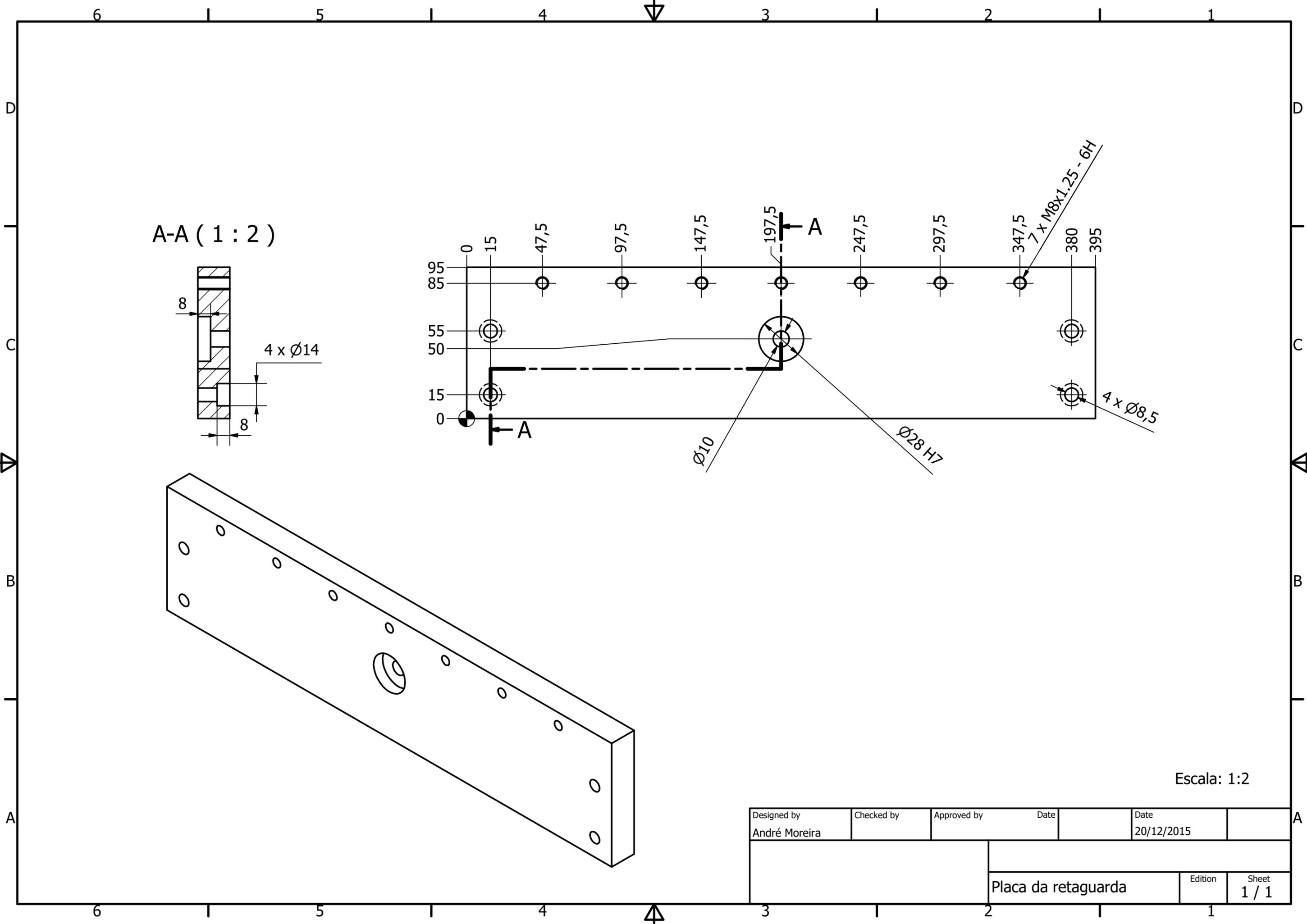
Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 20/12/2015
			peça de apoio do motor dos Z inferior	
			Edition	Sheet 1 / 1

C-C (1:1)

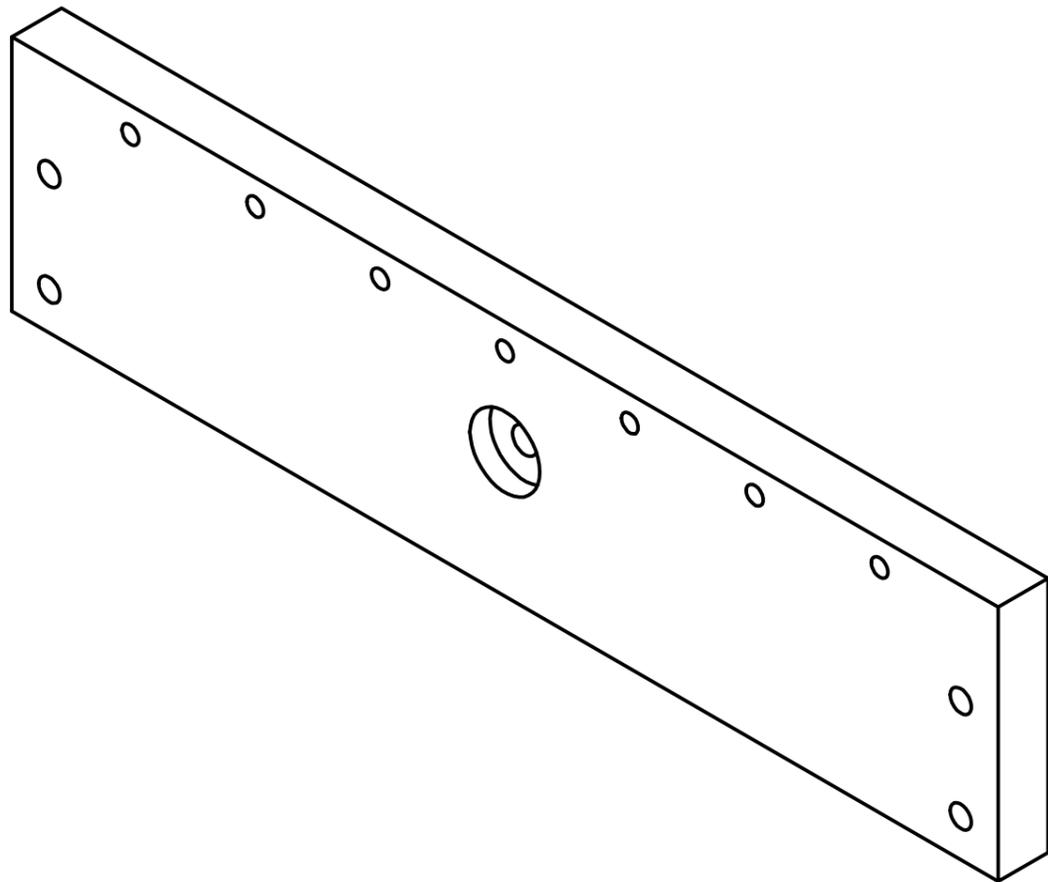
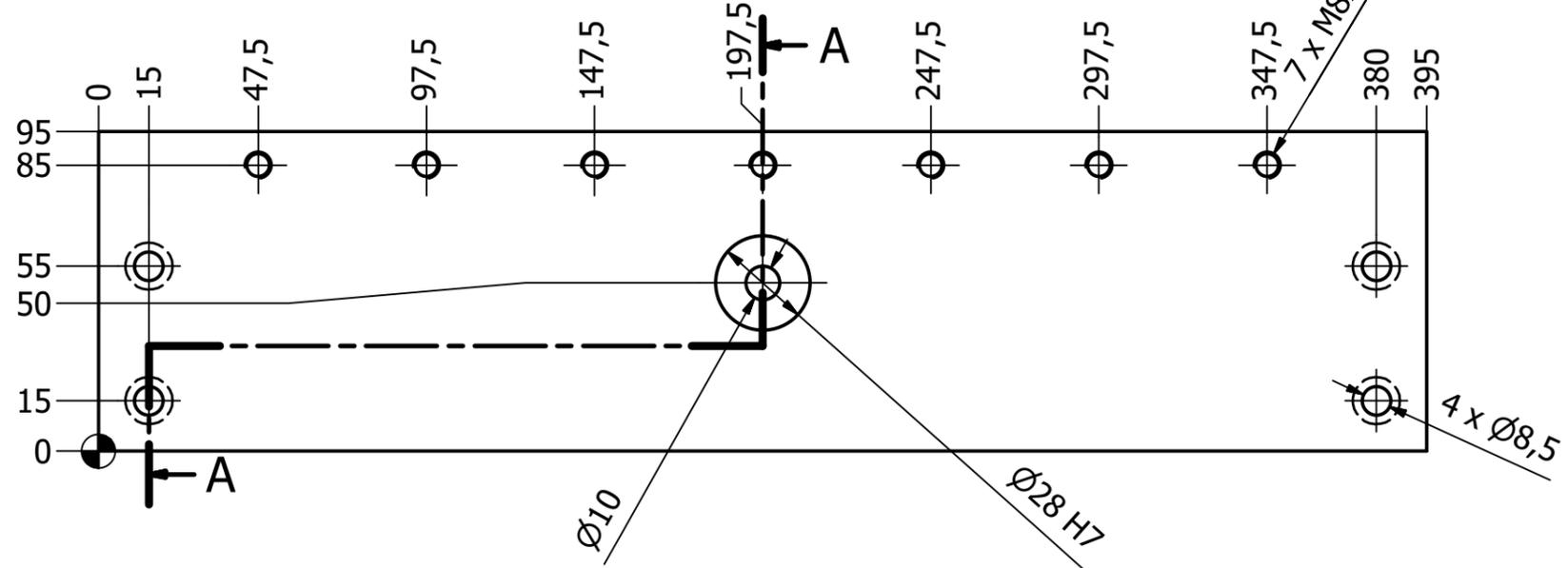
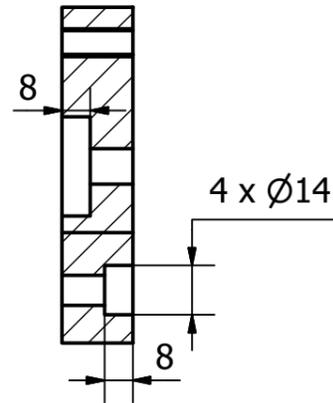
B-B (1:1)



Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 20/12/2015
			peça de apoio do motor dos	
			Edition Z	Sheet 1 / 1

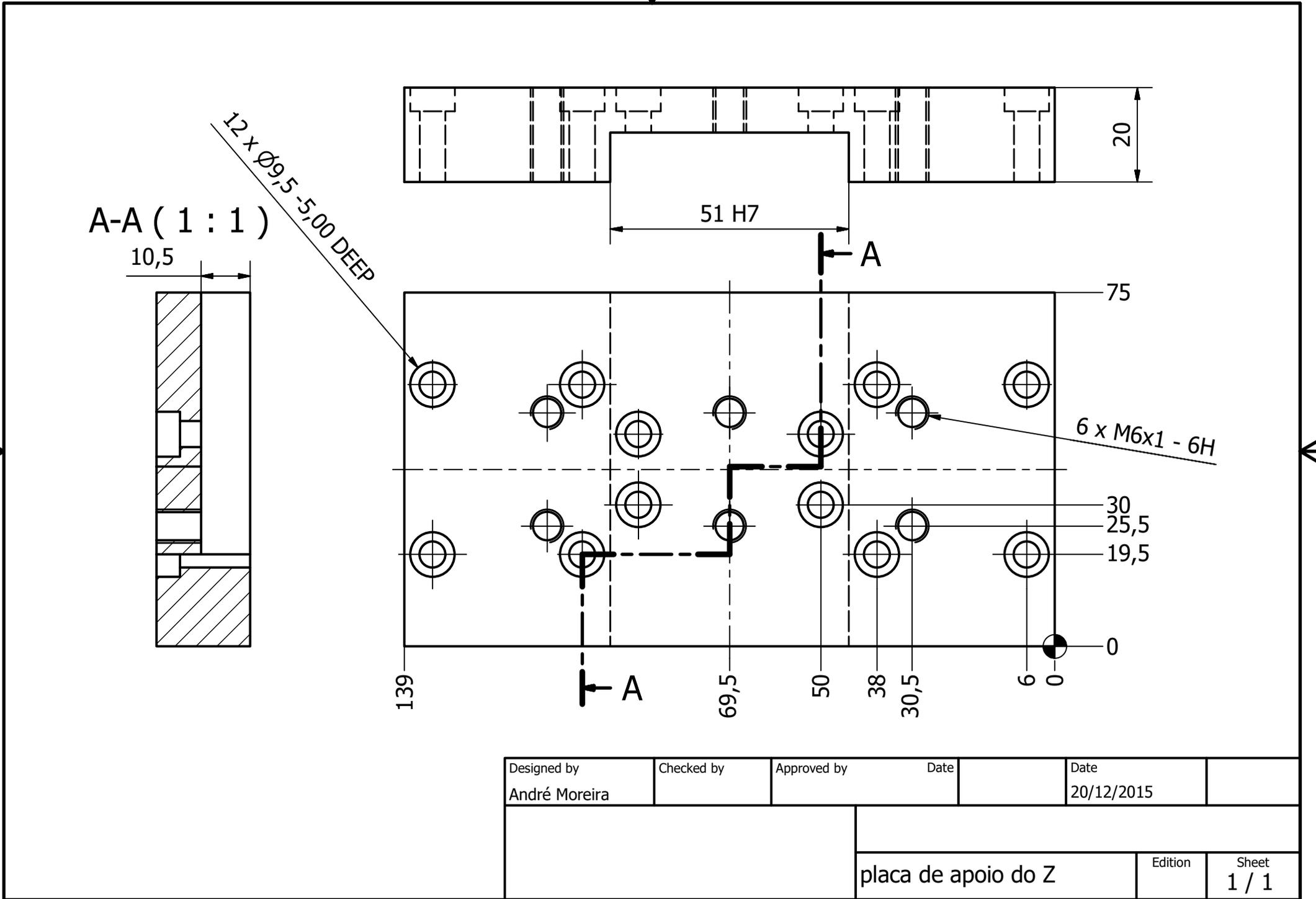


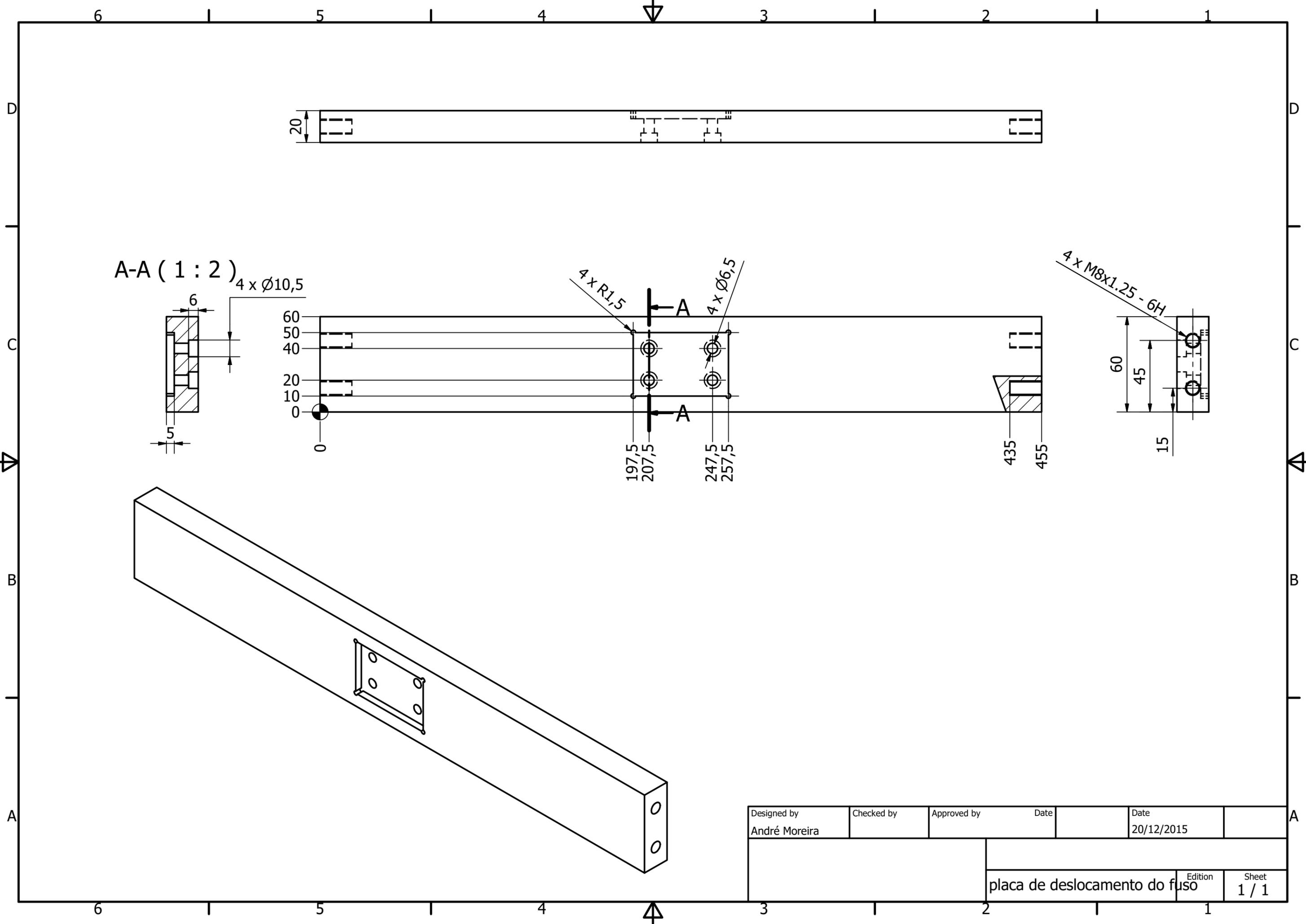
A-A (1 : 2)



Escala: 1:2

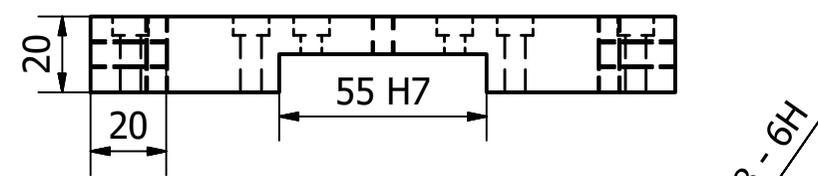
Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 20/12/2015	
			Placa da retaguarda		Sheet 1 / 1
			Edition		



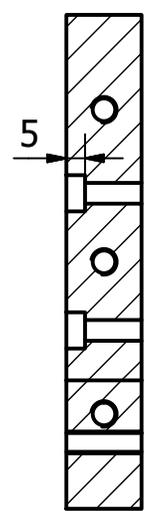


Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 20/12/2015
			Edition	
			Sheet 1 / 1	

placa de deslocamento do fuso



A-A (1 : 2)

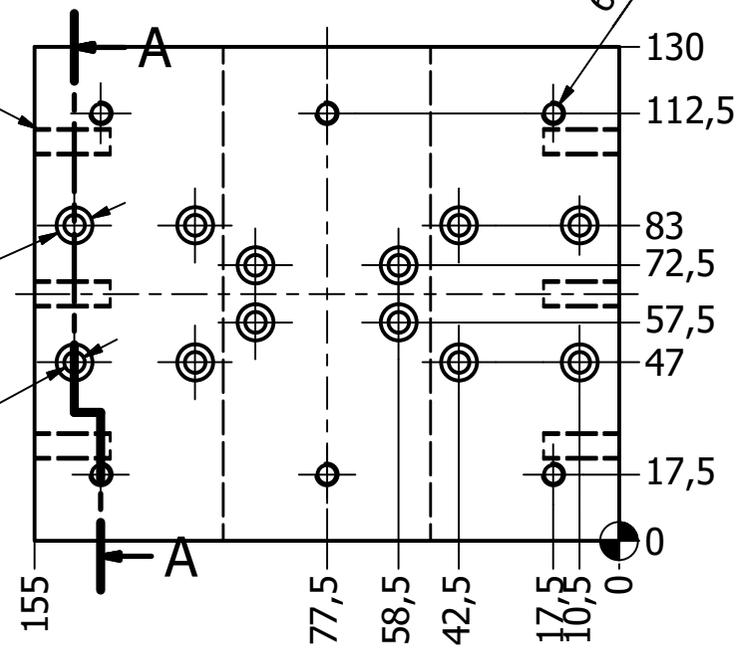


6 x M6x1 - 6H

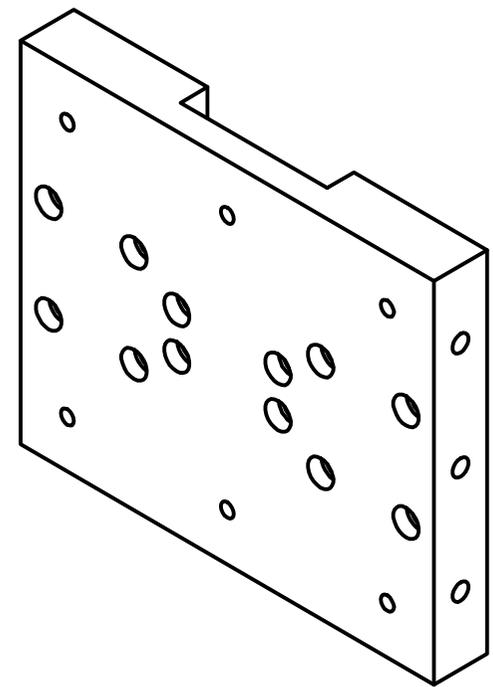
6 x M5x0.8 - 6H

12 x Ø9,5

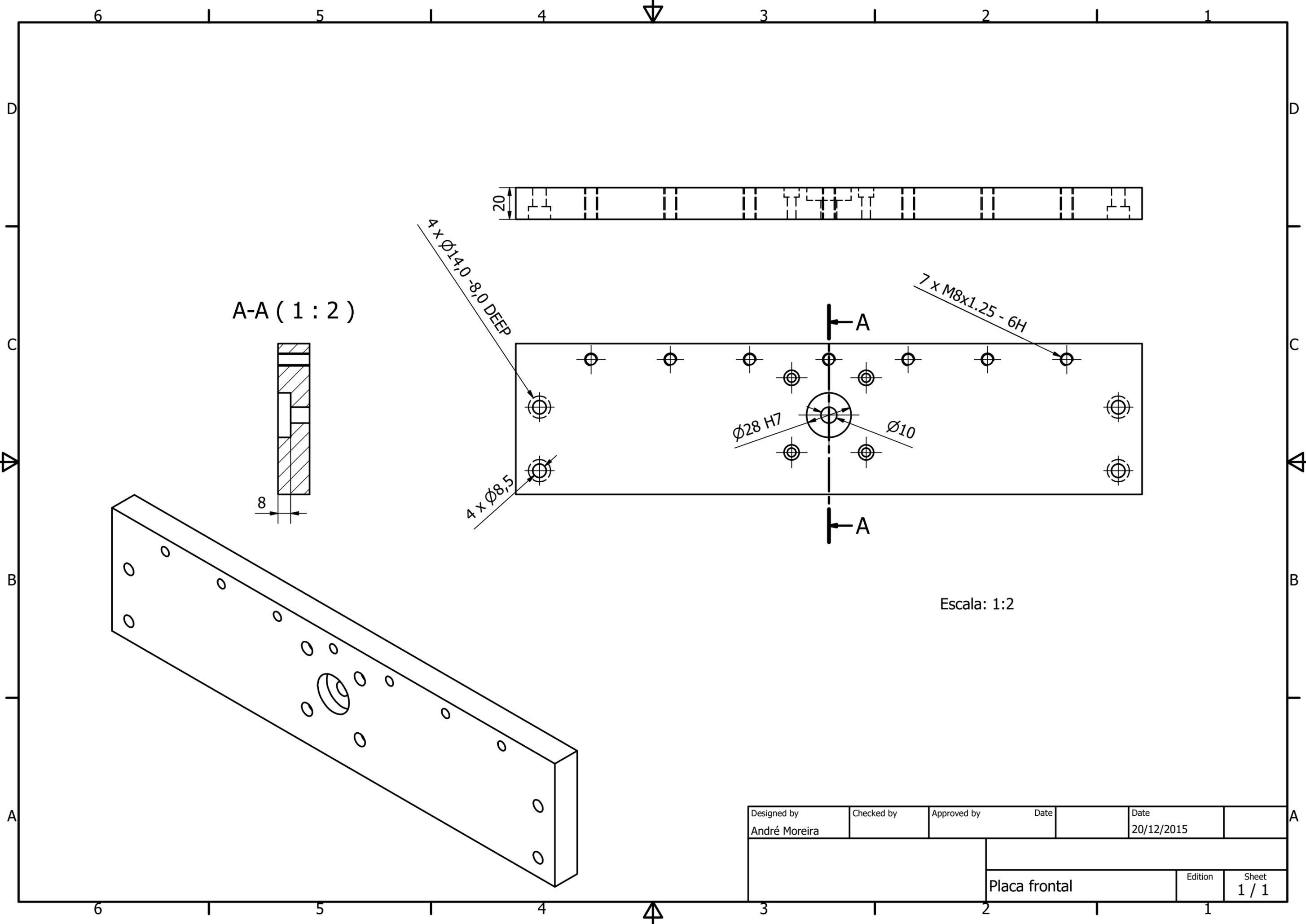
12 x Ø5,5



Escala: 1:2

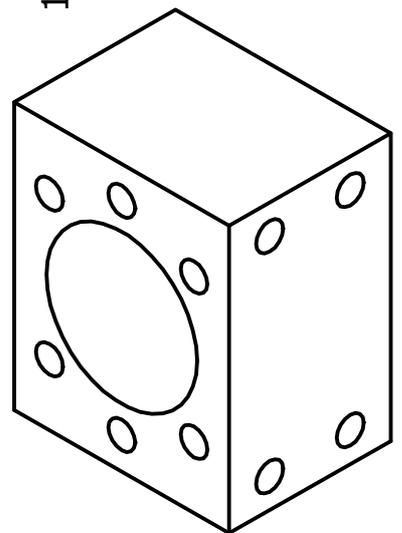
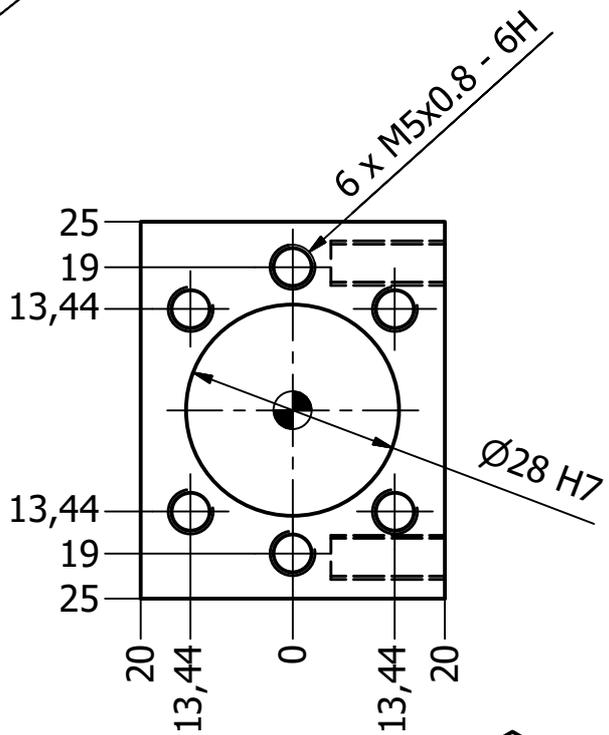
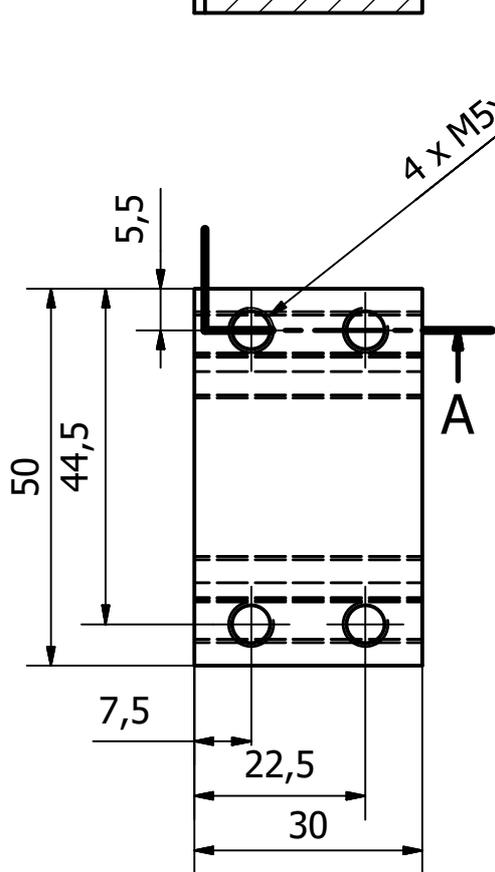
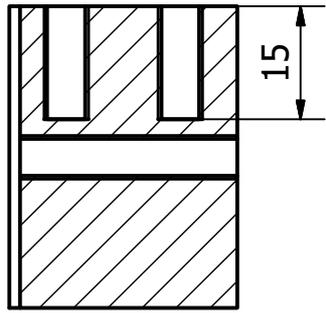


Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 20/12/2015	
			placa dos YY		
			Edition	Sheet 1 / 1	



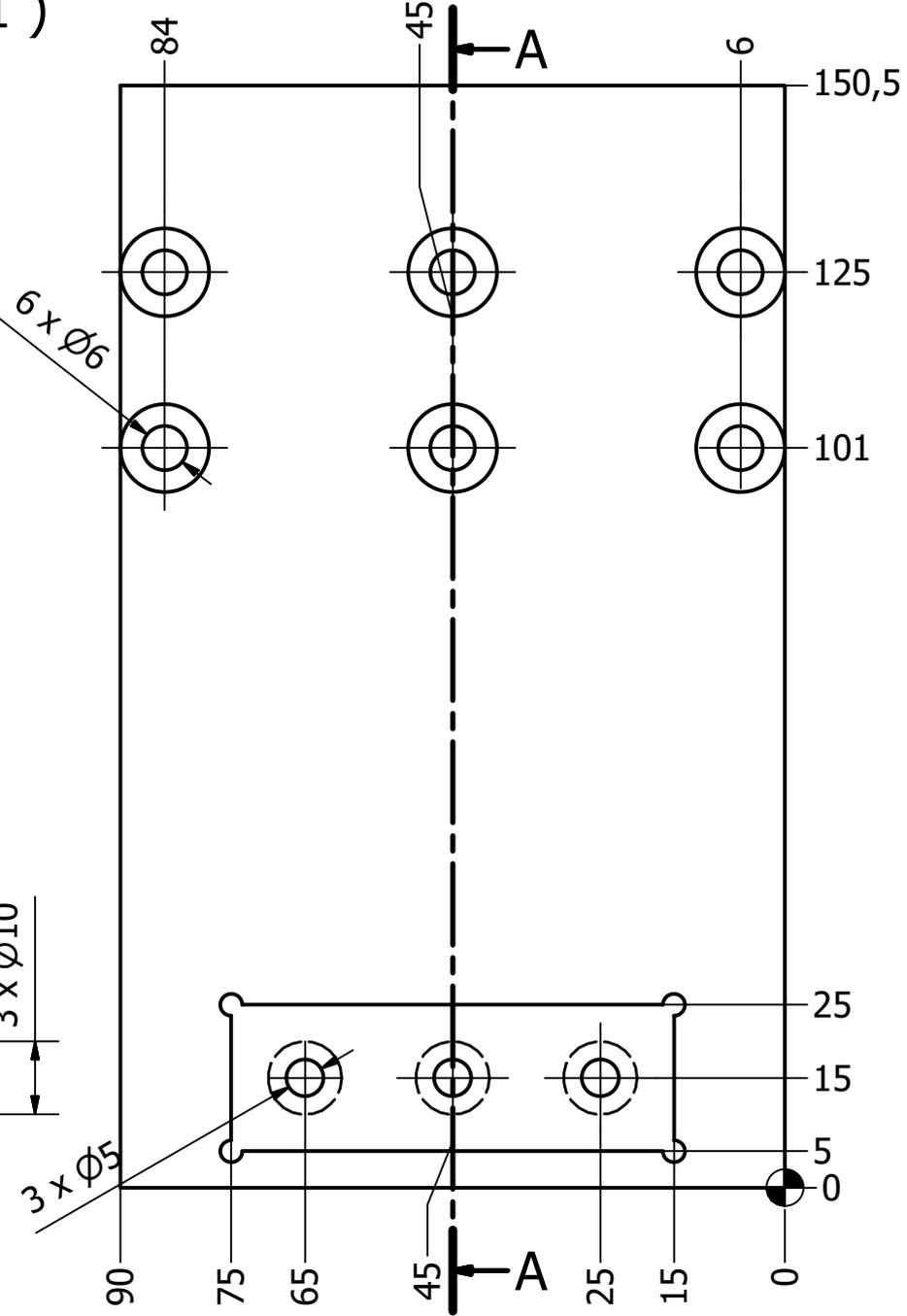
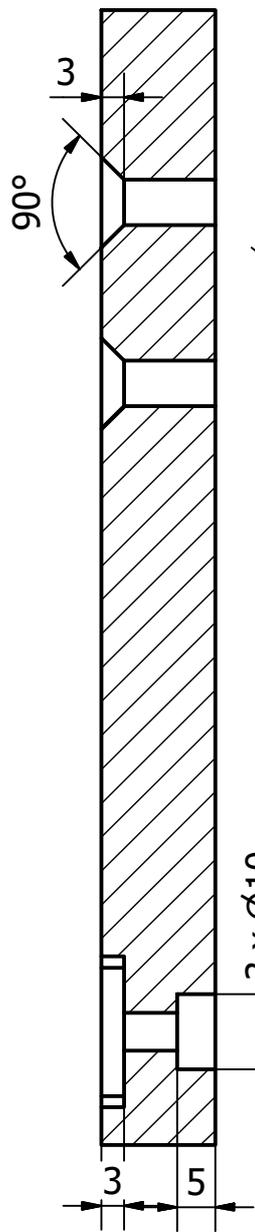
Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 20/12/2015	
			Placa frontal		Sheet 1 / 1
			Edition		

A-A (1 : 1)

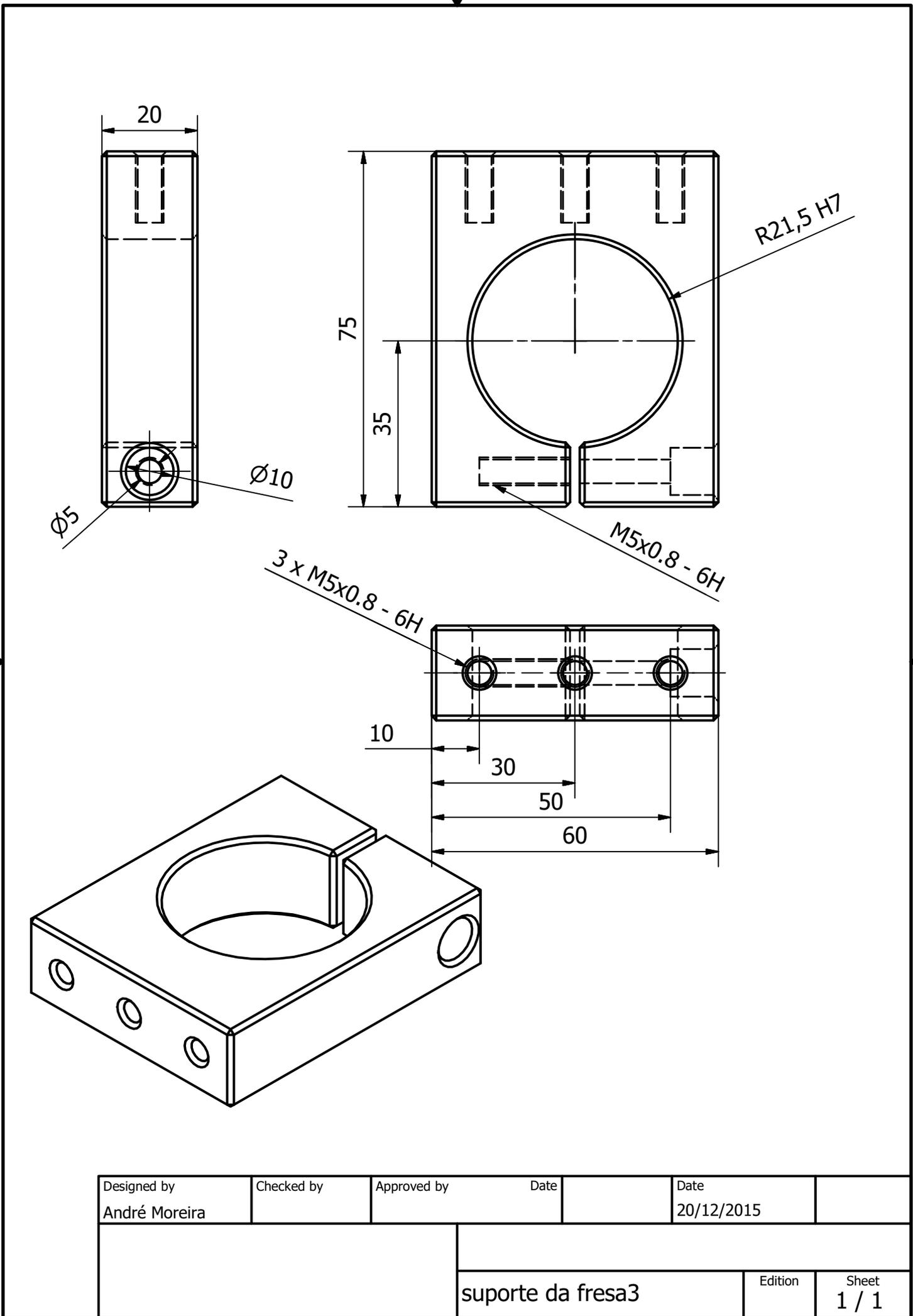


Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 20/12/2015
			Suporte ballscrew Z	
			Edition	Sheet 1 / 1

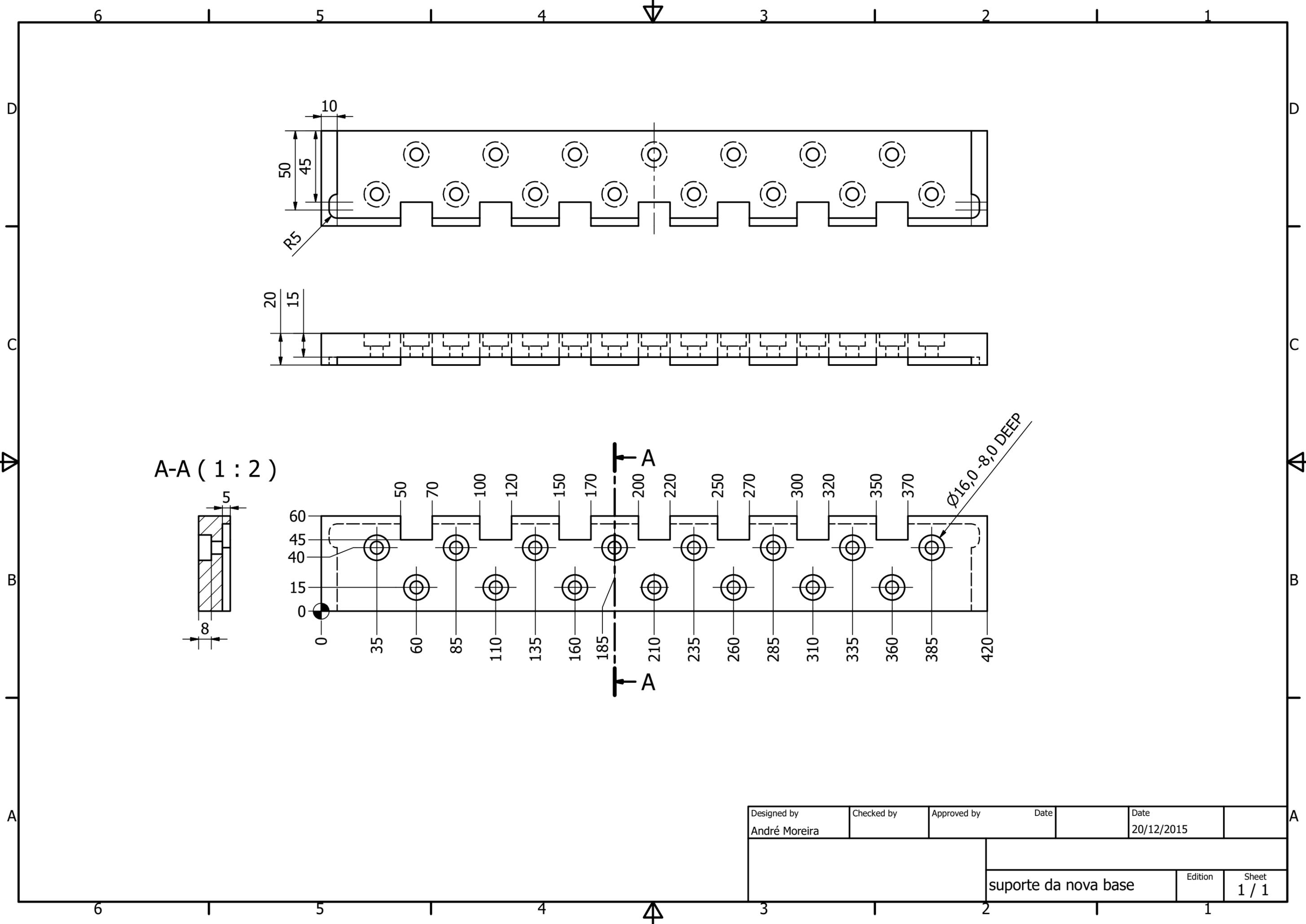
A-A (1 : 1)



Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 20/12/2015
			suporte da fresa2	
			Edition	Sheet 1 / 1



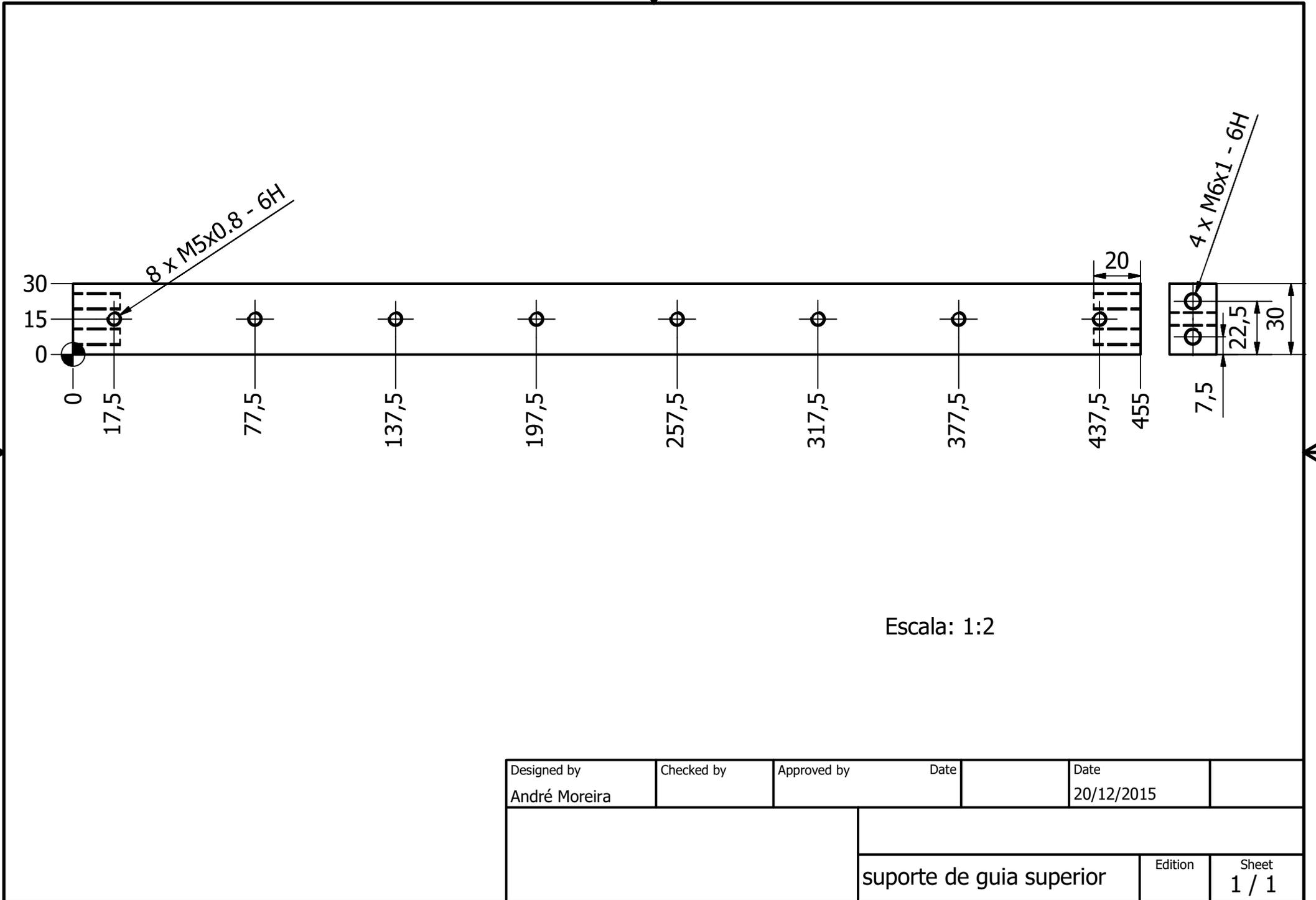
Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 20/12/2015	
			suporte da fresa3		
			Edition	Sheet 1 / 1	



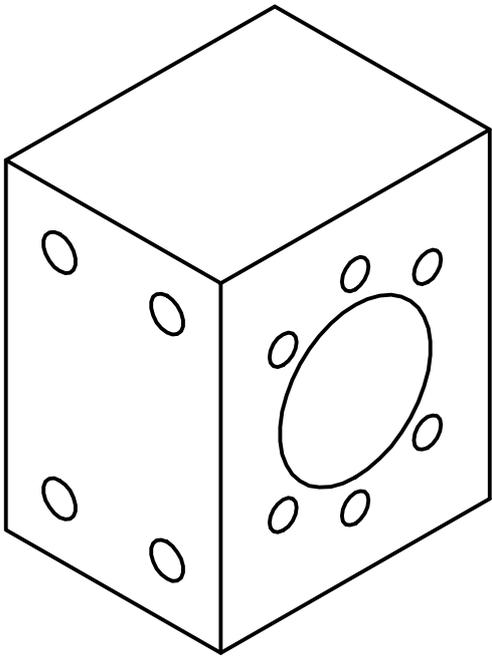
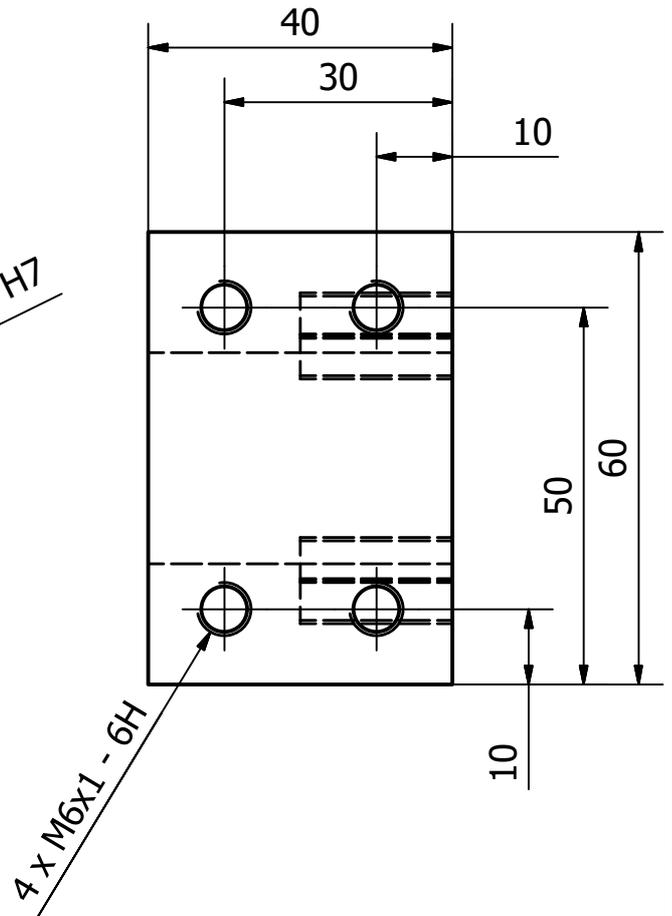
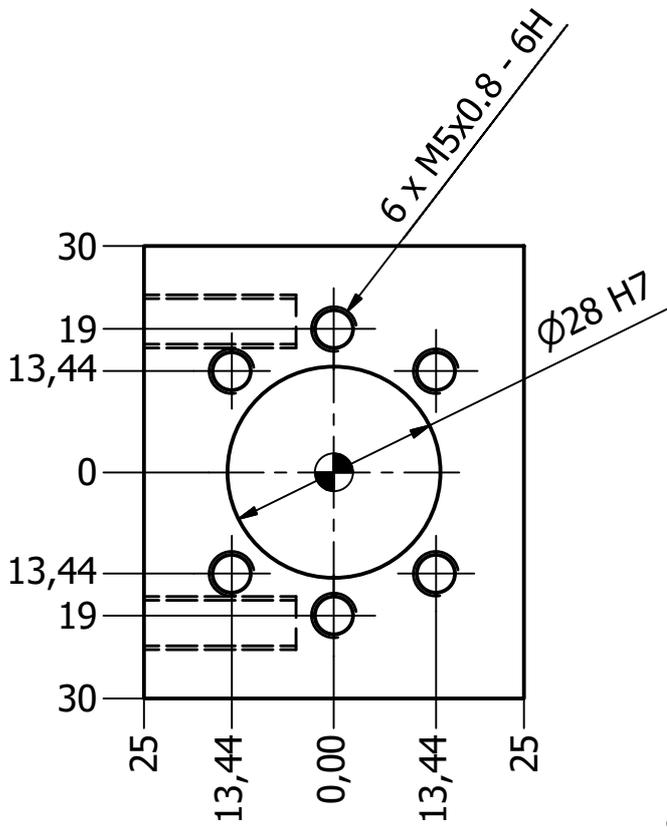
A-A (1 : 2)

Ø16,0 -8,0 DEEP

Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 20/12/2015
			suporte da nova base	
			Edition	Sheet 1 / 1

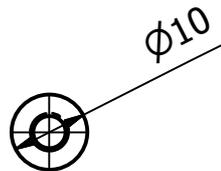
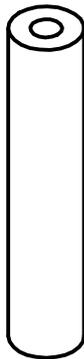
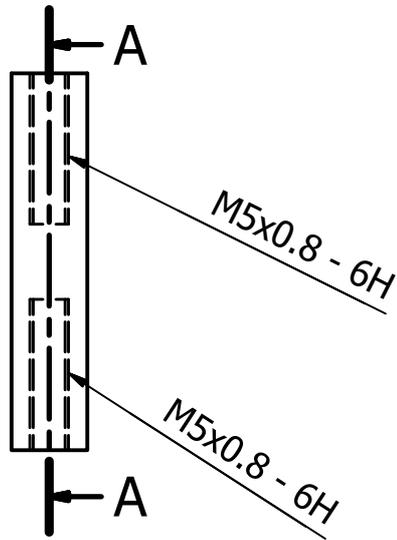
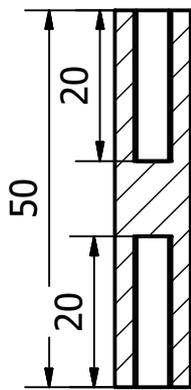


Designed by	Checked by	Approved by	Date	Date	
André Moreira				20/12/2015	
			suporte de guia superior		Edition
					Sheet
					1 / 1

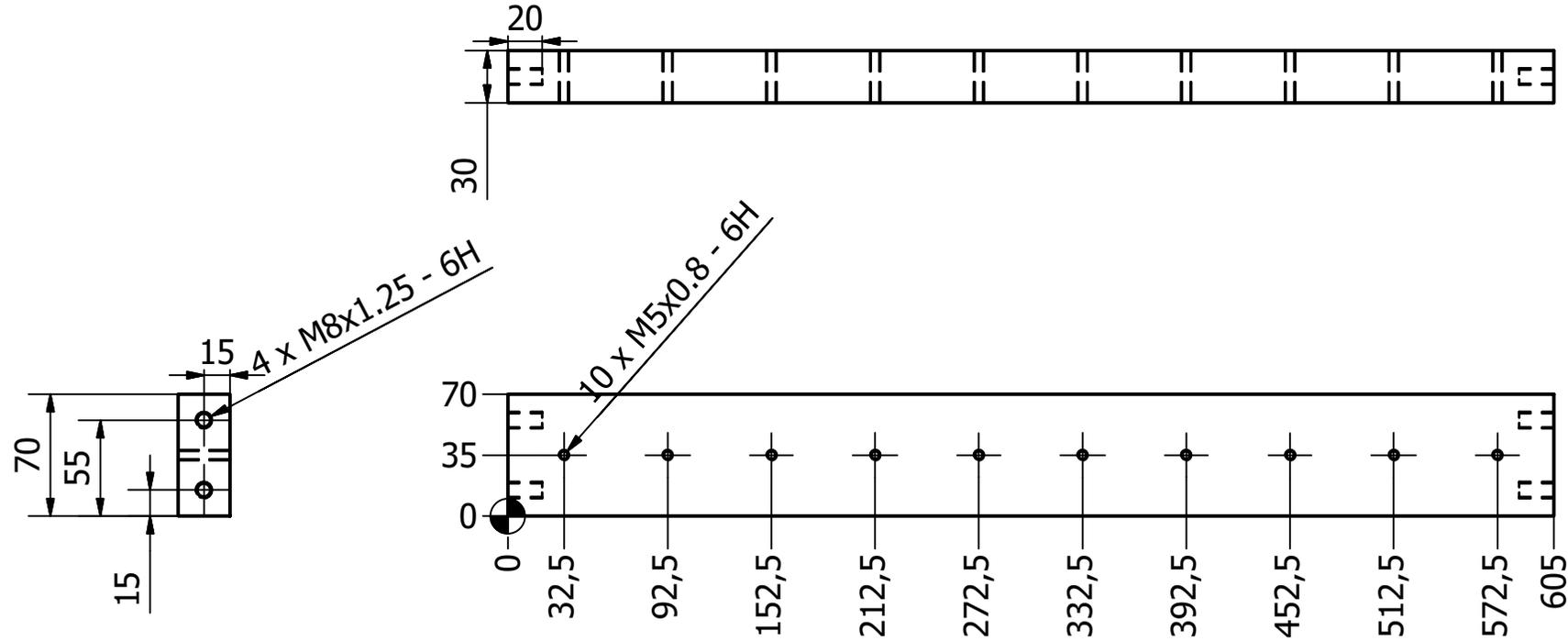


Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 20/12/2015
			suporte do ballscrew	
			Edition	Sheet 1 / 1

A-A (1 : 1)



Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 20/12/2015	
			Suporte dos pés do motor		
			Edition	Sheet 1 / 1	



Designed by André Moreira	Checked by	Approved by	Date	Date 20/12/2015	
			suporte inferior das guias lineares		Edition 1 / 1 Sheet 1 / 1

ANEXO A

World Machine-Tool Output & Consumption Survey

ANEXO B

Esquema da Ligação Elétrica

ANEXO C

Desenhos 2D da Estrutura da Máquina

ANEXO D

Dimensões do fuso

ANEXO E

Dados do perfil bosch

ANEXO F

Análise de Tensões no tampo inicial

ANEXO G

Análise de Tensões no perfil bosch

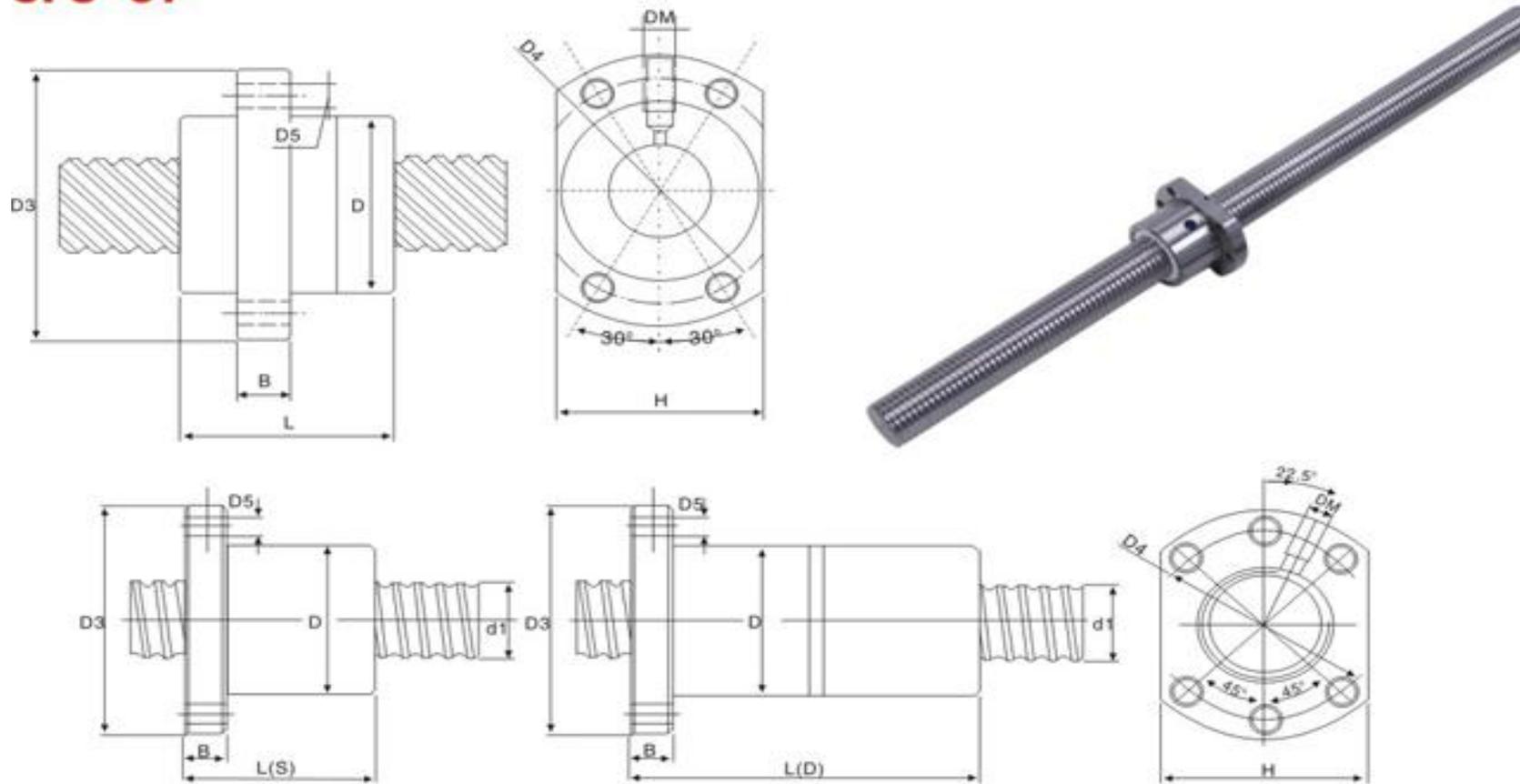
Ball screw



SFU	do	Lo	d	da	β	circulation	D	D1	D2	B	d2	d3	H	d	L	Ca (N)	Cao(N)
SFU 1605-3	16	5	15,5	3,175	5°41`	3	28	52	38	11	10	5,5	5,7	M 6	42	7600	13200
SFU 1605-4	16	5	15,5	3,175	5°41`	4	28	52	38	11	10	5,5	5,7	M 6	50	9500	17400
SFU 2005-3	20	5	19,5	3,175	4°33`	3	36	60	48	11	10	5,8	6	M 6	46	9022	17456
SFU 2005-4	20	5	19,5	3,175	4°33`	4	36	60	48	11	10	5,8	6	M 6	51	11082	23340
SFU 2505-3	25	5	24,5	3,175	3°39`	3	40	66	53	11	10	5,8	6	M 6	46	9807	22850
SFU 2505-4	25	5	24,5	3,175	3°39`	4	40	66	53	11	10	5,8	6	M 6	51	12533	30499
SFU 3505-3						3	50	82	67	13	12	7	7	M 6	48	11180	30401
SFU 3205-4	32	5	31,5	3,175	2°51`	4	50	82	67	13	12	7	7	M 6	53	14218	40699
SFU 3205-6						6	50	82	67	13	12	7	7	M 6	63	20202	60803
SFU 3210-3	32	10	31	5,953	5°41`	3	53	90	71	15	15	9	9	M 6	80	25988	52565
SFU 3210-4	32	10	31	5,953	5°41`	4	53	90	71	15	15	9	9	M 6	90	33343	70218
SFU 4005-3						3	60	94	75	15	15	9	9	M 6	50	12487	39129
SFU 4005-4	40	5	39,5	3,175	2°17`	4	60	94	75	15	15	9	9	M 6	55	15887	52271
SFU 4005-6						6	60	94	75	15	15	9	9	M 6	65	22458	78456
SFU 4010-3						3	63	108	85	18	18	11	11	M 6	83	30107	69923
SFU 4010-4	40	10	39	5,953	4°33`	4	63	108	85	18	18	11	11	M 6	93	38639	93166
SFU 4010-6						6	63	108	85	18	18	11	11	M 6	113	54723	139455
SFU 5010-3						3	75	118	95	18	18	11	11	M 8×1	83	34226	91499
SFU 5010-4	50	10	49	5,953	3°39`	4	75	118	95	18	18	11	11	M 8×1	93	43837	122097

SFU 5010-6	6	75	118	105	18	18	11	11	M 8×1	114	62078	183194
SFU 6310-3	3	90	138	112	22	22	13	13	M 8×1	87	38051	117193
SFU 6310-4	4	63	10	62	5,953	2°54'			M 8×1	97	48740	156912
SFU 6310-6	6	90	138	112	22	22	13	13	M 8×1	118	69041	234681

滚珠丝杆系列
Ball and steel rod series
SFU-C7



Ph: 导程 Dw: 珠径 n: 循环圈数 Ca: 动载和负荷 (kg) Coa: 静载负荷 (kgf)

单位: mm

型号	滚珠丝杆尺寸		钢珠	循环圈数	内螺纹滚珠螺母安装尺寸								额定载荷		
	公称直径 D1	导程 ph			珠径 DW	n	D	D ₃	D ₄	H	B	单	双	DM	D ₅
			L(S)	L(D)								Ca	Coa		
△SFU 1605-3	16	5	3.175	3	28	48	38	40	10	44	83	M6	6.6	780	1790
△SFU 2005-3	20	5	3.175	3	36	58	47	44	10	44	83	M6	6.6	1130	2380
△SFU 2505-3	25	5	3.175	3	40	62	51	48	10	44	86	M6	6.6	1280	3110
△SFU 3205-4	32	5	3.175	4	50	80	65	62	12	52	97	M6	9	1450	4150
△SFU 4005-4	40	5	3.175	4	63	93	78	70	14	55	101	M6	9	1610	5330
△SFU 5005-4	50	5	3.175	4	71	110	90	85	14	55	102	M6	9	2225	6150
SFU 2010-3	20	10	3.969	3	36	58	47	44	12	60		M6	6.6	1950	4240
SFU 2510-4	25	10	3.5	2×2	20	62	51	48	10	61	71	M6	6.6	2440	4700
SFE 1610-3.5	16	10	3.175	3.5	32	53	42	38	10	50		M6	4.5	1260	3080
SFE 1616-3.5	16	16	3	2×1.175	32	53	42	38	10	39		M6	4.5	650	1280
SFE 2020-3.5	20	20	3.5	4×0.88	39	58	50	41	10	47		M6	5.5	1780	4280
☆SFE 2040-3	25	40	3.175	4×0.75	38	58	48	41	10	41		M6	5.5	1470	3350

备注：有标注 △ 记号都可以制作双螺母 有标注 ☆ 记号都可以制作左螺纹

ANEXO A

World Machine-Tool Output & Consumption Survey

ANEXO B

Esquema da Ligação Elétrica

ANEXO C

Desenhos 2D da Estrutura da Máquina

ANEXO D

Dimensões do fuso

ANEXO E

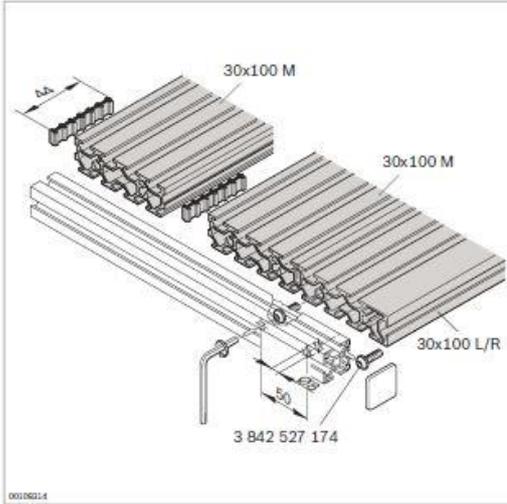
Dados do perfil bosch

ANEXO F

Análise de Tensões no tampo inicial

ANEXO G

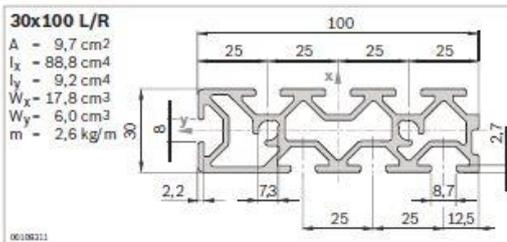
Análise de Tensões no perfil bosch



Slotted plate 30x100

- ▶ Modular plate profiles with multiple slots for experimental constructions of any size
- ▶ Slot spacing 25 mm
- ▶ Slot size 8.9 mm
- ▶ 8 mm slot connectors may be used

- Optional accessories:
- ▶ Profile 30x30 (p. 2-16)
 - ▶ Sliding block

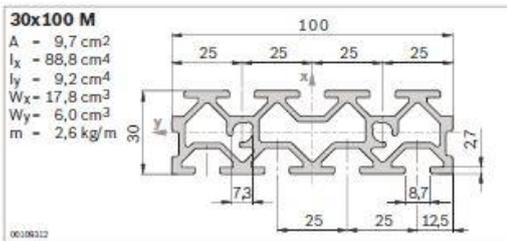


30x100 L/R
 A - 9,7 cm²
 I_x - 88,8 cm⁴
 I_y - 9,2 cm⁴
 W_x - 17,8 cm³
 W_y - 6,0 cm³
 m - 2,6 kg/m

- ▶ Slotted plate **30x100 L/R** with lateral 8 mm slot as outer stop

Slotted plate 30x100 L/R	Slot	L (mm)	No.
1 pc	8	100 ...	5600 3 842 993 337/L
18 pcs	8	5600	3 842 542 696

Material: Aluminum, anodized

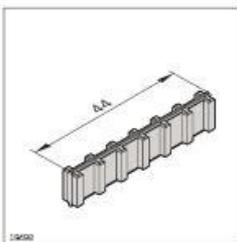


30x100 M
 A - 9,7 cm²
 I_x - 88,8 cm⁴
 I_y - 9,2 cm⁴
 W_x - 17,8 cm³
 W_y - 6,0 cm³
 m - 2,6 kg/m

- ▶ Slotted plate **30x100 M** for constructing slotted plates of any width

Slotted plate 30x100 M	Slot	L (mm)	No.
1 pc	8	100 ...	5600 3 842 993 336/L
18 pcs	8	5600	3 842 542 698

Material: Aluminum, anodized



Sliding block

- ▶ For connecting slotted plates 30x100
- ▶ Recommendation: use 3 sliding blocks per meter of profile length

Sliding block	No.
	100 3 842 520 922

Material: PA

ANEXO A

World Machine-Tool Output & Consumption Survey

ANEXO B

Esquema da Ligação Elétrica

ANEXO C

Desenhos 2D da Estrutura da Máquina

ANEXO D

Dimensões do fuso

ANEXO E

Dados do perfil bosch

ANEXO F

Análise de Tensões no tampo inicial

ANEXO G

Análise de Tensões no perfil bosch

Stress Analysis Report



Analyzed File:	tampo da cnc.ipt
Autodesk Inventor Version:	2015 (Build 190159000, 159)
Creation Date:	28/10/2015, 20:03
Simulation Author:	André Moreira
Summary:	

☐ Project Info (iProperties)

☐ Summary

Author	A.Moreira
--------	-----------

☐ Project

Part Number	tampo da cnc
Designer	A.Moreira
Cost	0,00 €
Date Created	20/08/2014

☐ Status

Design Status	WorkInProgress
---------------	----------------

☐ Physical

Material	Aluminum 6061, Welded
Density	2,7 g/cm ³
Mass	6,72456 kg
Area	540753 mm ²
Volume	2490580 mm ³
Center of Gravity	x=322,411 mm y=7,44053 mm z=197,411 mm

Note: Physical values could be different from Physical values used by FEA reported below.

☐ Base CNC Alumínio

General objective and settings:

Design Objective	Single Point
Simulation Type	Static Analysis
Last Modification Date	28/10/2015, 19:55
Detect and Eliminate Rigid Body Modes	No

Mesh settings:

Avg. Element Size (fraction of model diameter)	0,5
Min. Element Size (fraction of avg. size)	0,5
Grading Factor	1,5
Max. Turn Angle	60 deg
Create Curved Mesh Elements	Yes

Material(s)

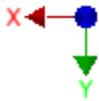
Name	Aluminum 6061, Welded	
General	Mass Density	2,7 g/cm ³
	Yield Strength	55 MPa
	Ultimate Tensile Strength	62 MPa
Stress	Young's Modulus	68,9 GPa
	Poisson's Ratio	0,33 ul
	Shear Modulus	25,9023 GPa
Part Name(s)	tampo da cnc	

Operating conditions

Pressure:1

Load Type	Pressure
Magnitude	0,005 MPa

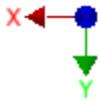
Selected Face(s)



☐ **Fixed Constraint:1**

Constraint Type	Fixed Constraint
-----------------	------------------

☐ **Selected Face(s)**



Results

Reaction Force and Moment on Constraints

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	1265,15 N	0 N	0 N m	0 N m
		-1265,15 N		0 N m
		0 N		0 N m

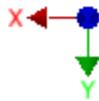
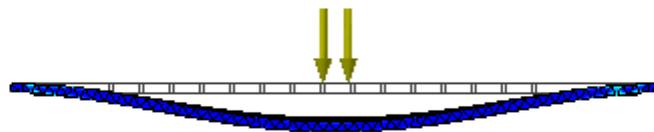
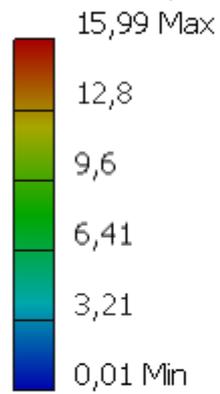
Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	2490580 mm ³	
Mass	6,72456 kg	
Von Mises Stress	0,0140186 MPa	15,992 MPa
1st Principal Stress	-11,51 MPa	11,4266 MPa
3rd Principal Stress	-21,6761 MPa	2,25942 MPa
Displacement	0 mm	0,338238 mm
Safety Factor	3,43922 ul	15 ul

Figures

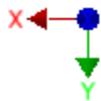
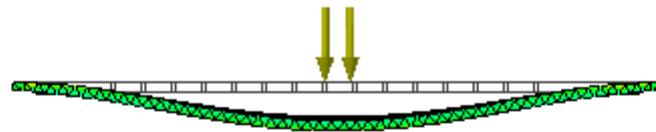
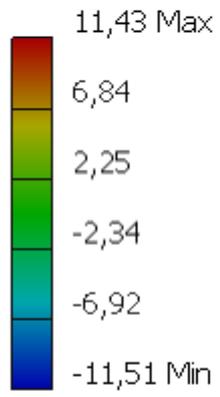
Von Mises Stress

Nodes: 119706
Elements: 70597
Type: Von Mises Stress
Unit: MPa
28/10/2015, 20:03:06



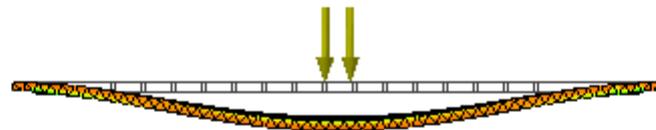
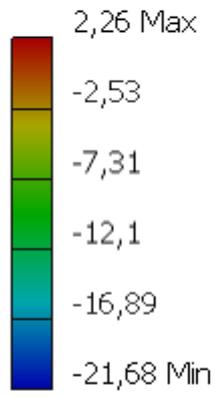
1st Principal Stress

Nodes:119706
Elements:70597
Type: 1st Principal Stress
Unit: MPa
28/10/2015, 20:03:07



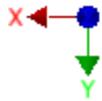
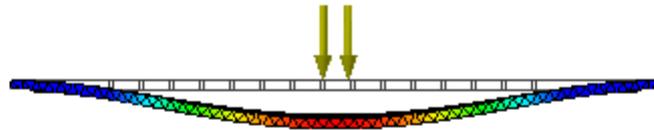
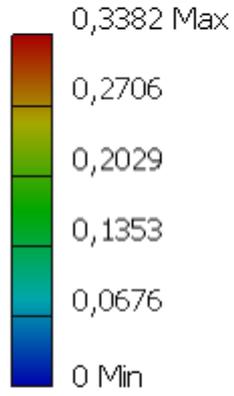
3rd Principal Stress

Nodes:119706
Elements:70597
Type: 3rd Principal Stress
Unit: MPa
28/10/2015, 20:03:07



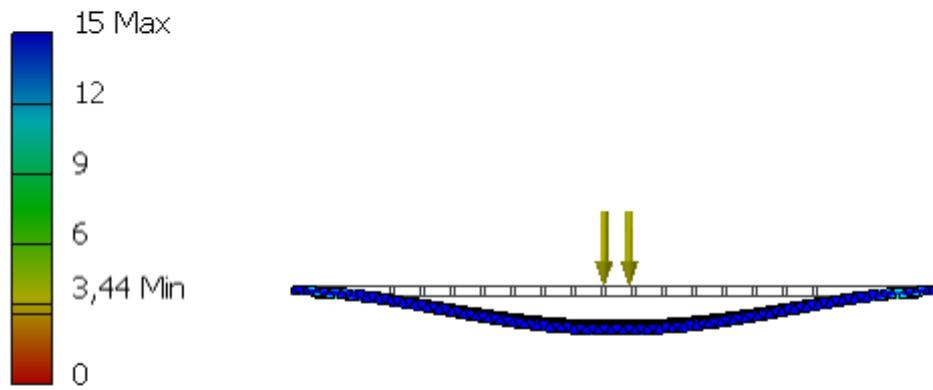
Displacement

Nodes:119706
Elements:70597
Type: Displacement
Unit: mm
28/10/2015, 20:03:08



Safety Factor

Nodes:119706
Elements:70597
Type: Safety Factor
Unit: ul
28/10/2015, 20:03:07



C:\Users\André Moreira\Desktop\Tese\CNC_Desenhos CAD\tampo da cnc.ipt

ANEXO A

World Machine-Tool Output & Consumption Survey

ANEXO B

Esquema da Ligação Elétrica

ANEXO C

Desenhos 2D da Estrutura da Máquina

ANEXO D

Dimensões do fuso

ANEXO E

Dados do perfil bosch

ANEXO F

Análise de Tensões no tampo inicial

ANEXO G

Análise de Tensões no perfil bosch

Stress Analysis Report



Analyzed File:	GROOVED_PLATE_30X100meio real++.ipt
Autodesk Inventor Version:	2015 (Build 190159000, 159)
Creation Date:	28/10/2015, 20:04
Simulation Author:	André Moreira
Summary:	

☐ Project Info (iProperties)

☐ Summary

Author	André Moreira
--------	---------------

☐ Project

Part Number	GROOVED_PLATE_30X100meio real++
Designer	André Moreira
Cost	0,00 €
Date Created	19/10/2015

☐ Status

Design Status	WorkInProgress
---------------	----------------

☐ Custom

Author	Bosch Rexroth AG
Title	3842993336_185903235.stp
Organization	CADClick - KiM GmbH - www.kimweb.de
Description	no description
Authority	unknown authorization
Sending System	ACIS
Preprocessor	unknown preprocess

☐ Physical

Material	Aluminum
Density	0,0975437 lbmass/in ³
Mass	19,3764 lbmass
Area	1956790 mm ²

Volume	3255170 mm ³
Center of Gravity	x=322,5 mm y=200 mm z=14,7332 mm

Note: Physical values could be different from Physical values used by FEA reported below.

☐ **Simulation:1**

General objective and settings:

Design Objective	Single Point
Simulation Type	Static Analysis
Last Modification Date	19/10/2015, 21:53
Detect and Eliminate Rigid Body Modes	No

Mesh settings:

Avg. Element Size (fraction of model diameter)	0,1
Min. Element Size (fraction of avg. size)	0,2
Grading Factor	1,5
Max. Turn Angle	60 deg
Create Curved Mesh Elements	Yes

☐ **Material(s)**

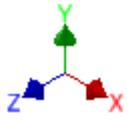
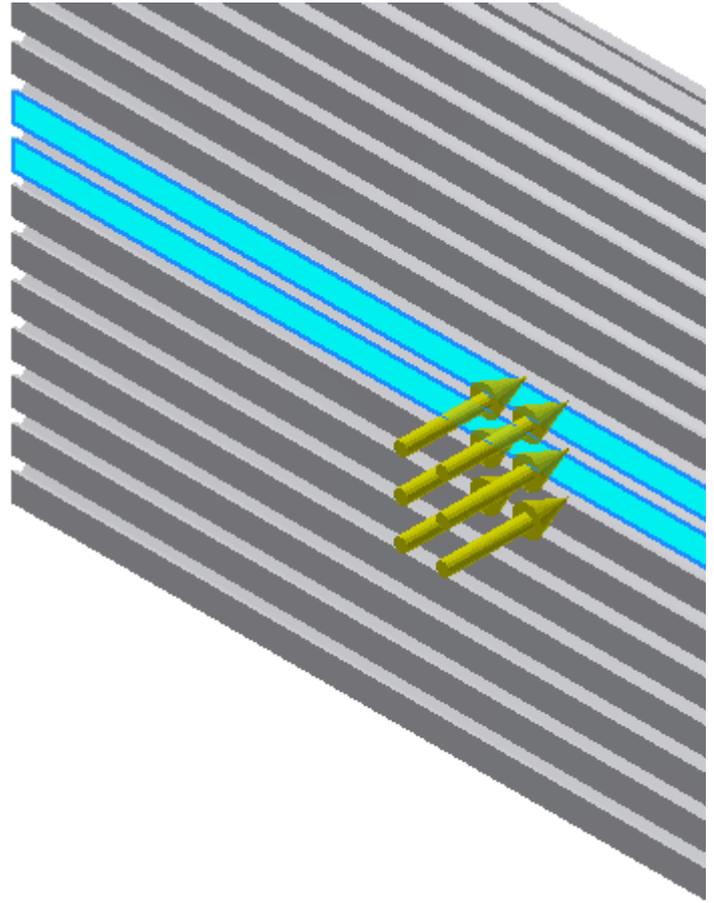
Name	Aluminum	
General	Mass Density	0,0975437 lbmass/in ³
	Yield Strength	39885,4 psi
	Ultimate Tensile Strength	44961,7 psi
Stress	Young's Modulus	9993,1 ksi
	Poisson's Ratio	0,33 ul
	Shear Modulus	3756,8 ksi
Part Name(s)	GROOVED_PLATE_30X100meio real++	

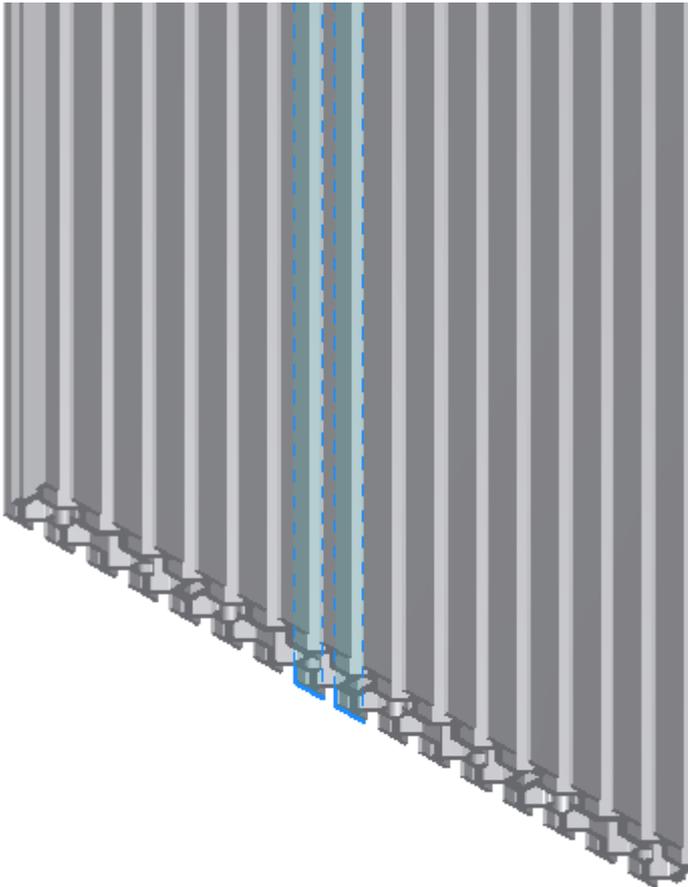
☐ **Operating conditions**

☐ **Pressure:1**

Load Type	Pressure
Magnitude	0.790 psi

☐ **Selected Face(s)**

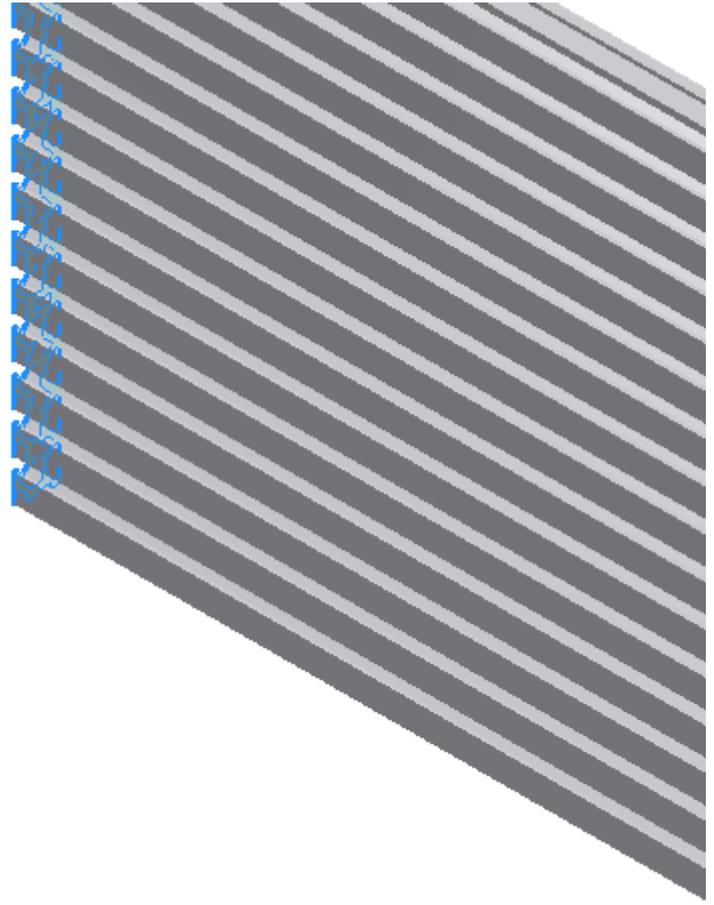
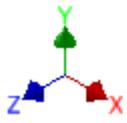


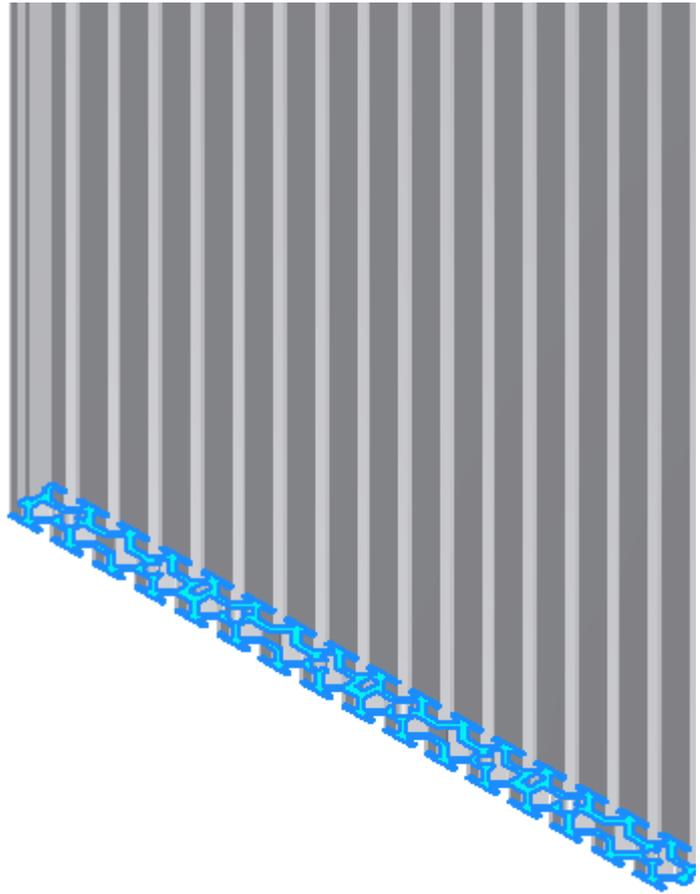


☐ **Fixed Constraint:1**

Constraint Type	Fixed Constraint
-----------------	------------------

☐ **Selected Face(s)**





Results

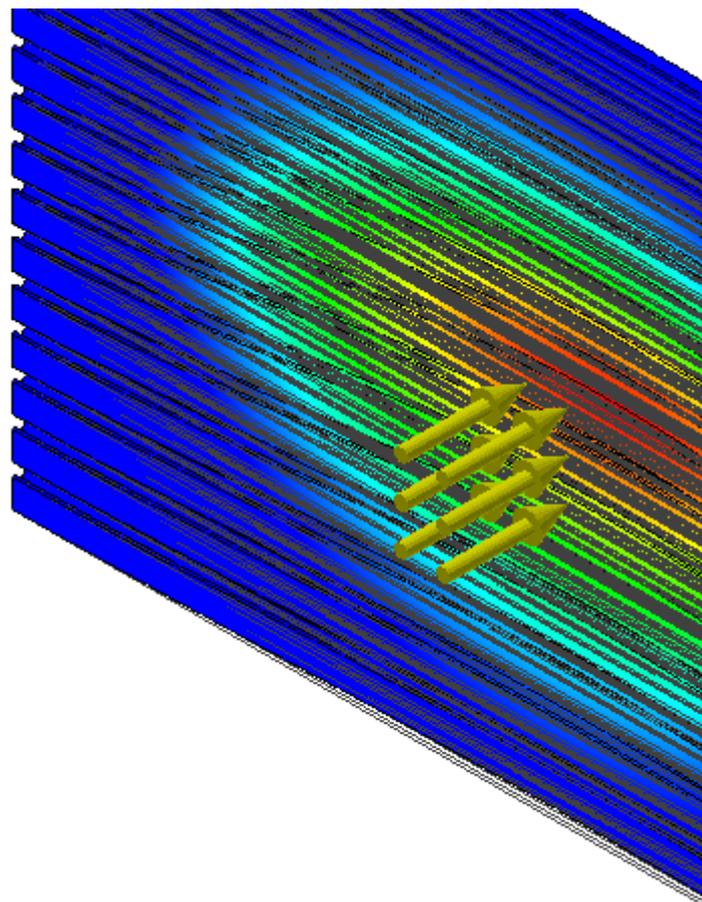
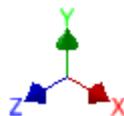
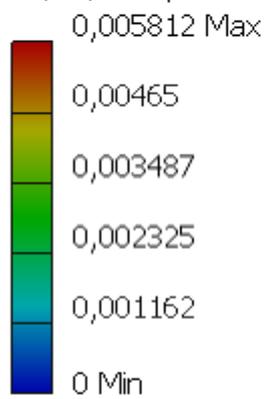
Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	3255170 mm ³	
Mass	19,3764 lbmass	
Displacement	0 mm	0,005812 mm
X Displacement	-0,000390203 mm	0,000390297 mm
Y Displacement	-0,000568868 mm	0,000569902 mm
Z Displacement	-0,00580981 mm	0,0000129722 mm

Figures

Displacement

Type: Displacement
Unit: mm
28/10/2015, 20:04:52

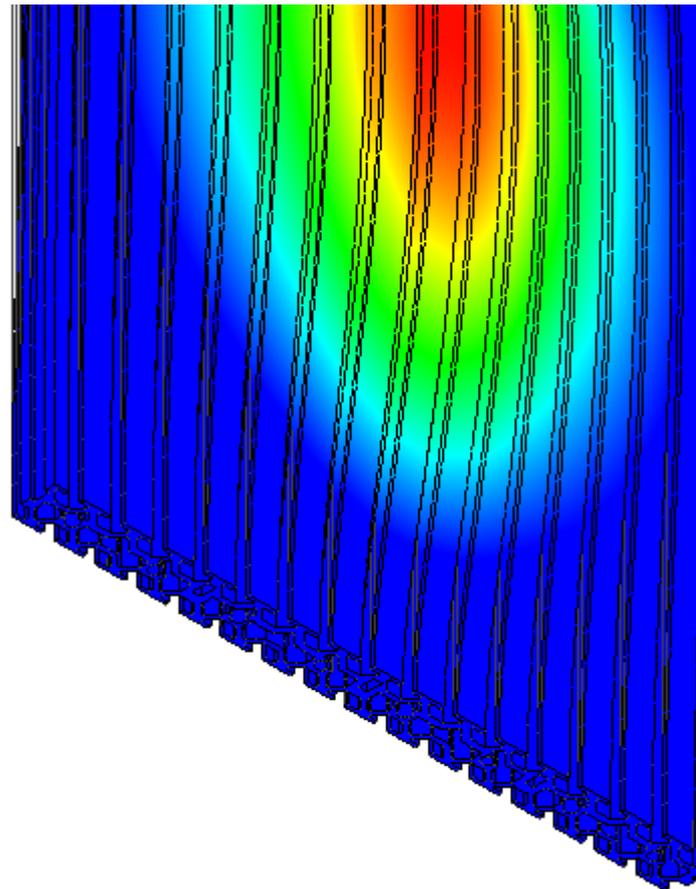
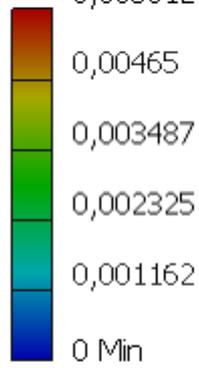


Type: Displacement

Unit: mm

28/10/2015, 20:04:52

0,005812 Max



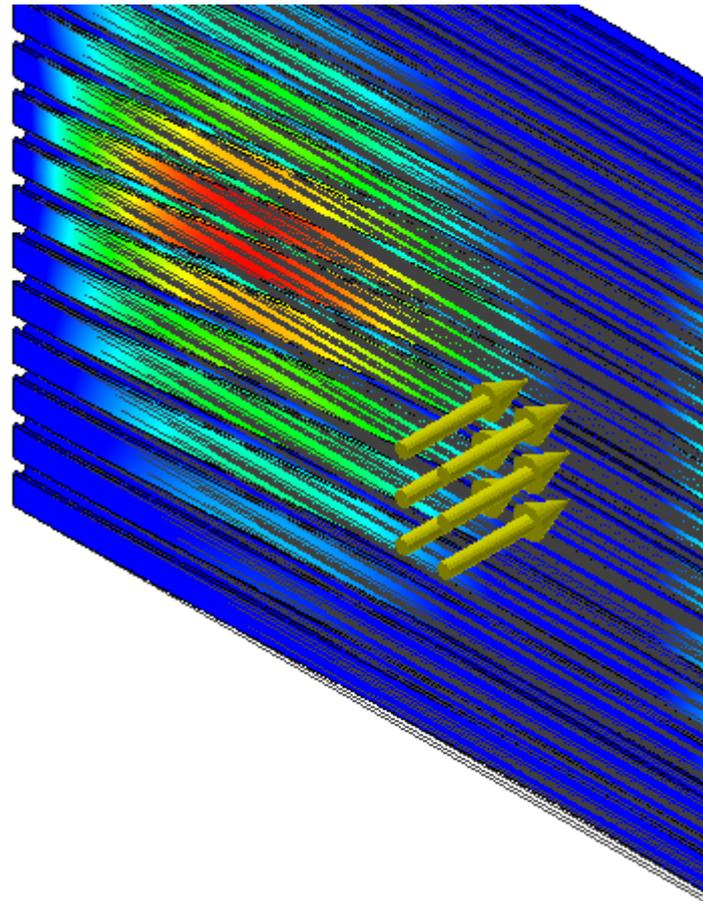
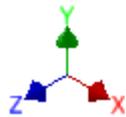
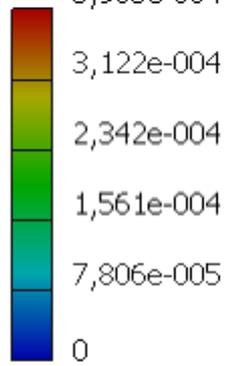
X Displacement

Type: X Displacement

Unit: mm

28/10/2015, 20:04:54

3,903e-004 Max

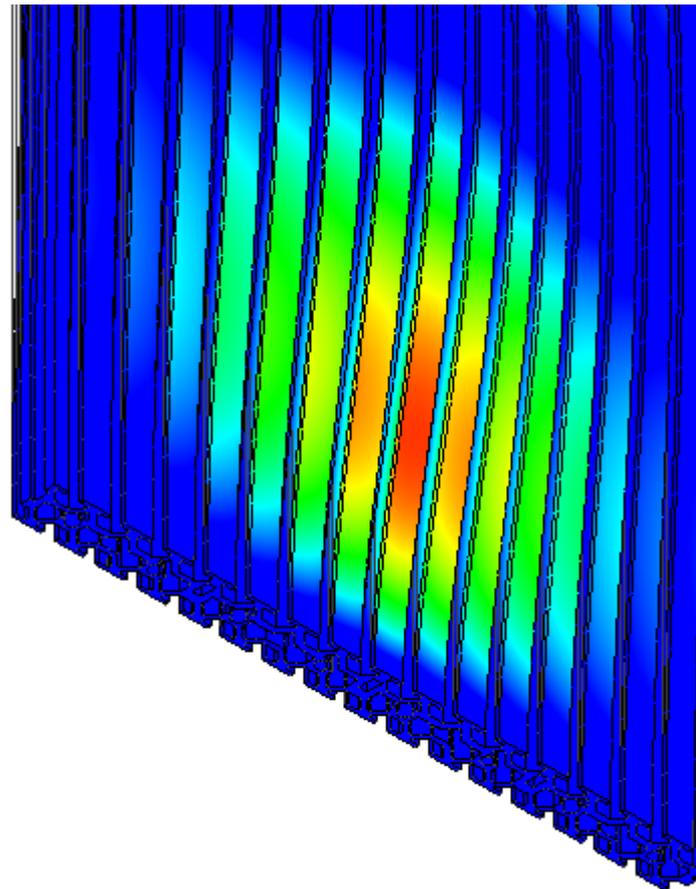
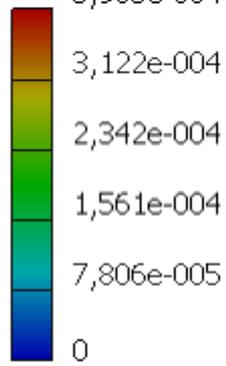


Type: X Displacement

Unit: mm

28/10/2015, 20:04:54

3,903e-004 Max



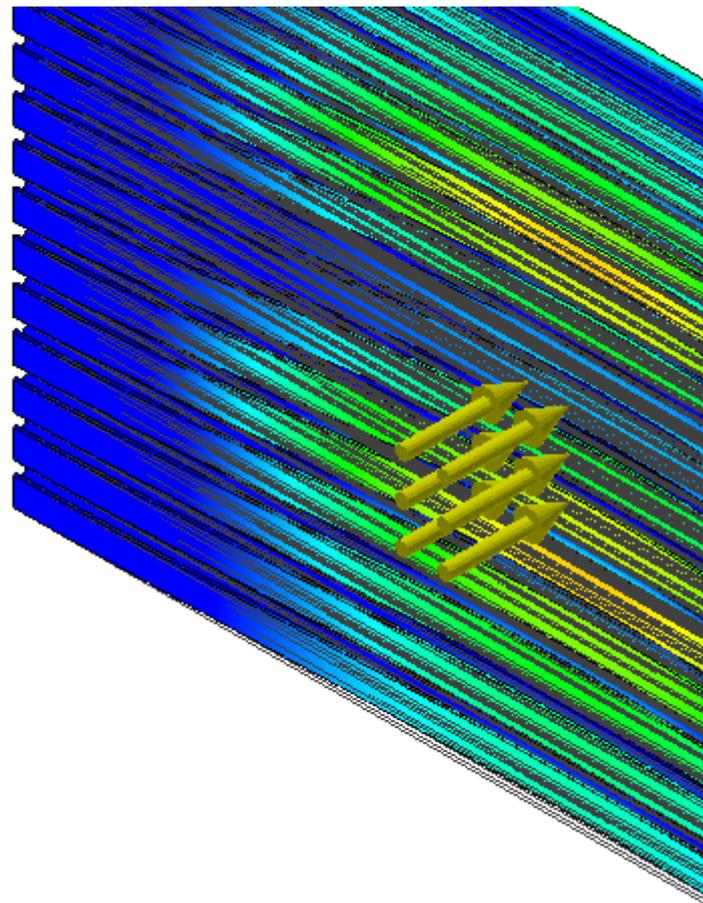
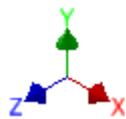
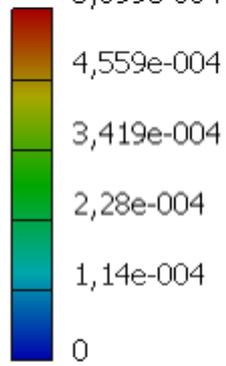
Y Displacement

Type: Y Displacement

Unit: mm

28/10/2015, 20:04:56

5,699e-004 Max

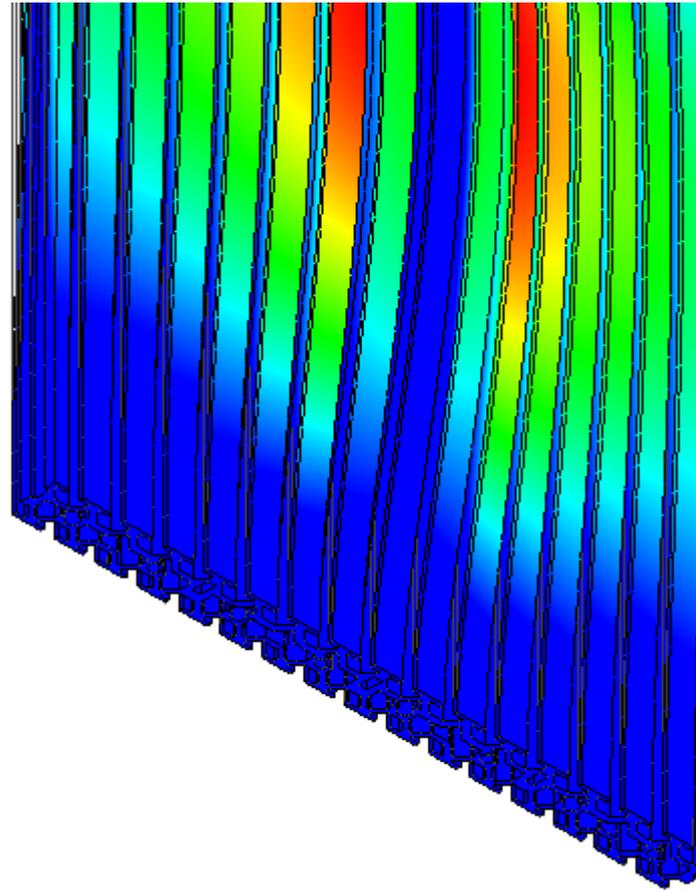
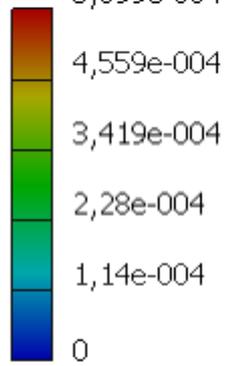


Type: Y Displacement

Unit: mm

28/10/2015, 20:04:56

5,699e-004 Max

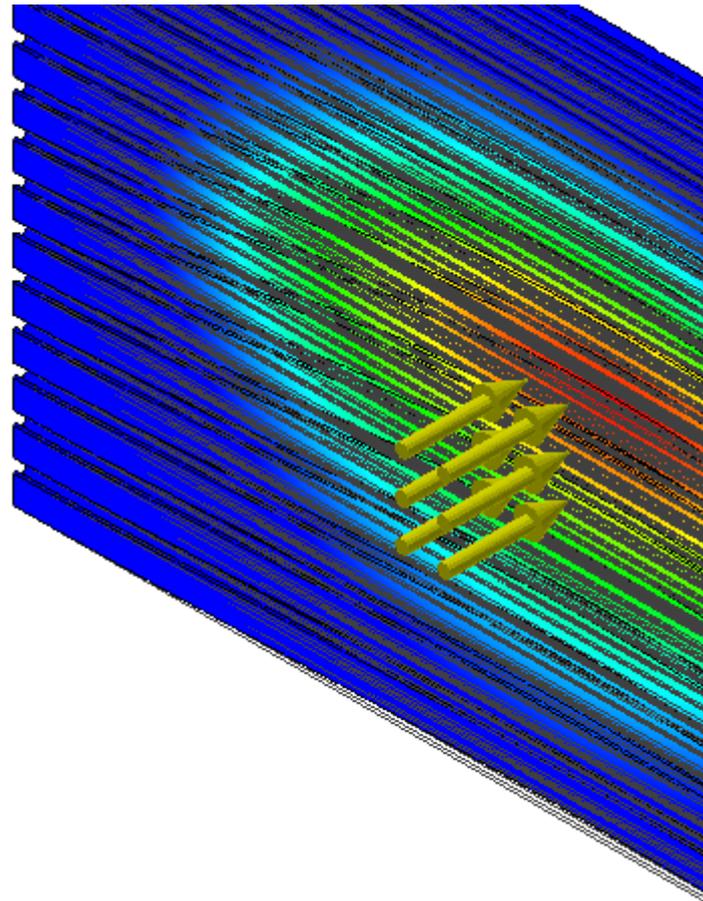
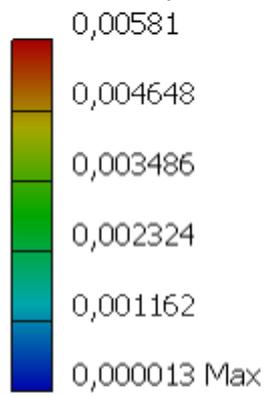


Z Displacement

Type: Z Displacement

Unit: mm

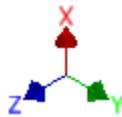
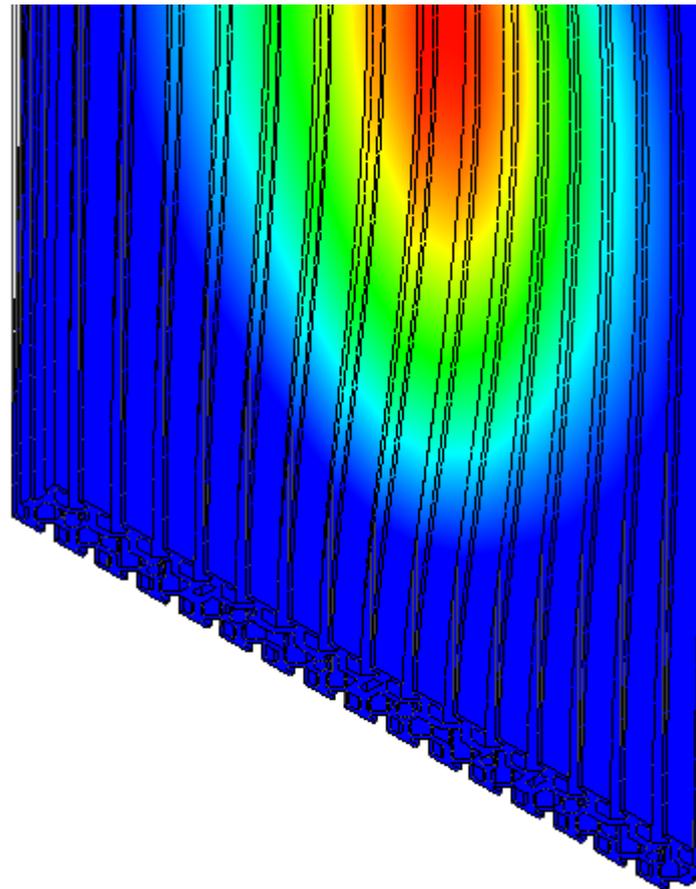
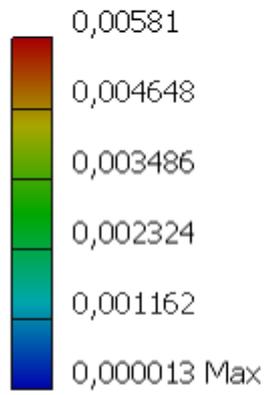
28/10/2015, 20:04:58



Type: Z Displacement

Unit: mm

28/10/2015, 20:04:58



C:\Users\André Moreira\Desktop\GROOVED_PLATE_30X100meio real++.ipt
