Desenvolvimento de um Sistema de Medição do Ângulo de Quinagem

Pedro Filipe Ferreira Fonseca

Dissertação do MIEM

U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Orientadores:

Prof. Joaquim Gabriel Magalhães Mendes

Prof. Manuel Romano dos Santos Pinto Barbosa

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2011

Aos meus pais

Resumo

No dia-a-dia existem os mais variados exemplos de peças que no seu processo de fabrico sofreram pelo menos uma operação de quinagem. Trata-se de um processo bastante competitivo quer pela sua rapidez, quer pela excelente relação rigidez/peso. No entanto, de uma forma geral, as peças apresentam um baixo rigor dimensional, que contraria a crescente exigência de rigor no fabrico dos componentes, o que levou à necessidade de aumentar o controlo sobre o processo, em especial sobre o ângulo de quinagem.

Presentemente no mercado são inúmeras as soluções de medição de ângulo de quinagem, porém requerem condições específicas de funcionamento e utilização, sendo igualmente difíceis de operar e custosas.

Este trabalho centra-se no desenvolvimento de novas alternativas para a medição do ângulo de quinagem. Foram estudadas três soluções de contacto do elemento sensor com a chapa (sendo que duas são variantes da mesma solução de base) e uma sem contacto. Foi ainda realizada uma análise crítica de cada solução.

A primeira solução é constituída por duas pontas de prova que permitem calcular o ângulo de quinagem pela relação entre a sua geometria e o deslocamento vertical dos apalpadores. Para garantir que o ângulo de quinagem se encontra dentro dos requisitos, a resolução na medição do deslocamento é a mais exigente de todas as soluções apresentadas, cerca de 21,8 µm.

A segunda solução utiliza o contacto directo dos transdutores com a chapa. A diferença de posição relativa dos pontos de contacto dos dois transdutores corresponde ao ângulo de quinagem. A resolução exigida ao transdutor é bastante mais reduzida do que a da primeira solução (87,2 µm).

Uma variante da solução anterior permite eliminar o uso de um dos transdutores e substituí-lo por uma peça rígida. O ângulo de quinagem é então calculado através da medida diferencial da posição dos pontos de contacto. A resolução na medição do deslocamento exigida a esta solução é igual à da segunda solução estudada, mas fica mais económica.

A última opção utiliza um princípio de funcionamento em tudo semelhante à solução anterior, no entanto o contacto com a chapa é eliminado pela utilização de transdutores oticos, evitando assim os problemas associados ao contacto (flexão local da chapa, marcação da chapa, etc.).

Das quatro soluções apresentadas, foi escolhida a terceira uma vez que se apresenta com a melhor relação custo/benefício. Para esta solução foi realizado o projeto mecânico dos componentes necessários, escolhido o transdutor e por fim os acionamentos para movimentação do sistema.

No final deste trabalho é possível afirmar que a solução proposta é bastante competitiva, devido essencialmente a dois fatores, a sua elevada resolução na medição do ângulo de quinagem, 0.04º, mas também devido ao seu reduzido preço quando comparado com os sistemas atualmente existentes no mercado, aproximadamente igual a 1500 €, no entanto o contacto com chapa em determinadas situações causa uma deformação da mesma, o que poderá comprometer a exatidão da medida.

Abstract

On a daily basis there are a huge number of examples of objects, or components that suffered at least one bending operation. It is a very competitive process by its cadence and by the excellent ratio stiffness/weight. However, in general, the parts have a low dimensional accuracy. The growing demand for more accurate parts in all bending pieces led to the need of increasing the control over the process, particularly on the bending angle.

There are various solutions for measuring de bending angle, but all of them require specifics conditions of operation.

This work focuses on the design of new alternatives for measuring the bending angle. Three contact solutions (two can be considered variations of the same basic solution) and a non-contact solution were studied. An analysis of each solution was performed, so that one could be chosen as the most feasible.

The studied solutions explored the possibility of using the free space obtained by setting apart two adjacent segments of the bottom tool, so that the measurement could be done with minimal amount of visible sheet metal.

The first solution consists of using two contact probes to calculate the bending angle, through a geometric relation involving the contact points vertical displacement measurement. To ensure that the bending angle is within the accuracy required, this solution needs a very high accurate measurement of displacement, the highest of the three solutions.

The second solution is based on the direct contact of the transducers with the sheet metal. The relative position of the contact points allows the calculation of the bending angle and the position is measured by two displacement transducers. The accuracy required of the transducers is considerably lower than the first solution.

The third solution is a variant of the previous solution which eliminates the need to use one of the transducers, by replacing it with a movable part. The bending angle is calculated by measuring the differential position of the contact points. The accuracy requirements in this situation are the same as in the previous solution.

The last option uses an operating principle similar to the previous solution, however the contact to the sheet metal is eliminated by using two optical displacement transducers. This solutions avoids any problems associated with the contact such as: local bending of the sheet metal, marking the sheet metal, etc.

Of the four solutions presented, the third has the highest number of points in its favour. A more complete specification of this solution included the selection of the displacement transducer used (LVDT), the positioning system and the details of the remaining components needed.

At the end of this work, it can be said that the proposed solution is quite competitive, mainly due to its high resolution when measuring the angle of bending (0.04º) and also due to its low price compared with existing systems (approximately equal to 1500 €). One limitation is the possibility of, in some operating conditions, the contact with the sheet metal causing a significant deformation which affects the measuring angle, and so making the usage of the bending angle device not valid.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Professor Joaquim Gabriel e ao Professor Manuel Romano Barbosa pela sua paciência e orientação durante a realização da dissertação, uma vez que sem a ajuda prestada a evolução do trabalho teria sido muito mais lenta.

Desejo agradecer o auxílio prestado por todas as pessoas da Adira que estiveram ligadas a este projeto.

Agradeço aos meus pais e amigos pelo seu apoio, incentivo e confiança ao longo de todo o percurso académico.

Por fim, gostaria de expressar a minha gratidão à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica, por ter tornado possível a frequência do Mestrado em Engenharia Mecânica e por todos os recursos disponibilizados.

Índice

1 - Introdução 1
1.1 Motivação 2
1.2 Trabalho Realizado 2
1.3 Organização da Dissertação 3

2 - Descrição do Processo de Quinagem 5
2.1 Operação de Quinagem 5
2.2 Técnicas de Quinagem 6
Quinagem Livre 7
Quinagem Forçada 8
2.3 Estrutura da Quinadora e Arquitetura de Controlo 8
2.4 Detalhes do Processo de Quinagem 11
Retorno Elástico 11
Redução da Influência do Retorno Elástico 12
2.5 Sistemas Comerciais de Medição 13
Sistema sem Contacto 16
Resumo dos Sistemas Comerciais 22
2.6 Conclusões 23

3 - Apresentação de Soluções 25
3.1 Requisitos do Sistema 25
3.2 Requisitos Complementares do Projeto 27
Zona de Medição 27
Montagem/Instalação do Dispositivo de Medição no Espaço de Trabalho 29
Múltiplas Quinagens e Furos 29
Espaçamento Máximo 29
3.3 Soluções Estudadas 30
Solução 1 – Medição com Dois Pontos de Contacto (apalpadores) 30
Solução 2A – Medição com Dois Pontos de Contacto (medição independente) 35
Solução 2B – Medição com Contacto de Dois Pontos (medição diferencial) 37
Solução 3 – Medição sem Contacto por Intermédio de Transdutores Óticos 41
3.4 Análise Comparativa das Soluções 43
3.5 Conclusões 44

4 - Especificação da Solução Proposta 45
4.1 Escolha do LVDT 45
4.2 Guias 48
Plano de Movimento e Inclinação da Direção de Deslocamento 48
Guia vertical 49
4.3 Atuadores 49
4.4 Validação da Solução 55
Deformação 55
Comportamento Dinâmico 58
Encurvadura 60

4.5 Qualidade de Medição Prevista 61
4.6 Limites da Solução 62
Gama de Medição 62
Gama de Matrizes 62
Tempo de Medição..... 62
Aba Necessária (y) 63
Medição ao Longo do Comprimento 63
Área Ocupada..... 64
Múltiplas Quinagens e Furos 65
4.7 Verificação dos requisitos 66
4.8 Conclusões.....67

5 - Conclusão.....69

6 - Referências e Bibliografia.....73

Anexo A : Desenho de definição da haste rígida 75

Anexo B: Excerto do catálogo da Solartron metrology 79

Anexo C : Desenho de definição da ligação direção inclinada.....83

Anexo D : Desenho de definição da tampa superior.....87

Anexo E : Desenho de definição da tampa inferior 91

Anexo F : Distância do transdutor e da haste função de βe V 95

Anexo G : Relatório da simulação β=90º e V6.....99

Anexo H : Inserção no volume de trabalho da quinadora.....111

Índice de figuras

Figura 2.1 – Principais componentes e designações dos elementos envolvidos na quinagem ... 6

Figura 2.2 – Tipo de quinagem a)no ar, b) em V, c) em U, d) a fundo, e) de flange com cunho de arraste, f) rotativa [2] ... 7

Figura 2.3 – Quinagem Livre [1] ... 7

Figura 2.4 – Exemplo de uma quinadora com a representação dos eixos [3] ... 9

Figura 2.5 – Esquema da orientação dos eixos ... 10

Figura 2.6 – Arquitetura de controlo de uma quinadora ... 11

Figura 2.7 – Flexão de uma viga de seção rectilínea ... 12

Figura 2.8 – Controlo em malha fechada do processo de quinagem ... 13

Figura 2.9 – Medição indireta por intermédio de um ponto de contacto [7] ... 13

Figura 2.10 – Medição indireta baseada em quatro pontos de contacto (ponta de prova circular) [7] ... 14

Figura 2.11 – Medição indireta com quatro pontos de contacto [9] ... 14

Figura 2.12 – Medição direta por transdutores angulares [7] ... 15

Figura 2.13 – Sistema de medição Trumpf [13] ... 15

Figura 2.14 – Medição através da reflexão de feixe laser [7] ... 16

Figura 2.15 – Emissor e recetor do sistema de visão [18] ... 17

Figura 2.16 – Sistema LCB projeção da linha [19] ... 18

Figura 2.17 – Sistema laser (a) independente da posição dos sensores; (b) imune à inclinação da matriz; (c) medição descentrada [20] ... 18

Figura 2.18 – Recetor do sistema IMG-100 [18] ... 19

Figura 2.19 – Ecrã do sistema IMG-100 [18] ... 20

Figura 2.20 – Exatidão do IMG-100 relacionada com o ângulo e aba visível [18] ... 21

Figura 3.1 – Definição da extensão da zona não utilizável ... 28

Figura 3.2 – Exemplo de chapa com quinagem prévia ... 29

Figura 3.3 – Vista em corte de medição de ângulo solução 1 ... 30

Figura 3.4 – Definição do cálculo do ângulo de quinagem ... 31

Figura 3.5 – Esquema da forma da solução 1 ... 31

Figura 3.6 – Visualização do ângulo de quinagem com geometrias diferentes ... 32

Figura 3.7 – Representação do intervalo de erro ... 33

Figura 3.8 – Forma final dos apalpadores da solução 1 ... 34

Figura 3.9 – Vista em corte da solução 2 ... 35

Figura 3.10 – Cálculo do ângulo de quinagem com transdutores inclinados ... 36

Figura 3.11 – Esquema da solução proposta 38
Figura 3.12 – Representação do comprimento da haste rígida 39
Figura 3.13 – Deslocamento inicial, correspondente ao ângulo de 180º 39
Figura 3.14 – Relação do deslocamento do transdutor com ângulo de quinagem 40
Figura 3.15 – Transdutor da série L-GAGE ® LH [24] 41
Figura 4.1 – Representação do curso do LVDT 46
Figura 4.2 – Curso (C_1) em função da abertura da matriz (V) e do ângulo de quinagem (β) e *f* = 2 mm 47
Figura 4.3 – Representação do curso da haste rígida 50
Figura 4.4 – Diagrama de corpo livre do plano inclinado (avanço) 52
Figura 4.5 – Circuito pneumático 54
Figura 4.6 – Diagrama de corpo livre segundo a vertical (avanço) 55
Figura 4.7 – Distâncias dos pontos de aplicação das forças sobre a chapa 56
Figura 4.8 – Deformação da chapa no ponto de contacto chapa-haste rígida 57
Figura 4.9 – Deformação da chapa no ponto de contacto chapa-transdutor 57
Figura 4.10 – Modelo dinâmico do caso inicial 58
Figura 4.11 – Resposta dinâmica do sistema partindo da posição de repouso 59
Figura 4.12 – Modelo dinâmico para o segundo caso 60
Figura 4.13 - Resposta dinâmica do sistema para o ângulo de quinagem de 30º 60
Figura 4.14 – Modelação da solução 61
Figura 4.15 – Abertura da matriz vs. aba necessária 63
Figura 4.16 – Montagem do sistema de medição ao longo do comprimento 64
Figura 4.17 – Representação da área ocupada a vermelho (plano yx) 64
Figura 4.18 – Representação da área ocupada a vermelho (plano xz) 65

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Resumo sistemas comerciais 22
Tabela 3.1 – Fator de correção C para cálculo do ângulo de quinagem [2] 28
Tabela 3.2 – Resumo das soluções propostas 43
Tabela 4.1 – LVDT propostos 48
Tabela 4.2 – Orçamento da sensorização 48
Tabela 4.3 – Massa de cada componente 51
Tabela 4.4 – Cálculo da força e correspondente pressão do atuador inclinado 53
Tabela 4.5 – Massa de componentes segundo a vertical 55
Tabela 4.6 – Verificação dos requisitos 66

Lista de símbolos

Símbolo	Unidades	Descrição
β	[º]	Ângulo de quinagem
P	[mm]	Profundidade de quinagem
r_i	[mm]	Raio interior de quinagem
h	[mm]	Espessura da chapa
V	[mm]	Abertura da matriz
θ	[º]	Ângulo da matriz
a	[mm]	Altura da matriz
b	[mm]	Largura da matriz
w	[mm]	Aba visível
c	[mm]	Curso do transdutor
d	[mm]	Distância de referência
γ	[º]	Inclinação do transdutor
r_{min}	[mm]	Raio mínimo de quinagem
q	[/]	Coeficiente de estricção
C	[/]	Coeficiente de correção do raio de quinagem
x_{min}	[mm]	Extensão da zona não utilizável
X	[mm]	Distância entre pontos de contacto dos transdutores
L_i (i=1,2)	[mm]	Abertura do apalpador
Δx	[mm]	Diferença de deslocamento dos transdutores
E	[mm]	Espaçamento entre transdutores
L	[mm]	Comprimento da haste rígida
T	[mm]	Distância entre o ponto de contacto da chapa com a matriz e a interseção do transdutor com o topo da matriz
K	[mm]	Distância entre o transdutor e a haste rígida quando chapa se encontra na horizontal
f	[mm]	Folga definida para garantir que a haste rígida acompanha a aba do lado correto
y	[mm]	Distância entre o ponto de contacto do transdutor com a chapa e ponto de contacto da chapa com a matriz
C_1	[mm]	Curso do transdutor
C_2	[mm]	Curso da haste rígida
y_2	[mm]	Aba interior

Símbolo	Unidades	Descrição
Fr	[N]	Força resultante
Fc	[N]	Força do cilindro
P	[N]	Peso total
Pt	[N]	Componente tangencial do peso
Fa	[N]	Força de atrito
F_{LVDT}	[N]	Força de reação do LVDT
N	[N]	Esforço normal
μ	[/]	Coeficiente de atrito
p	[bar]	Pressão
Ac	[mm^2]	Área do cilindro
r_c	[mm]	Raio do cilindro
m_t	[kg]	Massa total
Pcr	[N]	Carga crítica de Euler
E	[GPa]	Módulo de Young
I	[mm^4]	Momento de inércia
le	[mm]	Comprimento equivalente
l	[mm]	Comprimento real
r	[mm]	Raio da haste
di	[mm]	Posição inicial do transdutor (LVDT)
Δd	[mm]	Diferença entre posição do transdutor (LVDT) e haste
d	[mm]	Deslocamento do transdutor (LVDT)
Y_i	[mm]	Distância segunda direcção da aba do eixo de quinagem à haste móvel
Y_k	[mm]	Distância segunda direcção da aba do eixo de quinagem ao transdutor

1 - Introdução

A quinagem de peças é um dos processos de deformação plástica de chapa mais simples e rápido existentes no mercado. Este processo é utilizado pela facilidade em produzir superfícies planificáveis de geometria cilíndrica, cónica ou prismática com excelentes relações rigidez/peso.

A operação de quinagem pode ser realizada por intermédio de várias técnicas diferentes, no entanto neste trabalho apenas serão analisadas duas, a quinagem livre e a forçada ou de quebra de nervo, visto serem as mais utilizadas no meio industrial. Para além das diferenças do processo de fabrico associado a cada uma destas técnicas, uma diferença apresenta-se como de extrema relevância: o rigor dimensional das peças obtidas.

A crescente exigência dimensional no fabrico das peças traduz-se na necessidade de conhecer e controlar melhor as variáveis de processo, tais como, a posição dos eixos, a força aplicada, a deformação estrutural da máquina em particular ao longo do seu eixo longitudinal, etc. Constata-se no entanto que apesar da evolução no controlo destas variáveis, esta não é ainda suficiente para garantir a exatidão dimensional de cada chapa quinada.

Os principais construtores de quinadoras iniciaram a implementação de sistemas de medição de ângulo nas suas máquinas para que o valor real, medido, seja utilizado pelo controlador para corrigir o ângulo de quinagem antes da peça ser removida da quinadora. Os sistemas de medição de ângulo surgiram há mais de duas décadas, contudo acarretam consigo vários problemas. De uma forma geral o seu custo é elevado, exigem condições específicas de funcionamento para que a medição seja realizada dentro da exatidão pretendida e são sistemas com parametrização complexa.

1.1 Motivação

A Adira[1], construtora de máquinas ferramenta, possui uma grande experiência na área da construção de quinadoras, no entanto ainda não incorpora nas suas máquinas a medição do ângulo de quinagem de uma forma automática durante o ciclo de trabalho, por considerar que as soluções do mercado não são ainda satisfatórias. Assim, foi proposto que este problema fosse estudado por um aluno de mestrado.

As soluções estudadas devem conseguir medir o ângulo de quinagem de uma forma simples, rápida e de fácil utilização, tal como uma suta digital.

1.2 Trabalho Realizado

Este trabalho iniciou-se pelo estudo do processo de quinagem e das soluções comerciais para medição do ângulo.

A análise dos sistemas comerciais permitiu a definição dos requisitos gerais que um sistema de medição deve cumprir, tais como, a exatidão na medição do ângulo de quinagem, a gama de ângulos medidos, o nível de parametrização exigido, entre outros. Além dos requisitos identificados pela análise dos sistemas comerciais, foram também recolhidos no contacto com a Adira requisitos mais específicos do sistema de medição, sendo eles o custo da solução global (incluindo transdutores, peças fabricadas e todos os restantes componentes necessários) inferior a 5000 €, os valores típicos de espessura da chapa utilizada, as dimensões e a abertura das matrizes.

Tendo por base a ideia apresentada pela Adira, foram estudadas quatro novas soluções para a medição do ângulo de quinagem. As soluções estudadas são todas de medição indireta, ou seja, o valor medido pelos transdutores não é diretamente o ângulo de quinagem mas sim um valor que está relacionado geometricamente com o ângulo. As soluções necessitam que duas secções adjacentes da matriz sejam afastadas de uma distância mínima para a colocação do dispositivo. Este espaçamento é inferior a 5 mm, considerado o valor limite para que a chapa não sofra deformações indesejáveis.

A primeira das soluções utiliza dois apalpadores com uma geometria definida especificamente para a função. Estes encontram-se localizados no interior da matriz e possuem apenas um grau de liberdade, segundo a direção vertical. As dimensões destas peças são diferentes, consequentemente o contacto de cada uma delas com a chapa dar-se-á em cotas diferentes, esta diferença é medida por intermédio de um LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Esta solução exige que o transdutor consiga medir o deslocamento com uma resolução inferior a 21,8 µm.

As duas soluções estudadas seguidamente são muito semelhantes no princípio de funcionamento, isto é, ambas possuem dois pontos de contacto com a chapa. No entanto no primeiro caso são utilizados dois LVDTs para determinar a posição de cada ponto de contacto, enquanto no segundo um dos transdutores é substituído por uma peça móvel. O movimento desta é solidário com o corpo do LVDT e assim a medida obtida por este corresponde diretamente à diferença de posição dos pontos de contacto.

[1] www.adira.pt

Os dispositivos da segunda e terceira solução apresentam uma inclinação constante com a vertical para permitir por um lado aumentar a resolução do sistema e por outro facilitar a movimentação do mesmo. A resolução exigida por estas soluções é igual, uma vez que a distância entre os eixos dos transdutores, num caso, e distância entre o eixo do transdutor e o eixo da peça rígida, no outro, é igual (a resolução apenas depende desta distância).

A última solução estudada assenta no mesmo princípio de funcionamento das duas anteriores, mas o contacto com a chapa foi eliminado através da utilização de dois transdutores de deslocamento óticos para realizar a medição do ângulo de quinagem. A resolução exigida por esta solução é também igual à das duas soluções anteriores, no entanto como não existe qualquer contacto com a chapa elimina-se o erro associado ao contacto (deformação da chapa e/ou pontos de contacto) e ainda, como não existem elementos móveis, aumenta-se a resposta dinâmica do sistema.

Analisando os prós e contras de cada solução estudada, foi escolhida a solução que utiliza um LVDT e a haste rígida. Assim foi realizado o projeto e verificação dos elementos que constituem a solução. A solução apresenta algumas melhorias em relação às soluções comerciais, em especial a elevada resolução na medição do ângulo (0,04º) que potencia uma igualmente elevada exatidão e o custo significativamente inferior ao limite máximo imposto pela Adira. Contudo, a solução apresenta alguns problemas que podem inviabilizar a sua utilização, o principal deles é a deformação, no domínio elástico, nos pontos de contacto da chapa com os dois elementos (LVDT e peça rígida). Assim propõe-se para o futuro o estudo de uma solução sem contacto mas com um custo final mais competitivo do que a solução baseada em sensores Laser.

1.3 Organização da Dissertação

A dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, seguindo-se uma estrutura comum em todos: introdução, desenvolvimento e conclusão.

Após a introdução do trabalho - capítulo presente - seguem-se os restantes quatro capítulos.

No segundo capítulo são apresentados os fundamentos teóricos utilizados neste trabalho, incluindo uma descrição do processo de quinagem propriamente dito e da máquina utilizada (quinadora). Encontram-se também neste capítulo descritos os princípios de funcionamento dos sistemas comerciais e alguns exemplos de sistemas comerciais.

O terceiro capítulo é reservado para a definição dos requisitos que a nova solução deve cumprir e apresentação das soluções propostas, bem como a respetiva análise.

No quarto capítulo é apresentado o projeto da solução escolhida no terceiro capítulo e feita a análise comparativa com os sistemas comerciais.

Por último, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões finais do desenvolvimento de um sistema de medição do ângulo de quinagem.

2 - Descrição do Processo de Quinagem

Ao longo deste capítulo será feita uma exposição detalhada do processo de quinagem e da arquitetura da quinadora. São também apresentadas as principais técnicas de quinagem e os problemas que habitualmente ocorrem na quinagem de peças.

As principais soluções existentes no mercado serão referidas no final deste capítulo, indicando as principais limitações de cada uma.

2.1 Operação de Quinagem

A quinagem é um processo de deformação plástica de chapa metálica que permite o fabrico de superfícies planificáveis de geometria cilíndrica, cónica ou prismática. As dobras, lineares, são obtidas pela penetração de uma ferramenta, **punção**, numa ferramenta aberta designada por **matriz**.

O processo de quinagem é um processo de flexão elasto-plástica aplicado a uma viga retilínea (chapa). Assim, enquanto a dobra é realizada, o material do lado do punção é comprimido e do lado exterior é tracionado. A força aplicada e o valor de penetração induzida criam um gradiente de tensão ao longo da espessura. Os valores de tensão máxima aparecem nas fibras extremas na zona de ataque do punção à chapa. Ao ultrapassar-se o limite elástico do material nessas fibras, provoca-se uma deformação permanente que produz a dobra pretendida [1].

Apesar de se tratar de um processo relativamente simples é capaz de realizar inúmeras geometrias, desde muito simples até em alguns casos bastantes complexas, são inúmeros os exemplos da aplicação desta técnica, sendo alguns deles referidos em [2]:

- chassis para a indústria automóvel, agrícola e ferroviária;
- mobiliário metálico;
- estruturas metálicas para casas, coberturas, contentores, transportadores, etc.

A elevada cadência e uma excelente relação rigidez/peso das peças produzidas tornam o processo de quinagem muito competitivo. A rigidez acrescida deve-se ao fato de existir encruamento da chapa na zona deformada plasticamente, este fenómeno aumenta a resistência mecânica do material conduzindo a uma maior rigidez da estrutura.

Na Figura 2.1 é apresentado um exemplo de uma operação de quinagem com a indicação dos elementos que intervêm na operação. Esta imagem é apresentada no início desta seção para melhor compreensão da descrição do processo de quinagem.

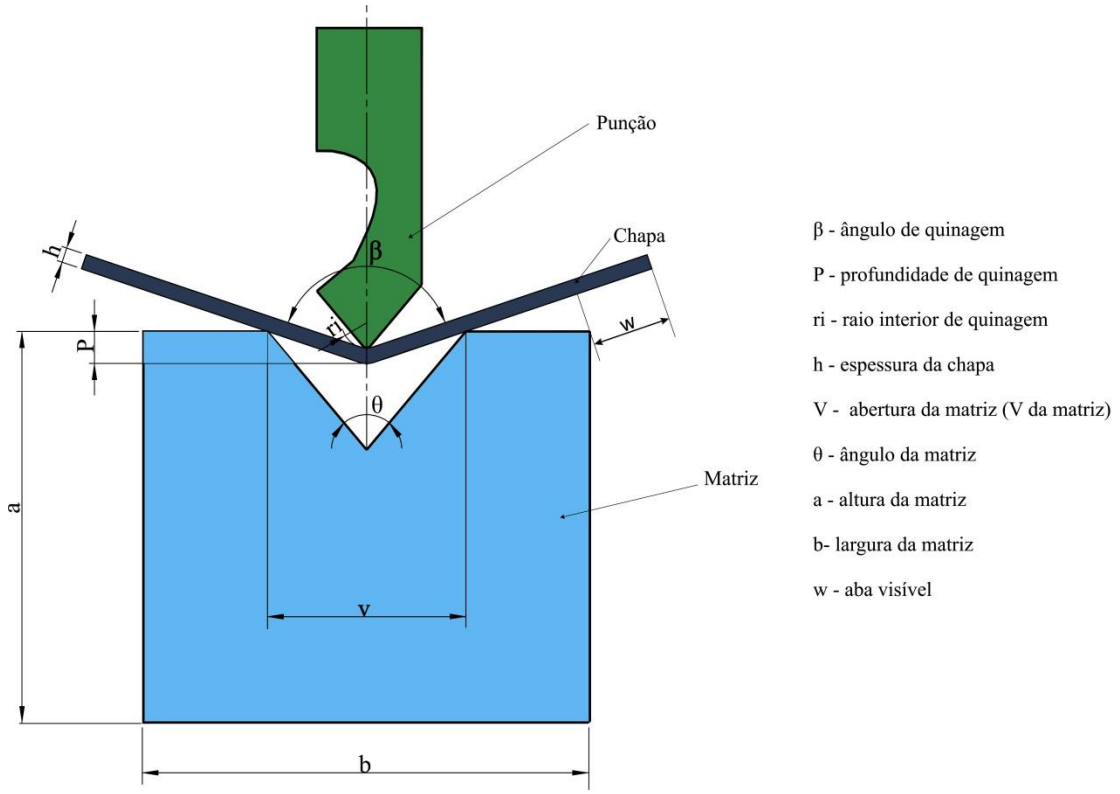


Figura 2.1 – Principais componentes e designações dos elementos envolvidos na quinagem

2.2 Técnicas de Quinagem

Atualmente existem várias técnicas de quinagem (Figura 2.2) que são utilizadas para realizar as mais diversas formas, sendo as mais correntes:

- Quinagem livre ou no ar (a);
- Quinagem forçada ou a fundo (d).

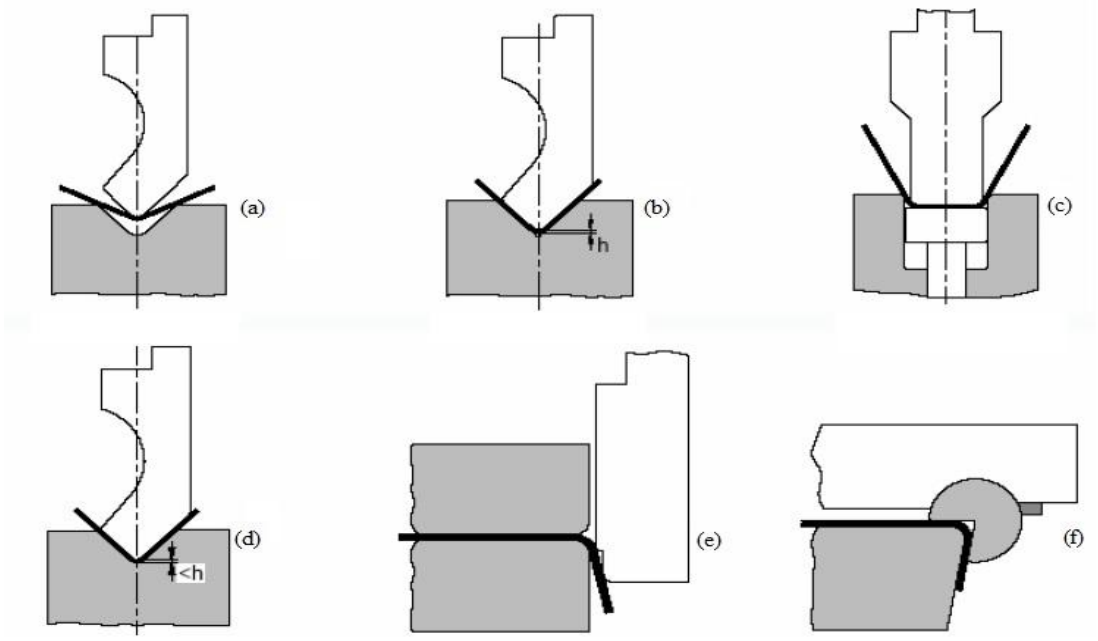


Figura 2.2 – Tipo de quinagem a)no ar, b) em V, c) em U, d) a fundo, e) de flange com cunho de arraste, f) rotativa [2]

Estas duas técnicas são mais utilizadas uma vez que são as mais fáceis de executar e controlar, pois têm menos variáveis associadas. Por esta razão será apresentada uma descrição mais pormenorizada de cada uma.

Quinagem Livre

Esta técnica utiliza apenas o efeito de flexão elástica simples, por contacto da chapa entre as ferramentas de modo a provocar na chapa a deformação pretendida. A chapa é apoiada na matriz segundo as linhas 1 e 2, e forçada pelo punção segundo a linha 3 (Figura 2.3).

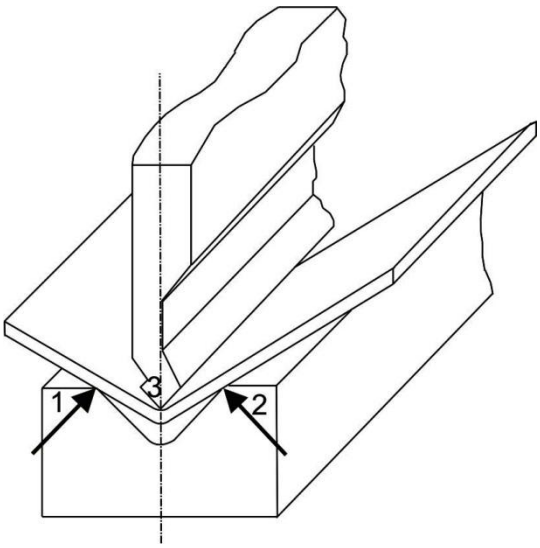


Figura 2.3 – Quinagem Livre [1]

Neste tipo de quinagem o valor do ângulo de quinagem é função da espessura e do material da chapa, assim como, do grau de penetração do punção na matriz e do valor de abertura do "V" da matriz.

A quinagem livre tem como principais vantagens [1]:

- exigência de menor força, permitindo a utilização de máquinas de mais reduzida capacidade para a execução dos trabalhos;
- redução do desgaste das ferramentas pois as pressões de contacto são menores;
- a obtenção de vários ângulos de quinagem com apenas um conjunto universal de ferramentas, com a consequente redução de custos, não só na aquisição de ferramentas mas também no trabalho de preparação e montagem das mesmas.

O processo apresenta no entanto um grande problema, que será descrito mais à frente com maior detalhe: a exatidão dimensional das peças é relativamente limitada [1].

Quinagem Forçada

Na quinagem forçada, também designada por quinagem a fundo, ou quinagem com quebra de nervo, a chapa é esmagada entre o punção e a matriz, sendo assim forçada a moldar-se ao contorno das ferramentas utilizadas [1]. No final desta operação a folga entre o punção e a matriz é equivalente à espessura da chapa, ou , eventualmente, ligeiramente inferior.

A utilização desta técnica encontra-se limitada a chapas de espessura reduzida (tipicamente inferiores a 3 mm) mas permite reduzir, ou até mesmo eliminar, a recuperação elástica da chapa [2].

Este tipo de quinagem tem como principais vantagens [1]:

- ser um processo mais preciso quando comparado com a quinagem livre;
- possibilitar a obtenção de raios interiores menores, ou seja, dobras mais vincadas;
- permitir uma maior repetibilidade do ângulo de quinagem, isto é, o ângulo de quinagem mantém-se em quinagens sucessivas em chapas idênticas;
- as variações de espessura são compensadas por um acréscimo de força;
- a resistência do material é acrescida pela compressão da zona quinada e plasticamente conformada durante a operação.

A necessidade de deformar totalmente a chapa conduz a quinadoras de maior capacidade de carga, o que é desde logo um dos principais entraves à sua utilização, acrescendo ainda que cada ângulo de quinagem tem de ter ferramentas próprias.

2.3 Estrutura da Quinadora e Arquitetura de Controlo

Estando o processo de quinagem descrito é importante apresentar a máquina utilizada para realizar a quinagem, a **quinadora**. Tipicamente uma quinadora apresenta uma estrutura em C ou "colo de cisne". É constituída por um avental fixo, tipicamente o inferior, e um avental móvel no qual são fixados os punções (Figura 2.4).

As quinadoras são classificadas por parâmetros definidos na sua construção, assim como a tonelagem máxima e o comprimento de trabalho.

A quinadora pode ter um acionamento electromecânico, hidráulico, pneumático e ou servo-elétrico.

As quinadoras ao longo dos anos evoluíram de máquinas simples, normalmente com apenas um eixo (o movimento do avental), para máquinas mais complexas e com um maior número de eixos com o intuito de automatizar o processo. O número de eixos de uma quinadora atual pode variar entre 3 e 6 (principais e auxiliares), sendo todos lineares. O eixo Y é o principal da máquina uma vez que se encontra associado ao movimento vertical do avental da máquina. Existindo um atuador em cada extremo da máquina estes serão dois eixos Y (Y_1 e Y_2).

O eixo X corresponde à movimentação dos esbarros da quinadora perpendicularmente ao plano frontal da máquina.

O eixo Z encontra-se igualmente associado à movimentação dos esbarros mas segundo a direção longitudinal da quinadora, ou seja, paralelamente à matriz. Tal como o eixo Y, o eixo Z pode separar-se em dois quando os dois esbarros possuem movimentos independentes.

A movimentação dos esbarros segundo a vertical corresponde ao eixo R, tratando-se de um eixo auxiliar opcional.

Nas figuras 2.4 e 2.5 são apresentadas as orientações dos eixos, segundo um modelo de um fabricante (Adira) e num esquema genérico.

Figura 2.4 – Exemplo de uma quinadora com a representação dos eixos [3]

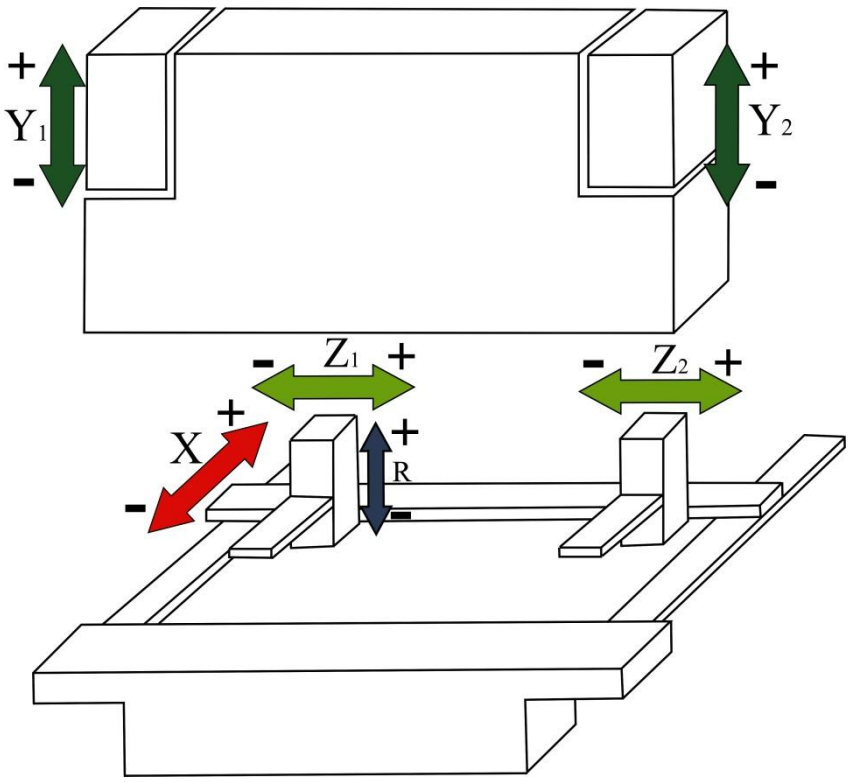


Figura 2.5 – Esquema da orientação dos eixos

Nas últimas décadas, a maior evolução nas quinadoras passou pela integração de controladores numéricos com mais capacidade de processamento, mantendo-se praticamente inalterada a estrutura da quinadora.

O controlador é responsável pelo controlo de inúmeras variáveis, desde a posição dos aventais, actuação e controlo dos vários eixos, ligação aos vários sistemas de segurança da máquina e ainda pela troca de informação com sistemas auxiliares (robôs, bombeado, etc.) e ligação à interface *Homem-Máquina* (HMI-*Human Machine Interface*). Para além da comunicação com estes sistemas, o controlador poderá permitir ainda a troca de informação com o sistema de medição do ângulo.

De uma maneira geral a arquitetura dos controladores divide-se em fechada e aberta.

Um controlador fechado não possibilita a total configuração do *hardware* e *software* de acordo com os requisitos de cada quinadora; são controladores numéricos do tipo “caixa negra”. Pelo contrário, um controlador aberto permite que o software seja alterado para facilitar a integração de novos componentes, tais como o sistema de medição do ângulo proposto neste trabalho.

Nos últimos anos a substituição dos controladores fechados por abertos tem sido a maior evolução nas máquinas ferramenta em geral. Não fugindo à regra os controladores numéricos das quinadoras têm seguido a mesma tendência.

Na Figura 2.6 é apresentada de uma forma esquemática uma arquitetura de controlo de uma quinadora atual típica.

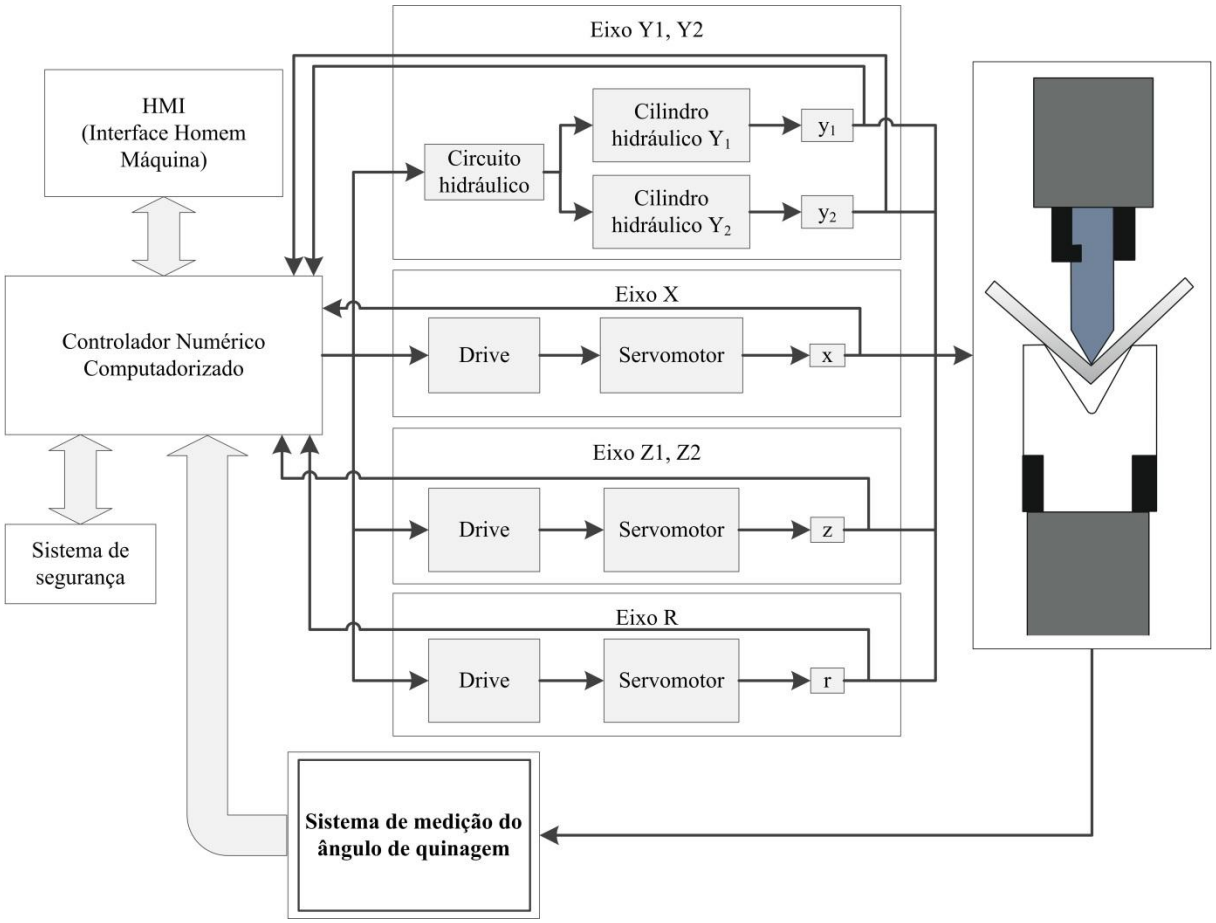


Figura 2.6 – Arquitetura de controlo de uma quinadora

2.4 Detalhes do Processo de Quinagem

Quando é realizada uma qualquer quinagem observa-se que o ângulo medido, na maioria das vezes, não é exatamente igual ao que foi programado. As principais razões para esta diferença são [1, 2]:

- retorno elástico ou efeito de mola (*spring back*);
- variações na espessura da chapa;
- propriedades da própria chapa (por exemplo: orientação da laminagem)
- desgaste das ferramentas;
- deformação estrutural da quinadora.

De todos os problemas existentes numa operação típica de quinagem, o que se torna mais relevante, quer pela sua grandeza, quer pela dificuldade em estimar e controlar, é o retorno elástico.

Retorno Elástico

No final da quinagem ocorre um fenómeno de endurecimento parcial da chapa. Isto deve-se ao fato do material nas proximidades do eixo neutro (Figura 2.7) ser submetido a um esforço inferior ao limite elástico e consequentemente sofrer apenas uma deformação elástica. Assim tende a recuperar a sua forma original quando a carga é suprimida – retorno elástico. Por outro lado, as zonas mais afastadas da fibra neutra sofreram uma carga superior ao limite elástico, logo são deformadas permanentemente [4].

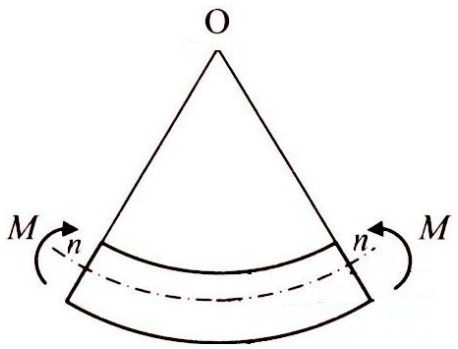


Figura 2.7 – Flexão de uma viga de seção rectilínea

A magnitude do retorno elástico depende evidentemente da natureza do material mas também, do raio de curvatura utilizado [4]. As variações do ângulo de quinagem causadas pelo *spring back* podem variar desde algumas décimas de grau até mesmo 25º (valor para aço de elevada resistência - *Weldox* 960) [5].

Redução da Influência do Retorno Elástico

Tendo em conta que este problema tem uma grande influência na forma final da peça, é necessário utilizar métodos que o minimizem:

- correção ou compensação dos ângulos das ferramentas durante o projeto;
- realização das operações a temperaturas elevadas, já que a recuperação elástica vem reduzida com a diminuição da tensão limite de elasticidade e esta diminui com o aumento da temperatura;
- substituição da quinagem livre por forçada;
- utilização de sistemas de medição, em tempo real, do ângulo de quinagem e utilização do mesmo para correção da profundidade de quinagem;
- correção do valor da profundidade de quinagem com o valor estimado para a recuperação elástica baseado em modelos numéricos ou tabelas experimentais.

O método mais utilizado é o último apresentado. Este é feito através de ábacos de quinagem geralmente disponibilizados pelos construtores das máquinas. A utilização destes ábacos apenas serve para compensar o retorno elástico que o material possivelmente irá sofrer, e não o que realmente ocorre.

Atualmente os construtores de quinadoras começam a incorporar sistemas de medição do ângulo de quinagem nas suas máquinas, permitindo assim uma medição do ângulo de quinagem real e a utilização do mesmo no controlador da máquina, para que o ângulo possa ser corrigido em tempo real. Tornando assim uma quinadora num sistema controlado em malha fechada (Figura 2.8).

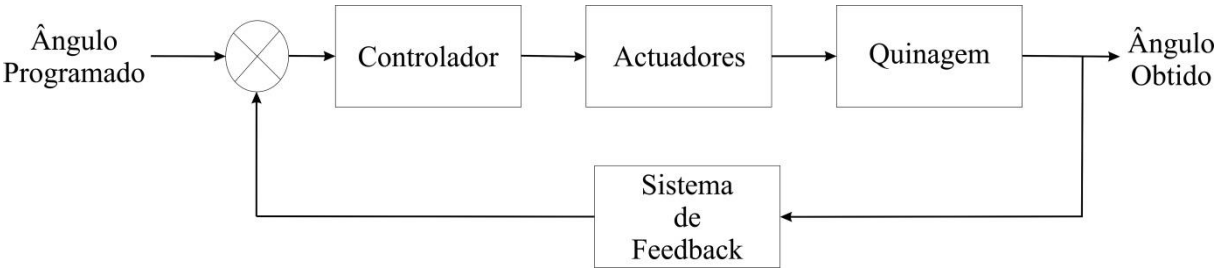


Figura 2.8 – Controlo em malha fechada do processo de quinagem

2.5 Sistemas Comerciais de Medição

Nesta seção serão descritos os princípios de funcionamento dos sistemas de medição do ângulo de quinagem. No final são apresentados alguns exemplos de sistemas comerciais.

Os sistemas de medição podem ser considerados em dois grandes grupos, em função da existência ou não de contacto físico entre uma ponta de prova do transdutor e a chapa:

- sistemas com contacto;
- sistemas sem contacto.

Sistemas com Contacto

A medição do ângulo de quinagem é realizada de duas formas, sendo elas:

- indireta – é medida uma distância linear e convertida para o ângulo de quinagem;
- direta – é medido diretamente o ângulo de quinagem.

Na medição indireta o ângulo de quinagem é obtido através de uma relação trigonométrica entre o deslocamento do sensor (c), uma posição de referência conhecida, e a orientação do sistema de medição (γ) [6] (Eq. 1 e Figura 2.9).

$$\beta = f(c, d, \gamma) \qquad \text{Eq. 1}$$

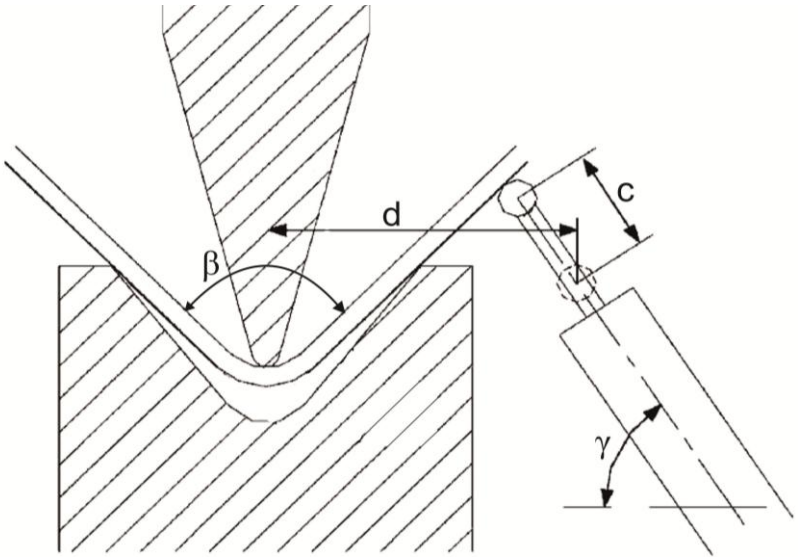


Figura 2.9 – Medição indireta por intermédio de um ponto de contacto [7]

A medição indireta pode ser realizada através de punções ou matrizes especiais integrando sistemas de medição.

Num destes sistemas, o punção é equipado por duas pontas de prova que se movem livremente na direção vertical. As pontas de prova, nas extremidades que contactam com a chapa, têm uma forma circular e cada uma das pontas possui um raio diferente, consequentemente a posição vertical de cada disco é diferente aquando do contacto com a chapa dobrada. A diferença (y_2-y_1) entre os centros dos discos é única para cada ângulo de quinagem (Figura 2.10).

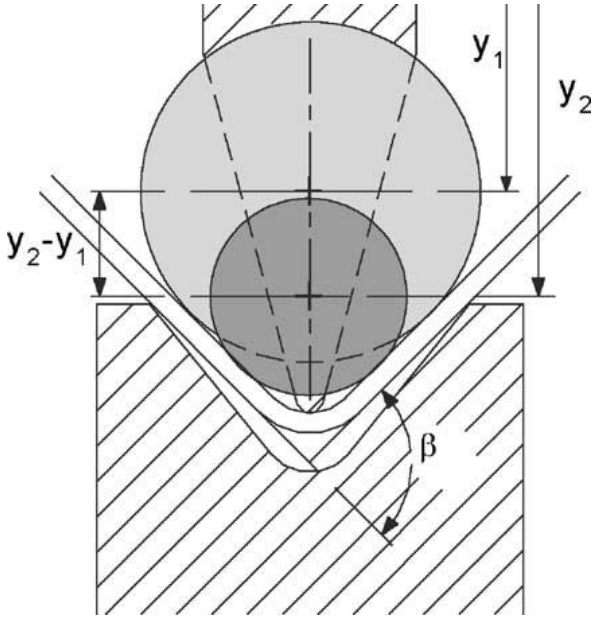


Figura 2.10 – Medição indireta baseada em quatro pontos de contacto (ponta de prova circular) [7]

Uma variante do sistema anterior utiliza quatro pontas de prova montadas no punção (Figura 2.11). Em cada lado do punção existem duas pontas que medem a distância à chapa. Conhecida a diferença do deslocamento (Δy) de cada lado do punção, o ângulo de quinagem é calculado por meio de uma função trigonométrica [8] (Eq. 2).

$$\beta = f(x, \Delta y_1, \Delta y_2) = 2 * \tan(\frac{x}{\Delta yi}) \qquad \text{Eq. 2}$$

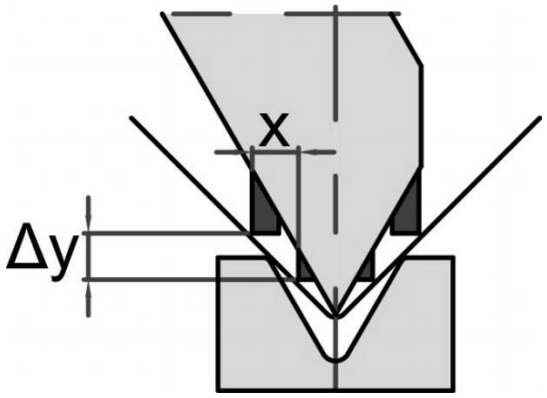


Figura 2.11 – Medição indireta com quatro pontos de contacto [9]

Na matriz pode também existir um conjunto de pontas de prova que medem o ângulo de quinagem. Este tipo de sistema pode utilizar duas ferramentas com uma forma semelhante a uma forquilha. O ângulo de quinagem é calculado pela relação geométrica entre o ângulo de quinagem e a diferença de deslocamento das duas ferramentas [10, 11].

Finalizando as soluções com contacto, existe ainda a possibilidade de se medir diretamente o ângulo de quinagem sem que seja necessária a utilização de qualquer função trigonométrica para este ser calculado.

A medição direta necessita de matrizes criadas para o efeito, nestas existem elementos rotativos que acompanham a chapa ao longo do ciclo de trabalho (Figura 2.12). A posição destes elementos é obtida através de transdutores angulares (*codificadores incrementais*) [12].

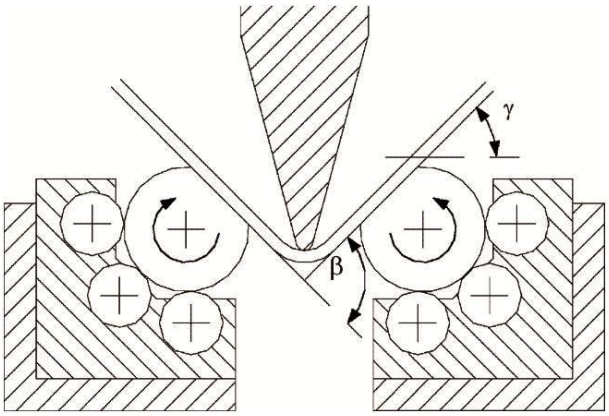


Figura 2.12 – Medição direta por transdutores angulares [7]

Seguidamente é apresentado o sistema de medição de contacto da Trumpf (construtora de máquinas ferramenta).

O dispositivo é constituído por um punção com dois pratos móveis no seu interior (Figura 2.13).

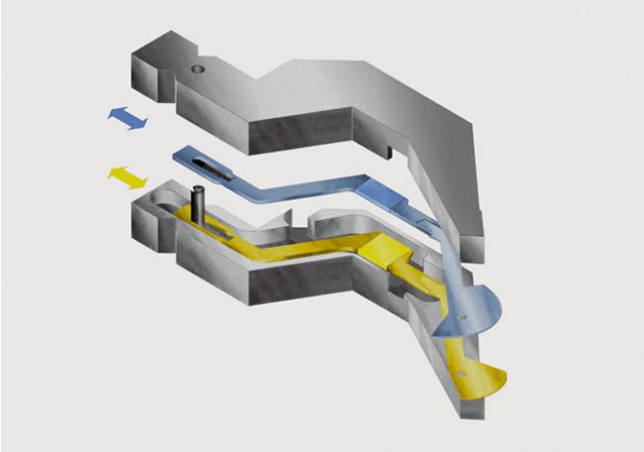


Figura 2.13 – Sistema de medição Trumpf [13]

O sistema além do cálculo do ângulo de quinagem consegue detetar o ponto de relaxamento da chapa – ponto a partir do qual a chapa inicia a recuperação elástica – e deste modo calcular o valor do ângulo referente ao retorno elástico [14].

A gama de medição desta solução abrange ângulos desde 35º a 145º. Podem-se introduzir até 3 dispositivos de medição ao longo do comprimento da quinadora para que seja medida a variação do ângulo segundo o comprimento da chapa [14]

O sistema no entanto tem alguns problemas, sendo os principais:

- para ângulos pequenos (próximo de 30º) o sistema não consegue efetuar uma medição exata do ângulo;
- cada punção encontra-se associado a um "V" da matriz, alterando esta dimensão é necessário um novo dispositivo;
- o uso deste sistema encontra-se limitado a punções com formas tradicionais. Quando é necessário utilizar ferramentas especiais não existem soluções para efetuar a medição.

Sistema sem Contacto

Tal como na seção anterior, serão apresentados os princípios de funcionamento das soluções existentes, e no final será apresentada uma descrição mais pormenorizada de um exemplo de duas soluções comerciais.

As soluções sem contacto não possuem uma distinção tão marcada como as soluções com contacto quanto ao tipo de medição (direta/indireta). Deste modo não será realizada uma distinção entre os tipos de medição.

De uma forma geral todos os sistemas de medição sem contacto utilizam sistemas óticos para realizarem a medição do ângulo de quinagem.

Um destes sistemas baseia-se na reflexão de um único feixe de laser projetado na superfície da chapa metálica e medido com dois sensores. O conjunto do sistema de projeção e sensores é rotativo, sendo o ângulo (γ), determinado pela igualdade dos sinais de resposta dos sensores (Figura 2.14) [15, 16]. Este sistema encontra-se patenteado pela Amada (construtora de máquinas ferramenta)[17].

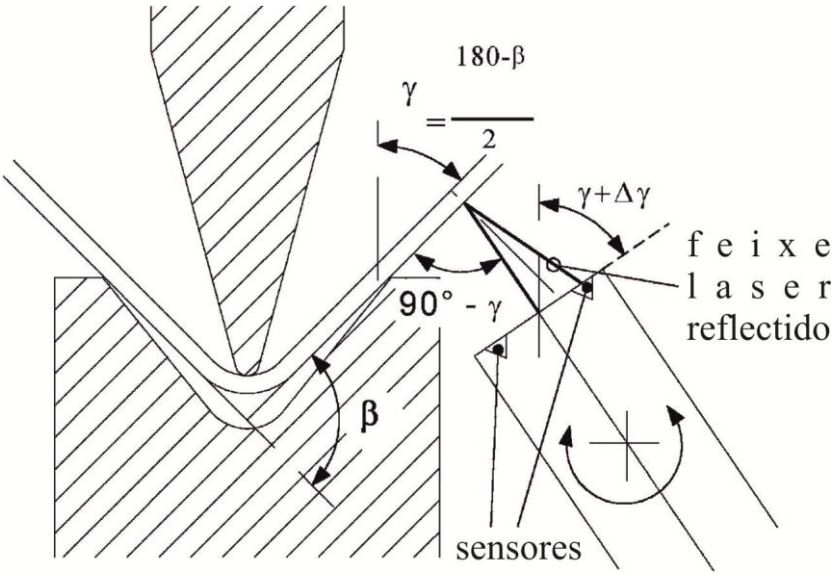


Figura 2.14 – Medição através da reflexão de feixe laser [7]

Um dos sistemas mais comuns utiliza a projeção de uma linha (laser) sobre a chapa e a matriz (para que haja uma referência conhecida). Um sistema de visão colocado segundo um ângulo no plano horizontal, permite a contínua monitorização do ângulo de quinagem pela análise do ângulo entre a linha de referência (matriz) e a linha na chapa. Normalmente este tipo de sistema desloca-se segundo o eixo Z da máquina para que seja realizada a medição ao longo do comprimento da chapa.

Um dos sistemas mais inovadores utiliza um sistema de visão para obter o ângulo de quinagem. Este sistema projeta sobre o perfil da chapa um feixe de luz não visível (Figura 2.15) e no lado oposto existe um recetor onde é projetada a sombra da imagem recebida. A luz que não atinge o recetor encontra a chapa, a matriz e o punção. O sistema, através do reconhecimento de padrões, consegue fazer a distinção entre os vários elementos. Através da análise da imagem correspondente apenas à chapa, o sistema calcula o ângulo de quinagem [18].

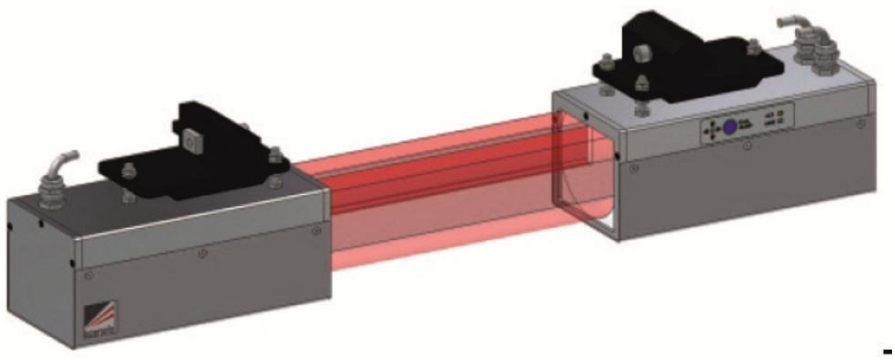


Figura 2.15 – Emissor e recetor do sistema de visão [18]

Seguidamente são apresentados dois exemplos de sistemas sem contacto. O primeiro foi escolhido uma vez que se trata de um dos sistemas mais utilizados no mercado. Já o segundo é apresentado uma vez que se encontrava em testes na Adira aquando da realização deste trabalho.

Sistema Laser

De todos os sistemas existentes, de longe o mais utilizado é o laser, pois além de não ter contacto com a chapa, o processamento do seu sinal é mais rápido quando comparado com a utilização do processamento de imagem.

O sistema laser utilizado pela maioria dos fabricantes é em tudo semelhante, mudando apenas o nome do dispositivo. Por exemplo no caso da LVD chama-se Easy-Form® e na Trumpf é apelidado de LCB®.

O sistema utiliza a projeção de uma linha sobre a matriz e a aba da chapa, Figura 2.16.

Figura 2.16 – Sistema LCB projeção da linha [19]

O sistema desloca-se transversalmente sobre o avental fixo da quinadora, permitindo assim que sejam feitas várias leituras ao longo do comprimento da chapa. As leituras são feitas a cada 20 ms e enviadas para o controlador CNC, que com o valor do ângulo faz as correcções necessárias de modo a obter o ângulo correto.

Este sistema tem como principais vantagens:

- a medição do ângulo de quinagem é imune à inclinação da matriz (Figura 2.17-b) e à posição dos sensores (Figura 2.17-a);
- numa operação de quinagem descentrada é possível calcular corretamente o ângulo de quinagem (Figura 2.17-c).

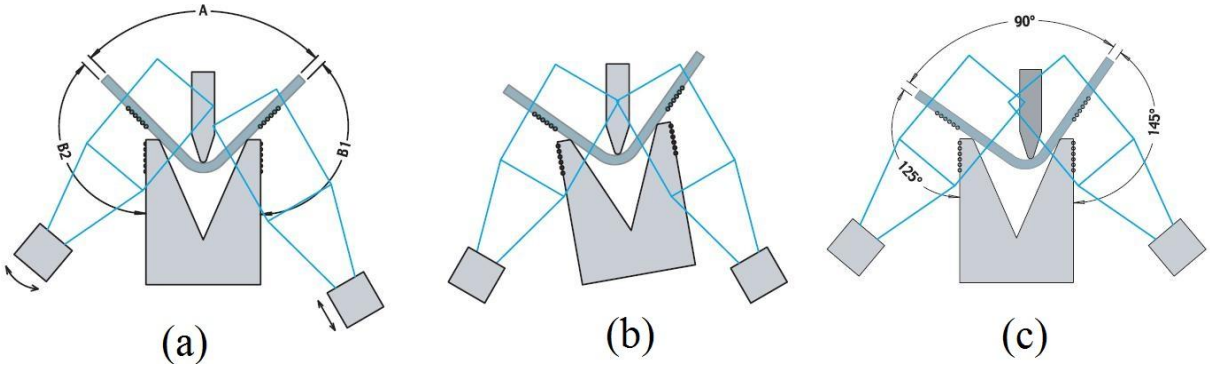


Figura 2.17 – Sistema laser (a) independente da posição dos sensores; (b) imune à inclinação da matriz; (c) medição descentrada [20]

Tal como espectável, para que se possam ter as vantagens anteriormente apresentadas é necessário fazer a introdução de inúmeros parâmetros, como por exemplo, a dimensão da matriz e a posição relativa dos elementos sensores em relação à matriz. Dado que as

quinadoras são operadas por pessoal com pouca formação, torna-se difícil a utilização deste sistema devido à sua elevada parametrização.

Um outro grande entrave à utilização de um sistema deste tipo é a dimensão mínima de aba visível que é necessária para se obter uma medição correta do ângulo de quinagem, este valor é tipicamente de 20mm.

É normal que as chapas utilizadas na operação de quinagem contenham irregularidades, tais como, óleo, riscos, tinta e pode acontecer igualmente que a chapa não seja perfeitamente lisa. Estes fatores fazem com que a projeção da linha não seja uniforme e consequentemente os resultados obtidos não sejam aceitáveis.

Por fim, para que as duas "cabeças de medição" possam ser acopladas é necessário disponibilizar uma área significativa quer na parte frontal, quer na retaguarda da máquina. Sendo que a utilização do espaço frontal reduz em muito o volume de trabalho disponível assim como coloca o sistema numa posição susceptível a danos.

Sistema de Visão

A Laser Safe criou um sistema apelidado de IMG-100 que utiliza um sistema de visão capaz de fazer a confirmação do ângulo de quinagem ou de realizar o controlo do ângulo em tempo real. Além da medição do ângulo o sistema funciona também como barreira de proteção, pois deteta a presença das mãos do operador na zona de quinagem.

O emissor projeta um feixe de luz, num espetro não visível, a luz que não chega ao recetor (assinalado na Figura 2.18) corresponde às ferramentas da quinagem (punção e matriz) e à chapa. O sistema é capaz de diferenciar a chapa das ferramentas, calculando assim o ângulo de quinagem.

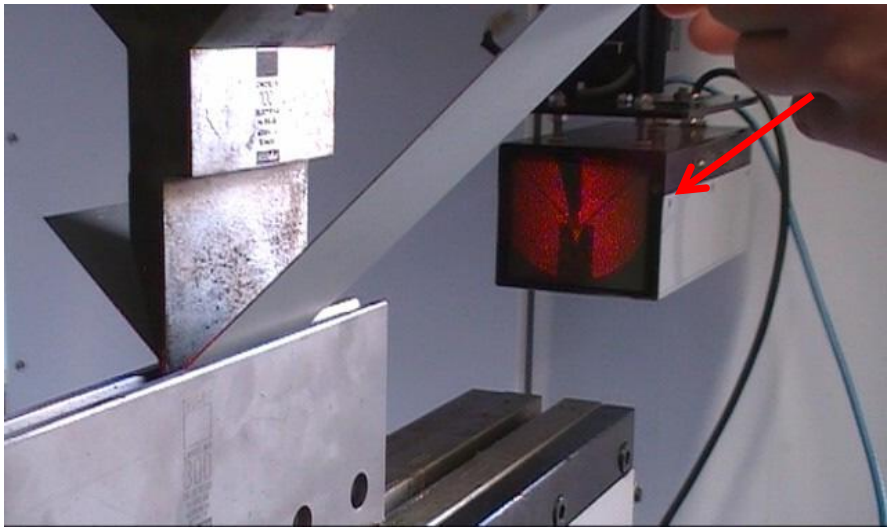


Figura 2.18 – Recetor do sistema IMG-100 [18]

O software pode ser instalado e operado num computador industrial ou pode ser integrado no controlador numérico da máquina. A integração no controlador permite um fluxo de informação mais unificado, conduzindo a um controlo preciso durante a medição do ângulo de quinagem [18].

A utilização do sistema, quer seja apenas para confirmação do ângulo final de quinagem, quer seja para fazer o seu controlo em tempo real, requer a aprendizagem das formas, e correspondentes imagens, que a chapa vai ter ao longo da quinagem. A cada imagem está associada uma posição do avental móvel, para que, quando for necessário confirmar o ângulo de quinagem, as imagens para comparação sejam retiradas na mesma posição que a imagem padrão.

Ao operador é apresentado na HMI da máquina uma imagem semelhante à da Figura 2.19**,** onde é possível ver qual o ângulo que está a ser medido, o ângulo que era expectável medir e a respetiva tolerância; é também apresentado o *Warp angle*- que traduz a não uniformidade do ângulo de quinagem ao longo de todo o comprimento da chapa - a sua tolerância e ainda a confiança do resultado obtido.

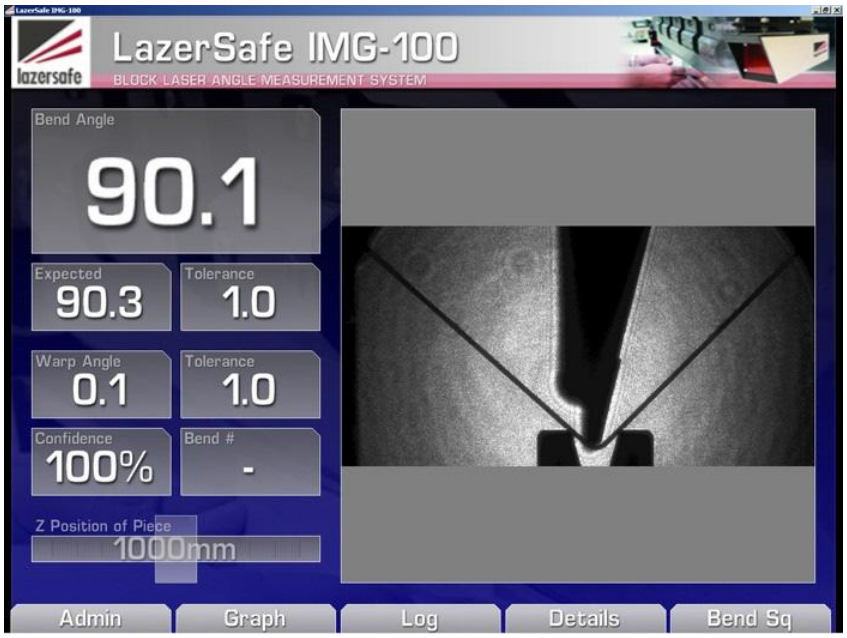


Figura 2.19 – Ecrã do sistema IMG-100 [18]

Em termos de custo este sistema é um dos mais baratos, logo é uma das principais razões da sua escolha.

Este sistema permite obter uma exatidão de ±0,25º, mas para que tal valor seja alcançado é necessário que a medição seja feita segundo parâmetros exigentes. A exatidão máxima só é atingida quando se está a medir próximo do elemento recetor e para comprimentos de chapa até dois metros – conseguindo-se ainda ter uma exatidão aceitável para comprimentos até cinco metros.

A exatidão que o sistema consegue é também afectada pelo ângulo que se pretende medir, assim como o comprimento de aba visível. Na Figura 2.20 pode ver-se um gráfico da exatidão associada às características da quinagem.

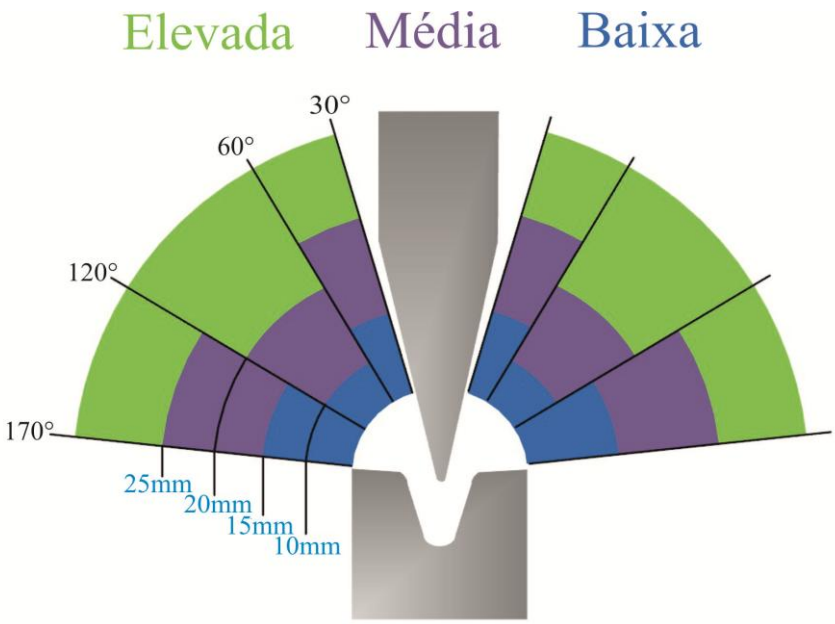


Figura 2.20 – Exatidão do IMG-100 relacionada com o ângulo e aba visível [18]

Outro fator que influência a exatidão do sistema é a variação da densidade do ar que se encontra na proximidade da ferramenta, esta variação vai fazer com que a direção da luz não seja uniforme o que faz com que a imagem tirada pela câmara vá ter uma pequena distorção. Esta variação de densidade deve-se a correntes de ar junto ao conjunto punção-matriz, devido às trocas de calor entre as ferramentas e a própria envolvente.

Resumo dos Sistemas Comerciais

Na tabela seguinte são apresentadas algumas das características dos sistemas comerciais existentes.

Tabela 2.1 – Resumo sistemas comerciais

Nome comercial	Tipo de solução	Gama de medição (°)	Exatidão (°)	(Ref.)
ACB - Automatically Controlled Bending	Contacto – dos pratos móveis no punção	35 a 145	±0.5	[14]
ACS –Sensor Angle Control System	Contacto – quatro pontas de prova no punção	30 a 140	-	[9]
GPS 4	Contacto – dois garfos na matriz	30 a 170	-	[10]
Bi-J	Contacto – ponta de prova colocada junto à matriz	90 a 150	±0.25	[21]
Ursviken's Angle and Spring Back Measurement System	Contacto – medição direta do ângulo	30 a 180	±0.3	[22]
Easy-Form® / LCB®	Sem contacto – projeção de linha	30 a 140	±0.3	[19]
IMG-100	Sem contacto – análise de imagem	30 a 170	±0.25	[18]
PSENvip	Sem contacto – tecnologia LED para confirmação do ângulo	50 a 160	±0.25	[23]

De uma forma geral as soluções que utilizam um sistema laser apresentam um custo relativamente alto, devido ao elevado custo dos sensores, mas conseguem atingir uma exatidão elevada.

Os sistemas de medição que são montados no interior dos punções/matrizes são menos flexíveis uma vez que são dedicados a uma determinada forma da ferramenta. Este tipo de solução tem uma grande vantagem, a ocupação da área de trabalho é reduzida pois utilizam o mesmo espaço que as ferramentas.

2.6 Conclusões

A quinagem é um processo de deformação, baseado na flexão elasto-plástica aplicada a uma chapa. Um processo que teoricamente não é muito complexo, mas a crescente necessidade de tornar o processo o mais automático possível levou à necessidade de aumentar o controlo sobre as variáveis do processo. Daí as quinadoras serem máquinas extremamente evoluídas no que diz respeito à actuação e controlo dos seus eixos.

A quinagem livre apresenta-se como a técnica mais utilizada, mas apresenta um grande problema: o ângulo de quinagem obtido é normalmente diferente do programado. Isto deve-se principalmente ao retorno elástico que a chapa sofre após remoção da carga.

A diminuição do tamanho das séries traduz-se na necessidade de reduzir ao máximo o número de peças rejeitadas, preferencialmente aproveitando logo a primeira peça. Para que isto seja conseguido é necessário ter um melhor controlo das peças quinadas. Assim, é necessária a utilização de um sistema de medição do ângulo que seja intrínseco à quinadora. A medição tem que ser realizada em tempo real para que o controlador da quinadora possa realizar as devidas correções sem retirar a chapa.

As soluções comerciais dividem-se em dois grandes grupos, sistemas com contacto e sistemas sem contacto. Quer um tipo de sistema, quer o outro, apresentam vários prós e contras na sua utilização. De uma maneira geral todos têm uma exatidão próxima dos 30 minutos, o que para as quinagens correntes é um valor aceitável. Além do custo elevado, são sistemas que requerem condições muito específicas para se obter resultados aceitáveis, o que dificulta a sua implementação no meio industrial.

3 - Apresentação de Soluções

Analisando o processo de quinagem e os sistemas de medição do ângulo é possível definir os requisitos gerais de uma nova solução, o que será contemplado no início deste capítulo. Para além dos requisitos gerais, foram também tidos em consideração os requisitos mais particulares definidos pela empresa (Adira).

Além dos requisitos, existem outros condicionalismos ao projeto que são intrínsecos ao processo de fabrico, como a zona livre da máquina, a possibilidade de existirem várias quinagem e/ou furos, etc..

Por fim são apresentadas as soluções consideradas e feita uma análise de viabilidade de cada uma delas. Com base nessa análise, foi escolhida uma para realização de um anteprojecto.

3.1 Requisitos do Sistema

A partir da análise dos sistemas de medição existentes pode-se definir as suas limitações e capacidades que são apresentadas seguidamente.

A quinagem é um processo em que cada vez mais se exige um maior rigor dimensional, relativamente ao valor do ângulo de quinagem final e da sua verificação ao longo do comprimento da chapa. Tendo em conta os sistemas comerciais existentes, a exatidão expectável para o novo modelo tem de ser no mínimo da mesma ordem de grandeza, ou seja ±0.5º.

Os sistema de medição existentes necessitam de uma configuração bastante cuidada, quer seja pela introdução de vários parâmetros relativos ao processo, ou pela própria montagem. Estes fatos por um lado aumentam o tempo de paragem da máquina (tempo de

Setup) e por outro exigem do operador mais conhecimentos técnicos. Assim pretende-se que uma nova solução seja o mais simples possível aquando da sua montagem e programação. O sistema deve ainda ser o mais transparente possível para o operador, de modo a minimizar a sua influência no processo de medição.

A gama de medição dos sistemas comerciais é muito variada, no entanto é possível afirmar que o menor ângulo a medir é de 30º. De modo a acompanhar a chapa ao longo do ciclo de quinagem e a controlar o ângulo, será necessário que o sistema consiga medir desde o início do ciclo, ou seja, desde o momento em que a chapa se encontra plana. Admite-se contudo que o ângulo máximo de quinagem seja igual a 140º.

Uma das características dos sistemas comerciais é permitirem a confirmação do ângulo de quinagem no final do processo, contudo só a medição em tempo real permitirá de forma mais vantajosa um controlo em malha fechada para executar as devidas correcções. Assim é imperativo que o sistema a projetar tenha a capacidade de realizar as medições em tempo real.

Sendo o tempo de ciclo fundamental no processo de quinagem e considerando que o tempo de ciclo será sempre afectado pela utilização dos sistemas de medição mesmo quando estes efectuam uma medição rápida (ex. 20 ms), espera-se que o sistema a desenvolver consiga realizar a medição e o cálculo do ângulo com o mínimo de influência sobre o tempo de ciclo (a titulo de exemplo uma operação de quinagem pode demorar apenas 1 s).

Os benefícios dos sistemas de medição são vários, no entanto a sua utilização no meio fabril é ainda diminuta devido ao seu elevado custo, podendo representar até 10% do valor da quinadora. Assim é necessário que a solução a desenvolver tenha um custo bastante inferior para que promova a sua proliferação no meio industrial, recorde-se que o valor adequado em termos de mercado deve ser inferior a cinco mil euros.

Para além dos requisitos determinados pelos sistemas comerciais, foram considerados requisitos particulares definidos pela Adira relativos a ângulos de quinagem frequentes, à espessura das chapas e às matrizes a considerar.

O ângulo de quinagem de longe mais realizado é o de 90º mas é normal serem efetuadas quinagens a 30º, 50º, 70º, 80º, 120º, 135º. Deste modo pode-se afirmar que qualquer tipo de solução tem que ser capaz de medir nesta gama.

As chapas mais utilizadas para quinar têm espessuras de 0.8, 1, 1.5, 2, 3 e 4 mm o que conduz a matrizes com “V” de 6, 8, 10, 12, 16, 20 e 32 mm. Logo, além de existir uma grande variedade de ângulos de quinagem, existe também uma grande variedade de conjuntos matrizes/punções, estes variam quer na forma, quer nas dimensões. Este fato conduz à necessidade de projetar um sistema que seja flexível de modo acomodar as matrizes e os punções utilizados.

Analisando as dimensões das matrizes, com a abertura definida anteriormente, constata-se que a altura pode assumir dois valores, 80 e 120mm, e a largura variar de 20 a 60 mm. Logo o sistema de medição deve ter como requisitos a adaptabilidade às variações de dimensões da matriz.

Sintetizando, da análise dos vários requisitos do sistema de medição do ângulo de quinagem resultaram:

- um custo do sistema inferior a 5000 €.
- uma gama de medição de pelo menos 30º a 140º;

- exatidão próxima da existente nos sistemas comerciais, ou seja, ±0.5º;
- sistema fácil de instalar e de fácil utilização para o operador;
- adaptabilidade às variações das dimensões das ferramentas;
- não ter limitações quanto à natureza do material da chapa nem quanto às dimensões da mesma;
- o sistema tem que ser integrável no controlador da quinadora;
- o tempo de ciclo não deverá ser afetado pela utilização do sistema;
- o operador deve ter o mínimo de influência possível no processo de medição;
- o sistema deve permitir além da confirmação do ângulo de quinagem a medição para controlo em tempo real do mesmo.

3.2 Requisitos Complementares do Projeto

Após a definição dos requisitos do sistema é igualmente importante identificar as condicionantes resultantes da operação de quinagem em si mesma. Para tal considera-se uma zona da chapa onde não pode ser efectuada qualquer medição (definida por *zona não utilizável*), a instalação do dispositivo de medição na quinadora, a existência de várias quinagens e furos na chapa e por fim a descontinuidade máxima admissível resultante do afastamento entre dois segmentos da matriz.

Zona de Medição

De modo a obter uma medição correta do ângulo de quinagem, é necessário que esta seja realizada na parte reta da chapa. Sendo assim a medição na zona deformada plasticamente deve ser evitada, uma vez que aí existe uma curvatura da chapa.

A curvatura está relacionada com a espessura da chapa, com as propriedades do material a quinar e também com o próprio ângulo que se pretende realizar. O raio desta curva pode ser estimado pelo raio mínimo de quinagem. Seguidamente será dada uma pequena explicação de como pode ser calculado este raio.

O raio mínimo de quinagem é o raio para o qual surgem fissuras na superfície exterior da chapa, a sua determinação pode ser baseada nas propriedades mecânicas do material ou então empiricamente.

A determinação do raio mínimo de quinagem através das propriedades mecânicas do material utiliza as equações 3 e 4, em que h é a espessura da chapa, e q é o coeficiente de estricção – variação máxima da área de seção transversal após ruptura do provete no ensaio de tração- do material [2].

$$\frac{r_{min}}{h} = \frac{1}{2q} - 1 \quad \text{se } q < 0.2 \qquad \text{Eq. 3}$$

$$\frac{r_{min}}{h} = \frac{(1-q)^2}{2q-q^2} \quad \text{se } q \leq 0.2 \qquad \text{Eq. 4}$$

Outra forma de calcular o raio mínimo de quinagem é usando fatores de correção presentes em ábacos. Um desses exemplos é apresentado na Tabela 3.1 e na Eq. 5 [2].

$$r_{min} = C * h \qquad \text{Eq. 5}$$

Tabela 3.1 – Fator de correção C para cálculo do ângulo de quinagem [2]

Material	Condição do material			
	Recozido		Tratado Termicamente	
	⊥ à DL[2]	‖ à DL	⊥ à DL	‖ à DL
Aço estampagem	0.0	0.2	0.2	0.5
Aço, AISI 1010, 1040	0.1	0.5	0.5	1.0
Aço, AISI 1015,1020	0.2	0.6	0.6	1.2
Cobre	0.1	0.2	1.0	2.0
Latão	0.0	0.2	0.4	0.8
Zinco	0.5	1.0	-	-
Alumínio	0.0	0.2	0.3	0.8
Alumínio duro	1.0	1.5	3.0	4.0
Titânio	0.5	1.0	3.0	5.0

Tal como dito anteriormente a dimensão da zona deformada plasticamente depende de inúmeros fatores, sendo contudo possível estimar a sua extensão linear (Figura 3.1) usando a Eq. 6.

$$x_{min} = 2 * r_{min} * \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \qquad \text{Eq. 6}$$

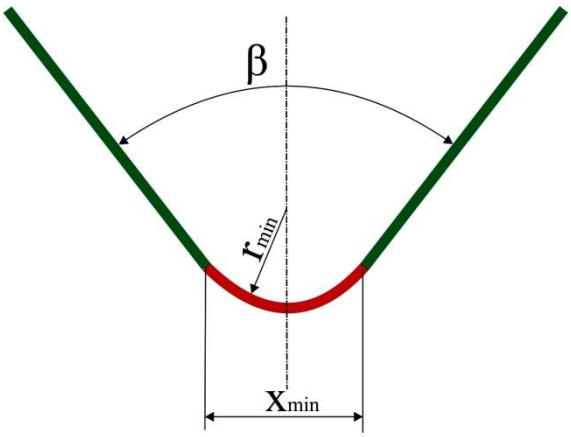


Figura 3.1 – Definição da extensão da zona não utilizável

[2] **Direção** de **L**aminagem - DL

Com base na Eq. 6 constata-se que a extensão da zona não utilizável pode ir desde poucas décimas até algumas dezenas de milímetros. Para efeitos deste projeto admitiu-se como um limite máximo de 20 mm para a zona não utilizável, ou seja, 10 mm para cada lado em relação ao eixo de quinagem assumindo uma chapa de alumínio duro com espessura máxima de 3 mm.

Montagem/Instalação do Dispositivo de Medição no Espaço de Trabalho

A empresa apresentou também como restrição que o dispositivo não deve ser colocado do lado do operador, ou seja, na parte frontal da máquina. Esta imposição tem duas razões de existir, em primeiro lugar a ocupação da zona frontal da máquina conduz a uma redução da área de trabalho e em segundo lugar qualquer solução que ocupasse a zona frontal iria estar tendencialmente sujeita a maiores interações com o meio fabril, potencialmente causadoras de avarias no sistema.

Com base nesta condição a solução a projetar deve ser montada exclusivamente na retaguarda da máquina.

Múltiplas Quinagens e Furos

É usual existirem múltiplas operações de quinagem na mesma chapa quer seja para produzir caixas, ou mesmo formas mais complexas. A formação destas geometrias envolve sucessivas operações de quinagem (Figura 3.2), conduzindo a uma redução do volume de trabalho.

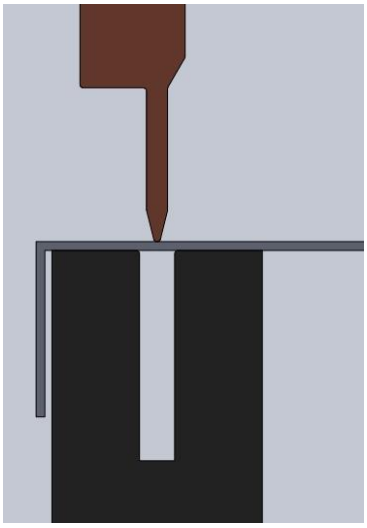


Figura 3.2 – Exemplo de chapa com quinagem prévia

A existência de furos nas chapas a serem quinadas é também usual.

Uma nova solução deverá acomodar estas duas possibilidades que é normal existirem numa operação de quinagem. Logo deve ser capaz de detetar a presença de furos na chapa e também se está a medir a face correta e não uma dobra previamente existente.

Espaçamento Máximo

No contacto com a empresa foi transmitida a possibilidade de segmentar a matriz e espaçar dois segmentos adjacentes de uma distância máxima de 5 mm, permitindo assim que

o sistema de medição seja incorporado neste espaço. Utilizando este espaço é possível diminuir a aba visível necessária para medição do ângulo de quinagem e diminuir o volume de trabalho ocupado pelo mesmo.

3.3 Soluções Estudadas

Usando o espaçamento entre matrizes, como sugerido pela Adira, foram idealizadas várias soluções, das quais foram seleccionadas duas com contacto e uma sem contacto através de sensores óticos.

No final de cada solução serão apresentadas as suas vantagens e desvantagens.

Solução 1 – Medição com Dois Pontos de Contacto (apalpadores)

O sistema é constituído por duas chapas finas – denominados de apalpadores – que deslizam entre si mantendo-se sempre em contacto com a chapa devido à ação de molas lineares. O cálculo do ângulo é feito através da medição do desfasamento longitudinal entre as chapas, ou seja, trata-se de um sistema de medição indireta do ângulo de quinagem (Figura 3.3).

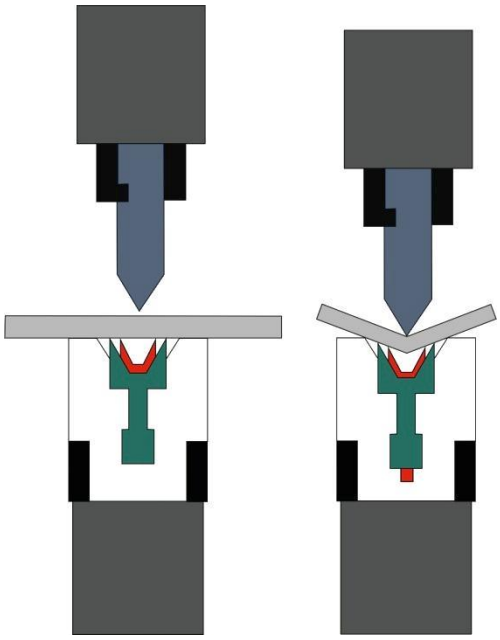


Figura 3.3 – Vista em corte de medição de ângulo solução 1

Cálculo do Ângulo

O ângulo, tal como dito anteriormente é calculado através da diferença entre a posição vertical dos dois apalpadores. Para determinar esta diferença de posicionamento entre estes propõe-se a utilização de um transdutor de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). Este tipo de transdutor apresenta uma resolução praticamente infinita, dependendo apenas do dispositivo de leitura da sua saída.

Como a medida que se pretende é apenas a diferença da posição entre os dois pontos de contacto, é apenas necessário um transdutor. O corpo do LVDT é ligado a um dos apalpadores e o núcleo/haste do mesmo é solidário com o outro.

Utilizando a medida obtida pelo LVDT e sabendo a distância horizontal entre os pontos de contacto é possível calcular o ângulo de quinagem. Na Figura 3.4 é demonstrada a relação geométrica entre o ângulo de quinagem e estes dois comprimentos. A Eq. 7 traduz numericamente a relação geométrica.

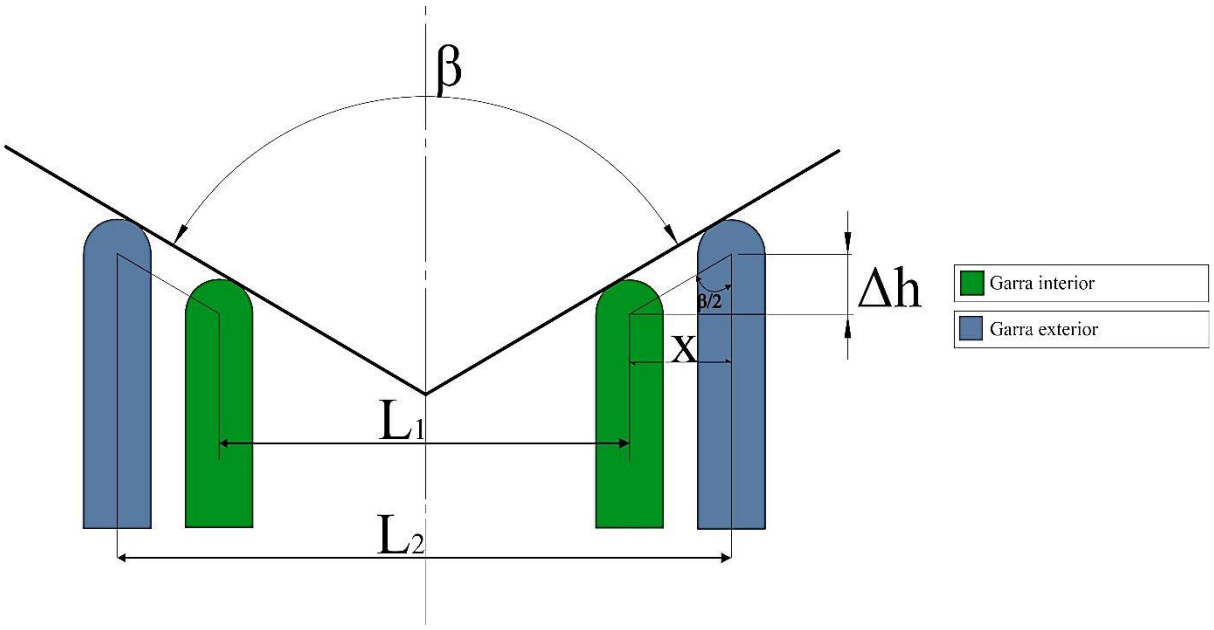


Figura 3.4 – Definição do cálculo do ângulo de quinagem

$$\beta = 2 * tan^{-1}\left(\frac{X}{\Delta h}\right) \text{ com } X = \frac{L2-L1}{2} \qquad \text{Eq. 7}$$

Forma das Pontas de Prova

De modo a definir a solução, o próximo passo a seguir é o estudo da forma em U. Os apalpadores terão uma forma igual mudando entre eles apenas as dimensões (Figura 3.5). Seria espectável que o contacto com a chapa fosse o mais pontual possível mas isso traduzia-se numa zona A e B com uma aresta viva. Esta aresta viva levaria a que estes sofressem um desgaste muito rápido pelo que se optou pela forma semicircular.

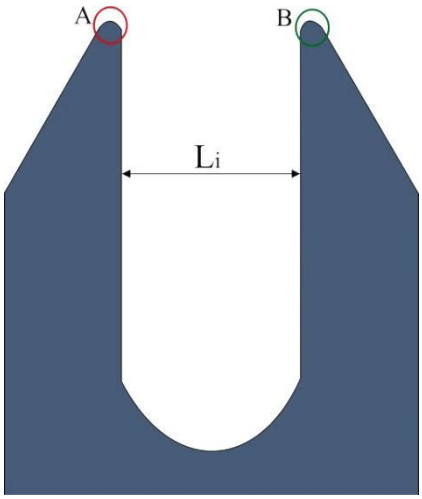


Figura 3.5 – Esquema da forma da solução 1

O fato de ser semicircular não produz qualquer alteração na medição uma vez que as dois apalpadores vão ter a mesma forma, sendo medido apenas o deslocamento vertical (Figura 3.6, Eq. 8 e Eq. 9).

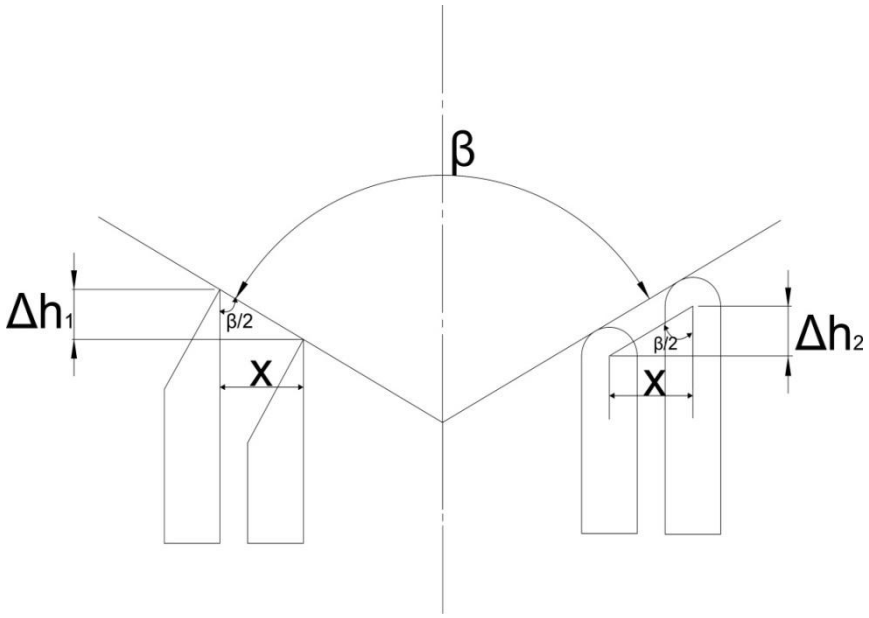


Figura 3.6 – Visualização do ângulo de quinagem com geometrias diferentes

$$\tan\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{x}{\Delta h1} \qquad \text{Eq. 8}$$

$$\tan\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{x}{\Delta h2} \qquad \text{Eq. 9}$$

Igualando a Eq. 8 a Eq. 9 têm-se $\frac{x}{\Delta h2} = \frac{x}{\Delta h1} \rightarrow \Delta h2 = \Delta h1$

No apalpador interior, ou seja, no apalpador que se encontra mais próxima da zona não utilizável, os pontos de contacto A e B têm que ter uma distância que garanta um contacto com a chapa quinada fora da zona deformada plasticamente. Assim, tendo por base o limite definido para a zona não utilizável, a distância L_1 é igual a 20mm para o aplapador interior.

Por outro lado para o apalpador exterior a distância L_2 será definido de modo a que os pontos de contacto se encontrem suficientemente afastados dos anteriores, aumentando assim a resolução do sistema. Contudo L_2 não pode ser muito elevado, pois o aumento desta dimensão obriga a que aba da chapa também aumente para que a medição seja realizável. Para além, desta razão o aumento da dimensão L_2 aumenta o volume ocupado principalmente na direção vertical, pois o aumento desta dimensão resulta num aumento do curso que este apalpador tem que percorrer. Pelas razões apresentadas anteriormente a dimensão L_2 foi definida como 25 mm.

O conjunto dos dois apalpadores tem de ser inserido numa espessura inferior ao limite de espaçamento entre as duas matrizes, levando a que a espessura de cada apalpador deva ser no máximo igual a 2,5 mm. Por outro lado, tendo em conta a importância de uma espessura que permita suportar os esforços de contacto a que os apalpadores vão estar sujeitos, bem como a facilitar os processos de maquinagem que lhe darão forma, definiu-se uma espessura de 2 mm para cada apalpador.

Qualidade de Medição

A resolução mínima exigida ao transdutor é calculada para a pior situação, ou seja, quando o deslocamento do transdutor é mínimo. O valor do deslocamento vertical é mínimo para ângulos elevados tendo-se definido um ângulo máximo 154º, ou seja, 10 % acima do limite máximo (140º) estabelecido para a gama de medição. Ao ângulo de 154º, corresponde uma distância de 1,154 mm.

Em relação à exatidão da medida, esta será a que corresponde ao deslocamento vertical que gera uma variação do ângulo de ±30' (Figura 3.7).

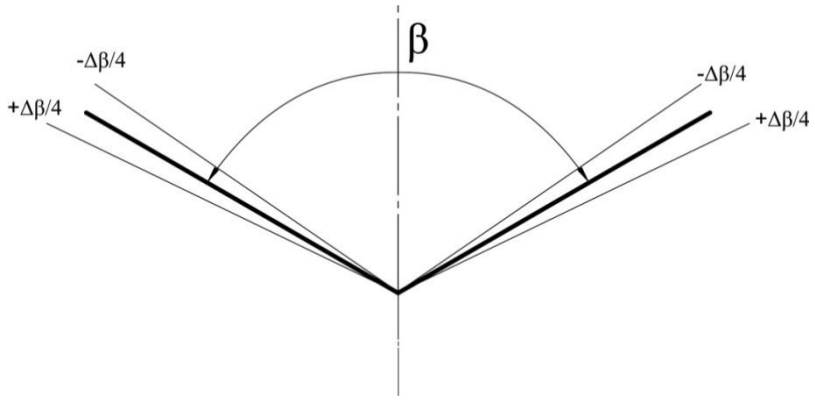


Figura 3.7 – Representação do intervalo de erro

Assumiu-se que o erro é igual em ambas as abas da chapa e ainda que o intervalo é simétrico em relação ao ângulo teórico, ou seja, em cada aba o ângulo variará entre ±15' do ideal. Nestas condições a variação da posição diferencial (Δh) na direção vertical é de 0.0218 mm pelo que o transdutor terá que possuir uma exatidão superior a este valor.

Guiamento Vertical

Para que o conjunto tenha um movimento unicamente na direção vertical é necessário um guiamento nesta direção. O problema é onde montar o guiamento, uma vez que dentro do espaçamento das matrizes os apalpadores ocupam grande parte do espaço disponível.

De forma a colocar o guiamento fora da zona de contacto, os apalpadores têm que se estender para fora da matriz. Uma possibilidade seria os apalpadores assumirem uma forma idêntica à representada na Figura 3.8.

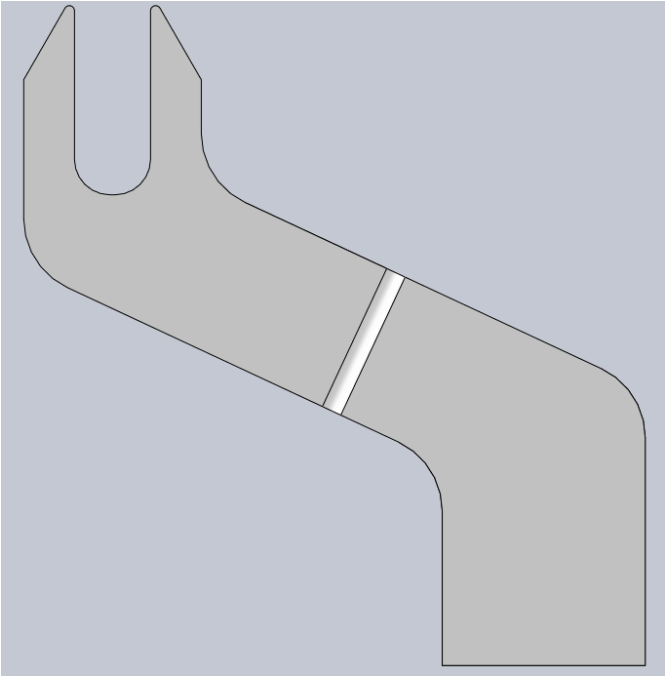


Figura 3.8 – Forma final dos apalpadores da solução 1

É de notar que fora da matriz a espessura do apalpador já não se encontra restrita às condições anteriores, podendo ser maior com o intuito de aumentar a rigidez da solução.

Estender os apalpadores conduz a um desalinhamento entre as forças que se exercem sobre as chapas: forças de contacto com a chapa e forças das molas sobre os apalpadores. Por este fato o guiamento deverá prever a existência de forças na direção horizontal.

Vantagens

As vantagens da solução nº 1 são:

- ocupação reduzida da área de trabalho;
- a medição é realizada com contacto permanente entre o sistema e a chapa, logo as medições podem ser feitas durante todo o ciclo de quinagem;
- medição realizada com aba visível reduzida quando comparada com alguns sistemas comerciais;
- transdutor com resolução infinita;
- facilidade de integração do sistema no controlador numérico, pois os transdutores disponibilizam um sinal de saída em tensão proporcional à posição;
- o sistema pode ser utilizado numa matriz convencional;
- a utilização apenas de um transdutor reduz o custo total do sistema;
- a solução apresenta uma estimativa de custo relativamente reduzido (inferior a 1000€);
- existe a possibilidade de se usar mais do que um sistema ao longo do comprimento da quinadora com intuito de medir o ângulo em vários pontos ao longo da chapa.

Desvantagens

Seguidamente são descritas as principais desvantagens do sistema proposto:

- os apalpadores requerem uma qualidade de maquinagem muito elevada uma vez que é a sua forma que define o ângulo de quinagem;

- o sistema mede muito próximo da zona não utilizável podendo assim o ângulo medido não corresponder ao existente na zona da aba mais afastada desta zona;
- o desalinhamento das forças de contacto com as forças da ação das molas aumenta quer o desgaste da ferramenta, quer o erro na medição;
- o sistema requer uma resolução na medida de distância muito elevada, melhor do que 21.8 µm;
- o fato de os apalpadores deslizarem requer cuidados na diminuição do atrito entre as duas chapas, uma vez que o atrito pode aumentar o erro na medição do ângulo;
- o movimento relativo das duas peças possivelmente aumenta o desgaste das mesmas;
- o espaço utilizado pelas duas peças elimina a possibilidade de um sistema de guiamento na zona de contacto destas com a chapa.

Solução 2A – Medição com Dois Pontos de Contacto (medição independente)

A utilização do espaço criado pela segmentação da matriz conduz a uma solução que necessita de guiamento entre as pontas de prova e os elementos sensores, como apresentado na solução 1. Pensando na inexistência de qualquer guiamento intermédio entre os elementos, nasceu uma nova solução.

Esta solução tem como princípio a medição do ângulo de quinagem através do contacto directo entre a ponta de um transdutor linear e a chapa. Necessitando para o efeito de dois transdutores em que a sua posição relativa se encontra muito bem definida permitindo assim o cálculo da diferença entre ambos.

Os transdutores são colocados inclinados relativamente à horizontal para que o espaço necessário seja o mais reduzido possível e também para que o contacto do sensor com a chapa seja o mais próximo da perpendicular possível. Na Figura 3.9 encontra-se representada esquematicamente a solução 2.

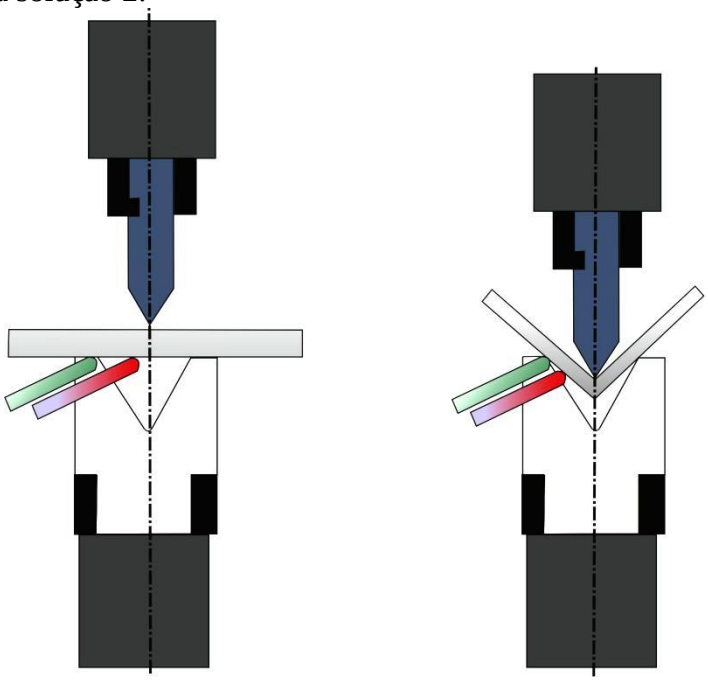


Figura 3.9 – Vista em corte da solução 2

Cálculo do Ângulo

A medição do ângulo de quinagem neste tipo de solução é feita através da diferença do deslocamento linear dos dois sensores mas, contrariamente à solução 1, a medição não é realizada segundo uma direção paralela ao eixo de quinagem. Logo é necessário que para o cálculo do ângulo se contabilize a inclinação dos sensores com a direção vertical. Com base na figura esquemática seguinte é possível escrever a equação Eq. 10 que relaciona as variáveis consideradas no cálculo do ângulo de quinagem.

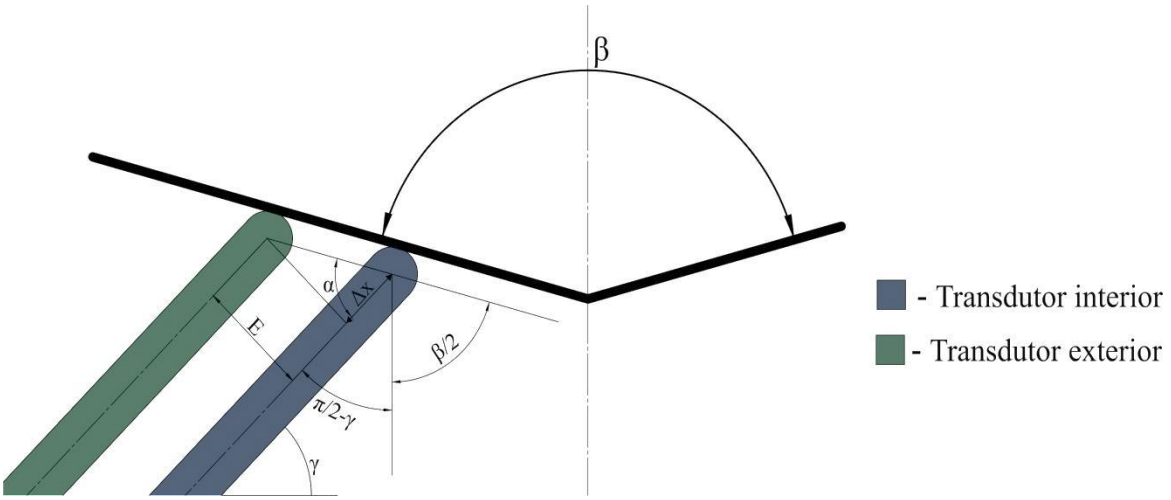


Figura 3.10 – Cálculo do ângulo de quinagem com transdutores inclinados

$$\beta(\Delta X)\begin{cases} 2(\pi-\tan^{-1}(\frac{E}{\Delta X})-\gamma) & \text{se } \Delta X>0 \\ 2(\pi-\tan^{-1}(\frac{E}{\Delta X})-\gamma)-\pi & \text{se } \Delta X<0 \\ 2\gamma \quad \text{se } \Delta X=0 & \end{cases} \qquad \text{Eq. 10}$$

Sendo ΔX a diferença entre o sensor interior e exterior

Determinação do Espaçamento

É necessário definir o espaçamento entre os dois transdutores de deslocamento e, tal como no caso anterior, propõe-se a utilização de um LVDT, com a haste acionada por uma mola de modo a manter o contacto com a chapa.

O espaçamento mínimo dos dois transdutores (interior e exterior, Figura 3.10) é definido pelo diâmetro de um LVDT, uma vez que os transdutores são colocados paralelamente. Partindo de um valor típico do diâmetro de um LVDT com uma gama de ±25mm define-se o espaçamento mínimo igual a 20 mm.

Inclinação dos Transdutores

O ângulo que o sistema faz com a horizontal (γ) foi escolhido com o intuito de permitir que os sensores tenham um contacto com a chapa segundo uma direção o mais perpendicular possível à linha de contacto com a chapa de modo a ter-se um contacto mais estável com a chapa.

Sabendo que o ângulo de quinagem mais realizado é de 90º, foi escolhido para γ um ângulo de 45º, o que leva a que os transdutores e a chapa estejam perpendiculares. Sabendo no entanto que para ângulos diferentes de 90º o sistema não se encontra perpendicular à chapa.

Qualidade de Medição

Tal como no caso anterior é necessário determinar qual a mínima resolução requerida pelo sistema. Assumindo as condições iguais à solução 1, pode-se calcular qual o deslocamento, segundo a direção dos transdutores que corresponde à exatidão requerida pelo sistema, 87.2 µm.

Solução 2B – Medição com Contacto de Dois Pontos (medição diferencial)

A solução 2A utiliza dois transdutores para que os dois pontos de contacto tenham uma posição mais exata e independente. No entanto o valor utilizado para o cálculo do ângulo de quinagem corresponde à diferença da posição (i.e. posição relativa) dos transdutores.

Visto que é apenas necessária a medição diferencial entre os pontos de contacto para o cálculo do ângulo, foi estudada a possibilidade de substituir um dos transdutores por uma haste móvel. A medida obtida pelo segundo transdutor (o que se mantém) corresponde à diferença da posição dos dois pontos de contacto.

A substituição de um dos transdutores pela haste rígida acarreta um problema: garantir o posicionamento da haste em relação ao transdutor.

Com o intuito de redução do custo do sistema, e possivelmente do peso da solução, foi decidido substituir um dos LVDTs por uma haste rígida que permita associar a leitura do deslocamento do transdutor ao deslocamento relativo dos dois pontos de contacto com a chapa. Uma das extremidades da peça estará em contacto com a chapa e a outra extremidade deslocar-se-á com o corpo do transdutor.

A decisão mais importante é determinar qual dos transdutores deve ser substituído por uma peça rígida. Por um lado mantendo o LVDT interior este fica mais protegido de "agressões" do meio exterior, quer sejam por choque com elementos externos, quer por contacto com os óleos existentes no meio industrial. Por outro lado, a colocação da peça rígida na posição inferior diminui o curso das massas que lhe estão solidárias (corpo do transdutor, conjunto de fixação do corpo do transdutor à haste) e também diminui a deformação elástica da chapa no ponto de contacto. Esta atenuação acontece porque a força transmitida pela haste é aplicada num local onde a chapa possui maior rigidez (junto ao eixo de quinagem).

A Figura 3.11 pretende esquematizar o funcionamento da solução proposta, a cor verde corresponde à haste móvel, à qual está associado o movimento 1 (Mov 1) e consequentemente ao deslocamento do corpo do transdutor. O movimento 2 (Mov 2) está associado ao movimento do núcleo do transdutor, este deslocamento corresponde à diferença de posição dos dois pontos de contacto.

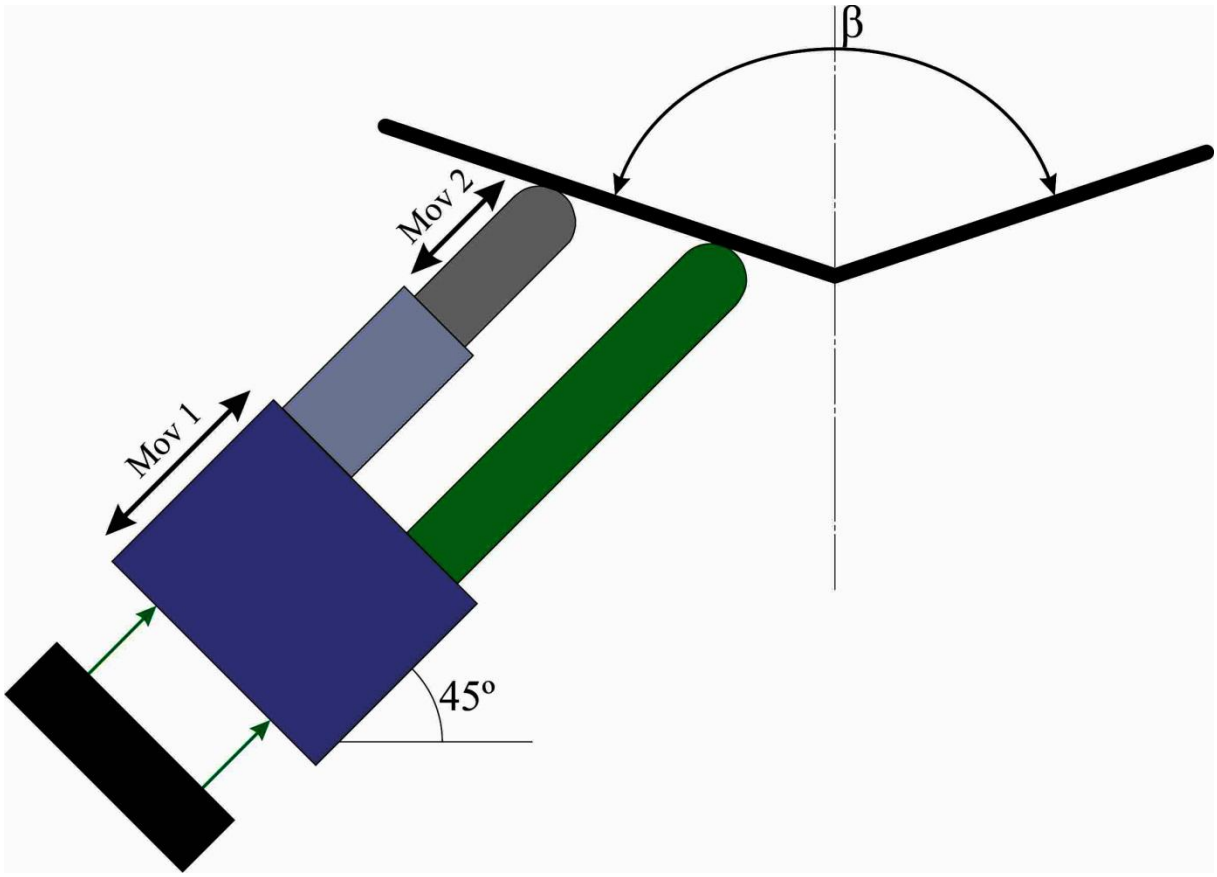


Figura 3.11 – Esquema da solução proposta

Determinada a localização da haste, é necessário definir a sua forma, dimensões e por fim o tipo de material.

Com o intento de facilitar o processo de fabrico da haste optou-se por uma haste de seção cilíndrica. O espaço criado pela separação das matrizes, onde se terá de movimentar a haste cilíndrica limita a dimensão a um diâmetro de 5 mm. De forma a garantir uma folga adequada entre a haste e as faces das matrizes definiu-se um diâmetro de 4 mm.

O diâmetro da haste só se encontra limitado a 5 mm dentro do espaço entre as matrizes pelo que se optou por aumentar a rigidez da peça definindo um diâmetro maior (Ø8 mm) na seção que fica exterior ao espaço entre as matrizes.

A determinação do comprimento da haste na menor seção recta (Ø4 mm) é influenciada pela máxima largura da matriz utilizada. Este valor foi apresentado na definição dos requisitos e corresponde a 60 mm. Para o cálculo foi assumido que a posição limite da extremidade da haste era definida pelo eixo de quinagem e a face superior da matriz (Figura 3.12). Através da relação geométrica entre a inclinação da haste e a largura da matriz o comprimento mínimo da haste, na seção de menor diâmetro, seria igual a 42 mm.

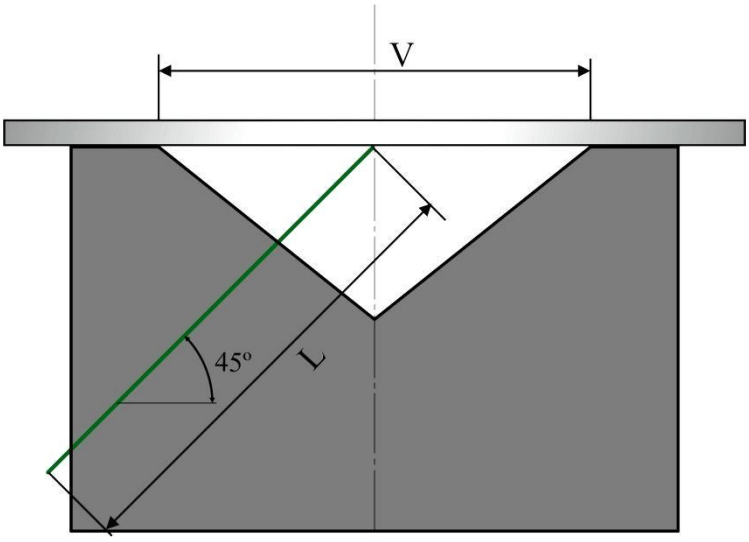


Figura 3.12 – Representação do comprimento da haste rígida

Pensando na possibilidade do sistema ser utilizado em matrizes com maior dimensão o comprimento da haste (na seção de Ø4 mm) foi alterado para os 73 mm, contemplando assim a possibilidade de ser usada uma matriz com uma largura até 100 mm (Anexo A).

Esta haste irá apenas garantir que a medição obtida pelo transdutor é relativa à posição do transdutor em relação à própria haste, logo o seu comprimento total não está sujeito a mais nenhuma condição particular.

Cálculo do Ângulo de Quinagem

Na posição horizontal o valor da diferença de posição do transdutor da haste rígida é nulo por definição, consequentemente qualquer deslocamento, d_i, que o transdutor indique deve ser contabilizado como offset no cálculo do ângulo de quinagem (Figura 3.13).

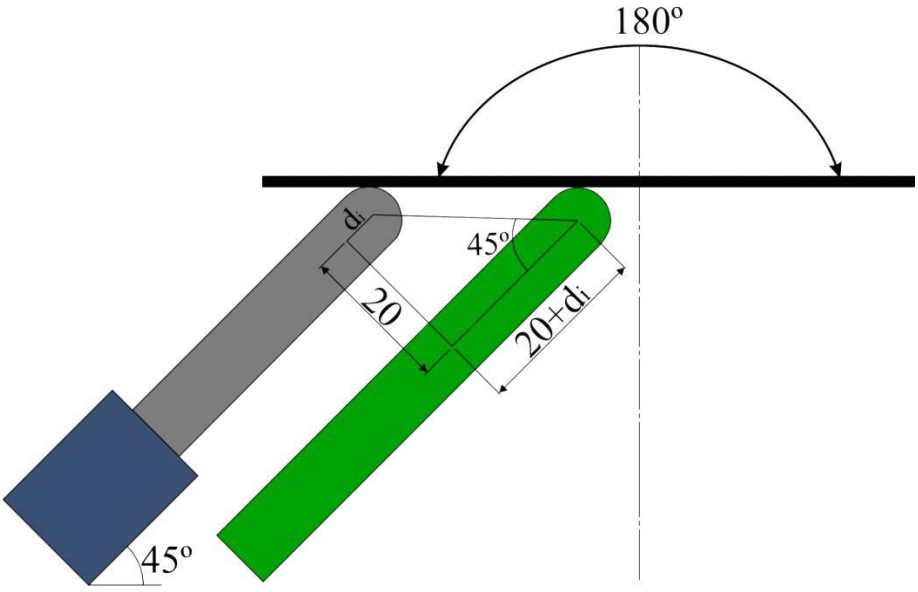


Figura 3.13 – Deslocamento inicial, correspondente ao ângulo de 180º

Na figura seguinte encontram-se representadas as variáveis definidas para o cálculo do ângulo de quinagem com apenas um transdutor (Eq. 11 e Eq. 12).

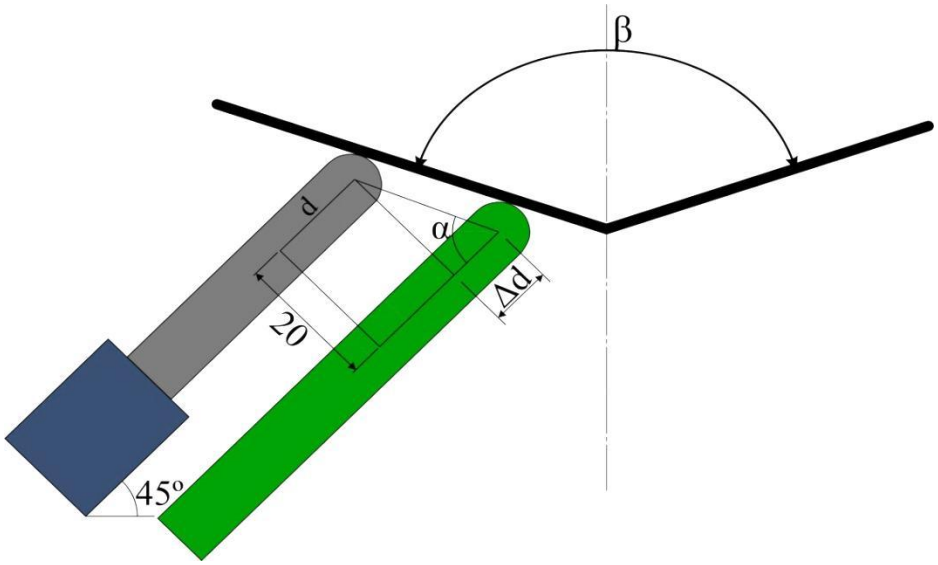


Figura 3.14 – Relação do deslocamento do transdutor com ângulo de quinagem

$$\beta(\Delta d)\begin{cases} 2(\pi - \tan^{-1}(\frac{20}{\Delta d}) - \frac{\pi}{4}) & \text{se } \Delta d < 20 \\ 2(\pi - \tan^{-1}(\frac{20}{\Delta d}) - \frac{\pi}{4}) - \pi & \text{se } \Delta d > 20 \\ \frac{\pi}{2} & \text{se } \Delta d = 0 \end{cases} \qquad \text{Eq. 11}$$

$$\Delta d = 20 + d_i - d \qquad \text{Eq. 12}$$

d – valor de deslocamento do transdutor

Vantagens

As vantagens das soluções 2A e 2B são as seguintes:

- a não existência de qualquer tipo de sistema intermédio entre os transdutores e a chapa potencialmente reduz o erro na medição;
- facilidade de integração do sistema no controlador numérico pois os transdutores possuem uma saída em tensão proporcional à posição;
- resolução infinita dos transdutores utilizados;
- estando os transdutores inclinados libertam a área de trabalho;
- a inclinação dada aos transdutores potencia a medição de chapas com múltiplas quinagens;
- contacto permanente entre chapa e transdutores (peça móvel no caso de 2B);
- a exatidão requerida pelo sistema na medição de deslocamento, é relativamente baixa;
- a solução 2B permite a redução do custo da solução devido à eliminação de um dos transdutores;
- sistema de medição não é um componente da matriz utilizada.

Desvantagens

As principais desvantagens da solução 2A e 2B são:

- caso o contacto com a chapa dos transdutores não seja perpendicular os mesmos podem ser sujeitos a momentos fletores, que aumentam o desgaste dos transdutores e potencialmente aumentam o erro na medição;
- o sistema não é capaz detetar furos na chapa;
- a medição é apenas realizada numa das abas da chapa, caso a quinagem não seja simétrica o ângulo obtido não tem qualquer utilidade;
- o sistema necessita de ser replicado ao longo do comprimento da quinadora para que possam ser compensadas as variações ao longo desta direção;

Solução 3 – Medição sem Contacto por Intermédio de Transdutores Óticos

A última solução utiliza o mesmo princípio de funcionamento da solução 2, mas em que os transdutores do tipo LVDT são substituídos por transdutores óticos. Logo a medição será realizada sem contacto entre os transdutores e a chapa.

O sistema utiliza igualmente o espaçamento entre duas matrizes segmentadas, mas uma vez que o sensor não necessita de entrar em contacto com a chapa, este espaço pode ser muito mais reduzido. Usando um transdutor LH-80 (*www.bannerengineering.com*), à distância de referência de 80 mm, o diâmetro do feixe é de 125 µm. Este valor aumenta para distâncias superiores à referência para o qual é determinado, pelo que se definiu um espaçamento mínimo de 1mm entre as duas matrizes, garantindo assim que não existe interferência entre o feixe e a matriz. A exatidão do sistema deve ser superior a 87.2 µm, tal como no caso anterior, uma vez que a distância entre os dois sensores é a mesma (20 mm).

Os movimentos e forças numa operação de quinagem provocam vibrações que são transmitidas à máquina e que devem ser tidas em consideração na escolha destes sensores. Um transdutor capaz de suportar este tipo de solicitações, é por exemplo o L-GAGE® LH da BANNER (Figura 3.15).

Figura 3.15 – Transdutor da série L-GAGE ® LH [24]

Vantagens

As principais vantagens desta solução são:

- não existir contacto físico com a chapa, evitando possíveis deformações da chapa;
- os transdutores terem uma resolução muito elevada (4 µm);
- o sistema completo tem um atravancamento menor;

- o espaçamento necessário entre as duas matrizes é muito reduzido;
- sistema de medição independente do tipo de matriz.

Desvantagens

O sistema, mesmo possuindo várias vantagens, acarreta algumas desvantagens que podem afectar a escolha deste tipo de solução, assim como:

- custo dos sensores é muito elevado (ex. 3900 €);
- qualquer tipo de irregularidade (óleo, marcas, riscos) na chapa afecta a qualidade da medida obtida;
- o sistema não detecta a presença de furos na chapa a ser quinada.

3.4 Análise Comparativa das Soluções

Seguidamente é apresentado na Tabela 3.2 um resumo das soluções propostas e das suas vantagens/desvantagens

Tabela 3.2 – Resumo das soluções propostas

Solução	Número de sensores	Custo[3]	Vantagens	Desvantagens
1 – Deslocamento de dois apalpadores	1	Baixo	Aba visível reduzida	Qualidade de fabrico muito elevada
			Fácil integração no controlador da quinadora	Desalinhamento de forças aumenta o desgaste dos apalpadores e aumenta o erro de medição
			Resolução infinita dos transdutores	
2A – Medição independente	2	Médio	Inexistência de sistemas intermédios entre transdutores e chapa	Possível deformação elástica da chapa na zona de contacto
			Fácil remoção do sistema da área de trabalho	
2B – Medição diferencial	1	Baixo	Resolução infinita dos transdutores	Possibilidade de deslocamento segundo direção transversal ao transdutor aumentando o desgaste do mesmo
			Fácil integração no controlador da quinadora	
3 – Transdutores óticos	2	Elevado	Muito boa resolução	Muito sensível a irregularidades na superfície da chapa
			Transdutores fora da zona de trabalho	
			Espaçamento entre matrizes reduzido	Sensível ao choque e vibrações
			Inexistência de partes móveis reduz o desgaste	

A solução 3 mesmo apresentando inúmeras vantagens não cumpre um dos principais requisitos apresentados, i.e. o custo. O orçamento apenas dos transdutores e do material que se encontra associado representa um custo aproximado de 8300€, ou seja, um acréscimo em 66% do valor limite definido para o custo de uma nova solução. Este problema conjuntamente

[3] O custo é dado em termos relativos e contabiliza apenas o preço dos transdutores

com a sensibilidade a irregularidades na superfície da chapa levou a que esta solução fosse posta de lado.

De todas as soluções estudadas, a primeira é a que apresenta a maior exigência de exatidão na medição do deslocamento. Assim é preferível a escolha de uma das outras soluções para a medição do ângulo de quinagem. Contudo esta solução ocupa um menor volume de trabalho já que os apalpadores estão localizados no interior da matriz.

A comparação das soluções 2A e 2B permite concluir que estas são, genericamente iguais, contudo o custo da segunda é mais reduzido pois utiliza apenas um transdutor. No entanto no caso 2A a medição independente da posição dos pontos de contacto traduz-se numa medição com maior rigor e isenção de erros. A escolha final foi a solução 2B devido ao seu menor custo.

Quando comparada a solução 1 com a solução 2B torna-se evidente que a segunda é mais vantajosa essencialmente devido à menor exigência de exatidão na medição do deslocamento garantindo a mesma exatidão do ângulo de quinagem. As duas soluções apresentam um custo semelhante pois utilizam ambas apenas um transdutor de deslocamento.

Em suma a solução 2B apresenta a maior viabilidade para definição de um protótipo com base nos requisitos apresentados no início do capítulo.

3.5 Conclusões

No final deste capítulo é possível afirmar que uma nova solução para o problema da medição do ângulo de quinagem necessita de cumprir inúmeros requisitos e está sujeita a condicionantes que eliminam logo à partida algumas soluções.

O principal requisito que o sistema está sujeito é o custo, inferior a 5000 €, pois irá limitar logo à partida a escolha dos transdutores a utilizar. Outro importante requisito encontra-se relacionado com a exatidão que o sistema de medição deve satisfazer na medida do ângulo de quinagem (mínimo ±0.5º).

A facilidade de montagem e de utilização (programação) é também de grande importância e deve ser satisfeita pelo novo sistema.

Estando o sistema de medição associado à quinadora é importante que este possa ser ligado ao controlador da máquina, tornando o controlo da operação de quinagem num controlo fechado. Contrariamente à solução tradicional, ou seja, possibilitando a correção do ângulo de quinagem em tempo real (durante o ciclo de quinagem).

Para além dos requisitos exigidos o sistema de medição do ângulo de quinagem encontra-se sujeito a várias condições, incluindo a existência de uma zona onde o sistema não pode medir (zona não utilizável), a instalação do dispositivo na retaguarda da matriz (no interior da quinadora), a possibilidade da chapa poder conter múltiplas quinagens e por fim, o espaçamento máximo de duas matrizes consecutivas não ser superior a 5 mm.

Após apresentadas as três soluções propostas, estas foram analisadas e selecionada a que apresenta a maior viabilidade.

A solução escolhida utiliza para medir o ângulo de quinagem um transdutor de deslocamento e uma haste rígida colocados com uma inclinação de 45º em relação à direção vertical. Esta inclinação tem por base o conhecimento do principal ângulo de quinagem, tendo sido definido como fixo, de forma a tornar o sistema mais simples.

4 - Especificação da Solução Proposta

No seguimento do capítulo anterior e tendo por base a solução para medição do ângulo de quinagem apresentada, é realizada neste capítulo a especificação dos componentes principais e analisadas as suas principais características.

Existindo várias dimensões de matrizes optou-se por dotar o sistema da capacidade de movimentos adicionais de modo a poder adaptar-se a estas variações, o que levou à escolha dos respetivos sistemas de guiamento e de acionamento.

Por último é realizada a verificação da compatibilidade de todos os elementos através do desenho do dispositivo completo. Com base neste modelo de conjunto determinaram-se as propriedades do sistema e também os seus limites de utilização.

4.1 Escolha do LVDT

A escolha do LVDT iniciou-se pela definição da gama de medição que a função requer. Neste caso, a gama de deslocamento linear encontra-se relacionada com a gama de medição do ângulo de quinagem pretendida.

Nos requisitos do sistema é apresentada uma gama nominal, de medição de ângulo, de 30º, contudo de forma a garantir por excesso estes valores, definiu-se uma gama de ângulos de quinagem de 27º a 154º (extensão em 10 % dos valores limites).

Definida a gama de ângulos apresenta-se a relação entre o curso (C_1) do LVDT e o ângulo de quinagem (β) que permite definir a gama de medição linear do LVDT. Para definir essa relação usaram-se as seguintes variáveis adicionais:

- **T** – distância entre o ponto de contacto da chapa com a matriz e a interseção do transdutor com a face superior da matriz;
- **K** – distância entre o transdutor e a haste rígida quando a chapa se encontra na horizontal;
- **E** – espaçamento entre haste rígida e transdutor (20 mm);
- ***f*** – folga definida para garantir que a haste rígida acompanha a aba do seu lado;
- ***y*** – distância entre o ponto de contacto do transdutor com a chapa e ponto de contacto da chapa com a matriz.

Na Figura 4.1 encontra-se representada a relação entre o curso do LVDT e o ângulo de quinagem. O LVDT corresponde ao segmento cor laranja e a haste rígida ao verde.

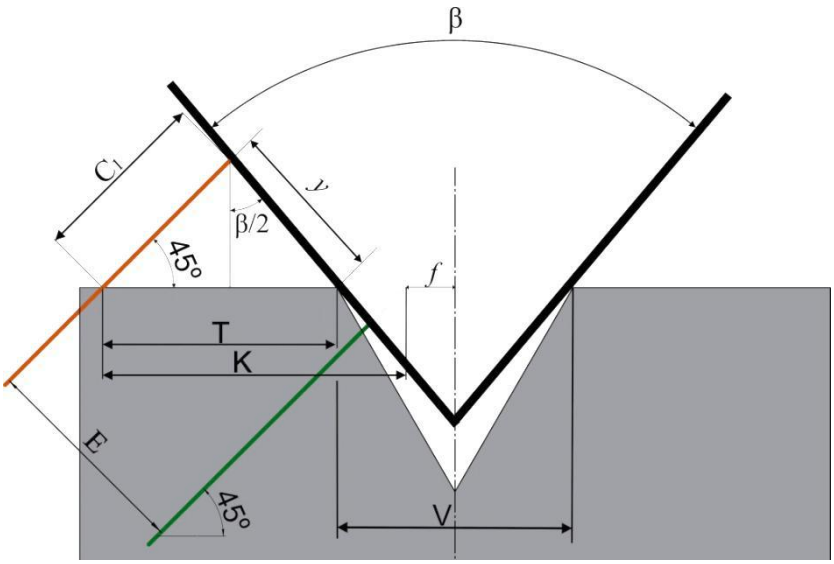


Figura 4.1 – Representação do curso do LVDT

Na análise da figura anterior é possível deduzir as seguintes equações que permitem explicitar em particular o curso do transdutor, a abertura das matrizes e o ângulo de quinagem. Desta forma é possível avaliar a gama de medição em várias situações.

$$K = \frac{E}{\cos(45)} \qquad \text{Eq. 13}$$

$$T = K - \left(\frac{V}{2} - f\right) \qquad \text{Eq. 14}$$

$$T = C_1 * \cos(45) + y * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \qquad \text{Eq. 15}$$

$$C_1 * \sin(45) = y * \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \qquad \text{Eq. 16}$$

$$C_1 = \frac{\frac{E}{\cos(45)} - (\frac{V}{2} - f)}{\cos(45) + \sin(45) * \tan(\frac{\beta}{2})} \qquad \text{Eq. 17}$$

O valor de *f* é igual a 2 mm, valor definido para garantir por um lado que a haste rígida acompanha a aba da chapa do lado correspondente à sua posição, mas também, com o intuito de promover o contacto com a chapa fora da zona não utilizável.

Na figura seguinte é possível observar a evolução do curso necessário em função da abertura da matriz para os ângulos extremos definidos (27º e 154º).

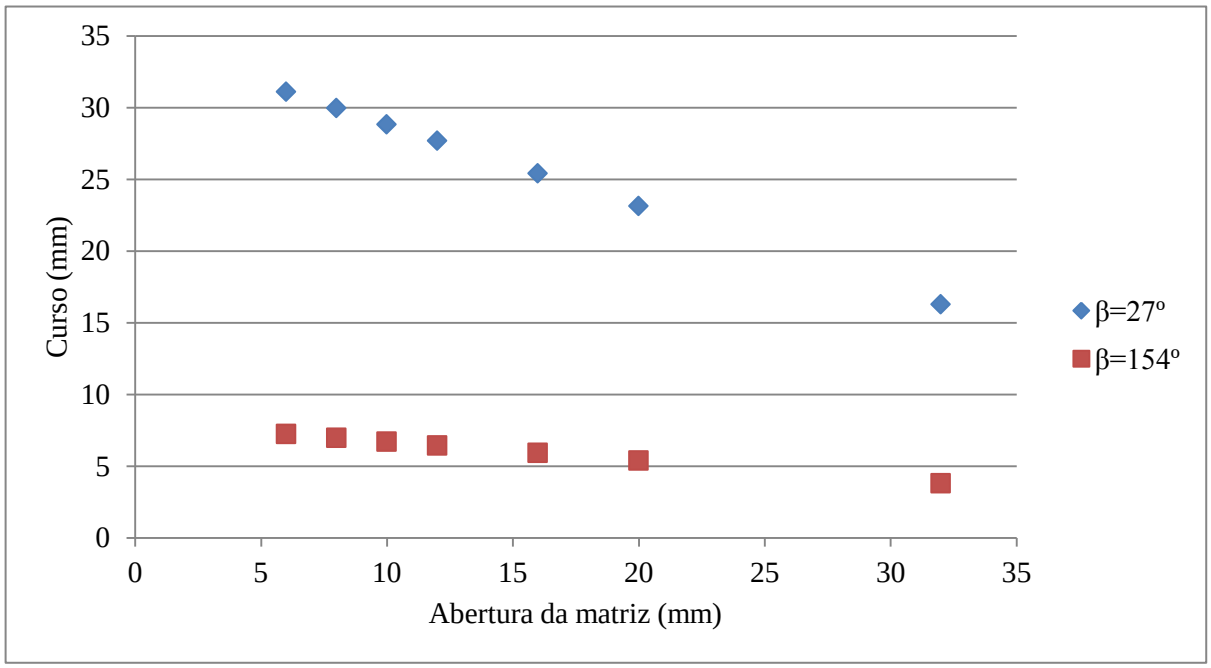


Figura 4.2 – Curso (C_1) em função da abertura da matriz (V) e do ângulo de quinagem (β) e *f* = 2 mm

A análise da Figura 4.2 permite rapidamente detetar que as matrizes com uma abertura de 6mm impõem o curso máximo do LVDT. Ao ângulo de 27º corresponde o máximo de curso necessário, 32mm.

A escolha do LVDT teve por base três critérios:

1. curso máximo não inferior a 32mm;
2. extensão da haste por ação de mola;
3. haste com diâmetro inferior a 5mm.

A menor gama de medição dos LVDTs existente no mercado que consiga realizar um curso no mínimo igual ao requerido é de ±25 mm (curso total 50 mm). Na Tabela 4.1 são apresentados os transdutores propostos para realizar a medição do ângulo de quinagem.

Tabela 4.1 – LVDT propostos

Referência	Sinal de saída	Diâmetro da haste (mm)	Fabricante
ACT1000A	AC	4.75	RDP
DCTH1000A	DC	4.75	
ACR25	AC	4	Solartron metrology
DCR25	DC	4	

Os dois transdutores da RDP têm um diâmetro de haste muito próximo dos 5 mm deixando apenas uma folga de 0.25 mm, ou seja, praticamente um décimo de milímetro para cada face da matriz. Assim foram eliminados estes dois e a escolha concentra-se apenas entre o LVDT AC e DC da companhia Solartron metrology.

Em termos de dimensões os dois LVDT's são muito semelhantes (Anexo B) consequentemente este não é um parâmetro decisivo. No entanto a fato de um deles possuir uma saída em tensão DC facilita a sua integração no controlador da máquina uma vez que não necessita de um condicionamento do seu sinal, ao contrário do modelo AC.

Além dos três critérios iniciais, o custo do transdutor é um fator muito importante na decisão de um em detrimento de outro. De uma forma geral, um LVDT AC tem um custo inferior ao de um DC, mas se ao transdutor for associado o condicionador de sinal o custo torna-se superior. Um orçamento de referência para cada solução é apresentado na seguinte tabela.

Tabela 4.2 – Orçamento da sensorização

	Transdutor AC	Condicionador de sinal	Transdutor DC
Custo unitário	485 €	459 €	642 €
Total	944 €		642 €

Finalmente o sensor escolhido quer pela sua fácil integração no controlador quer pelo menor custo foi o transdutor DCR25.

De modo a fixar o transdutor à haste rígida é necessário projetar um conjunto de ligação, tendo-se proposto usar alumínio para diminuir o peso total do dispositivo. Nos Anexos C e D encontram-se os desenhos de definição das peças do conjunto de fixação.

4.2 Guias

Plano de Movimento e Inclinação da Direção de Deslocamento

Na solução proposta, as pontas de prova (transdutor e haste rígida) ao acompanharem a chapa durante o processo de quinagem, executam um movimento no plano da seção da matriz ao longo de uma direção fixa e inclinada de 45º, em relação ao eixo vertical (ou de quinagem). Existe portanto a necessidade de garantir um movimento suave e segundo um

trajecto bem definido, uma vez que qualquer desalinhamento ou desvio ao longo do seu curso se traduz em erros de medição do ângulo de quinagem. Para que estes requisitos sejam cumpridos torna-se indispensável a utilização de guias lineares.

A guia, para além dos requisitos anteriores, deve possuir um atravancamento reduzido para que ocupe o mínimo de espaço na zona de trabalho, devendo também possuir um *carro* que permita fixar e transportar todo o conjunto.

Na escolha da guia foram analisados inúmeros modelos, tendo-se considerado que duas apresentavam maior viabilidade: uma guia linear miniatura de esferas recirculantes e respetivo *carro* (Schaeffler-INA) e outro conjunto guia/carrinho (Bosch) *miniature ball rail systems*.

Os sistemas de guiamento são equivalentes em praticamente todos os aspetos pelo que a escolha de um em relação ao outro não representa alterações significativas para o projeto. Deste modo, para continuar o projeto optou-se pelo conjunto do grupo Schaeffler.

Este tipo de guias possui uma altura bastante reduzida quando comparada com as guias tradicionais e também uma elevada exatidão. A exatidão da guia encontra-se relacionada com a classe de pré-tensionamento escolhida:

- deslizamento suave entre o carro e a guia (V0 [25]);
- elevada rigidez no deslocamento (V1).

Das duas classes existentes a ideal para a função é a V0 de modo a criar um deslocamento suave do conjunto para que a medição seja o mais estável possível.

O conjunto escolhido (guia/carrinho) tem como referência KUEM 15-W [25].

Guia vertical

O sistema de medição deve estar preparado para ser usado em matrizes com diferentes alturas, pelo que deve ter a capacidade de se posicionar entre duas posições bem definidas (correspondentes às alturas de 80 e 120mm) segundo a direção vertical.

Tal como para o movimento inclinado, é necessária a escolha de um guiamento para este movimento. Analisando-se as condicionantes deste movimento verificou-se que é possível escolher o mesmo guiamento, e deste modo facilitar a montagem da solução e uniformizar a manutenção das guias. Foi desenhada uma peça em alumínio de modo a tornar a solução o mais leve possível, para ligar o conjunto à guia, Anexo E.

O custo das guias é função do seu comprimento, o que para um curso de 100 mm significa aproximadamente 25 € e o carro 75 €.

4.3 Atuadores

O sistema de medição necessita que a haste rígida se encontre em contacto com a chapa continuamente. Inicialmente foi pensada a utilização de uma mola linear para mover o conjunto, mas esta solução apresentava alguns problemas tais como:

- a possibilidade de ajuste da força da mola ser limitada;
- necessidade de sistema auxiliar de fixação do conjunto numa das posições de trabalho;
- não permitir a realização de força nos dois sentidos de movimento (avanço e recuo).

Os problemas associados à utilização de uma mola conduziram à escolha de um acionamento alternativo. Dos acionamentos disponíveis optou-se por um cilindro pneumático, devido essencialmente às seguintes razões:

- a força do atuador ser facilmente ajustável, pelo ajuste da pressão de alimentação;
- ser um atuador relativamente barato;
- permitir a recolha do conjunto quando não utilizado;
- ser fácil a integração no controlador da máquina, utilizando válvulas de atuação elétrica

O curso da haste rígida (Mov 2, Figura 3.11) corresponde ao curso mínimo que o atuador necessita de ter, porque os elementos então ligados entre si por ligações rígidas. A metodologia para determinar o curso da haste rígida é semelhante à utilizada no cálculo do curso do transdutor. Na Figura 4.3 é apresentada a relação geométrica entre o curso da haste e a matriz (Eq. 18 a Eq. 20).

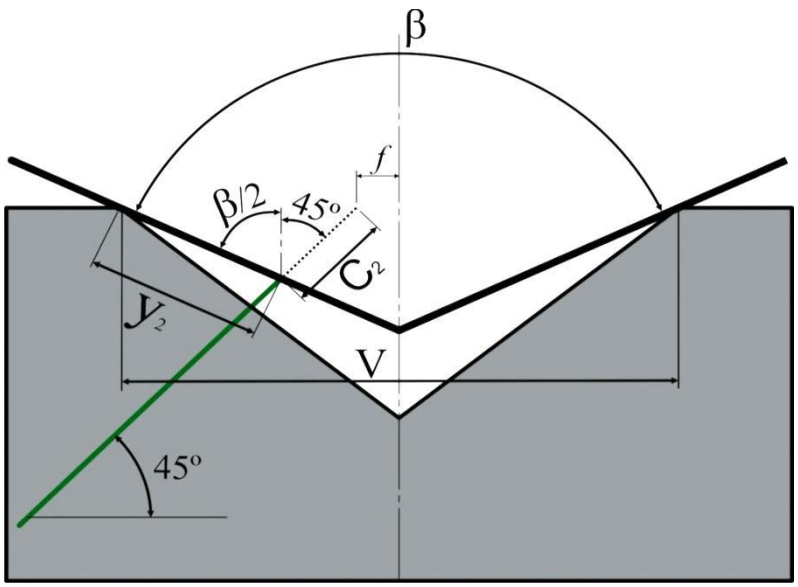


Figura 4.3 – Representação do curso da haste rígida

$$C_2 * \cos(45) = y_2 * \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \qquad \text{Eq. 18}$$

$$C_2 * \sin(45) + y_2 * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{V}{2} - f \qquad \text{Eq. 19}$$

$$C_2 = \frac{\frac{V}{2} - f}{\sin(45) + \frac{\cos(45)}{\cos(\frac{\beta}{2})}} \qquad \text{Eq. 20}$$

Ao contrário do cálculo do curso do LVDT o curso da haste é definido pela maior abertura de matriz. Assim foi utilizada uma abertura máxima (V) igual a 40 mm, capaz de exceder os limites do intervalo definido nos requisitos. O valor do curso máximo da haste rígida é igual a 20 mm (V = 40 mm; β = 27º; *f* = 2 mm).

O cilindro pneumático para movimentar o conjunto de fixação necessita cumprir os seguintes requisitos:

- o curso deve ser pelo menos igual a 20 mm, correspondente ao curso máximo da haste rígida;
- o cilindro deve ser de baixo atrito para garantir um movimento suave ao longo do curso do mesmo;
- o atravancamento dos cilindros de duplo efeito é menor que os de duplo efeito, logo o volume de trabalho ocupado é menor sendo assim preferível a escolha deste tipo de atuadores.

Propõe-se um cilindro com as seguintes dimensões:

- diâmetro de êmbolo de 8 mm;
- curso de 25 mm;
- diâmetro da haste de 4 mm.

Nota: Estas dimensões foram retiradas de um cilindro pneumático da Festo (www.festo.com) a título de exemplo.

Escolhido o cilindro é necessário determinar qual a pressão necessária para que o sistema avance até ao contacto com a chapa. No entanto a força de contacto deve ser mínima para que não deforme a chapa.

O cálculo da força de avanço (Fc) requer o conhecimento da massa (m_t) que o cilindro tem que mover, o valor da força de atrito (Fa) que existe entre o carrinho e a respetiva guia e também da força que a mola do transdutor (F_{LVDT}) possui.

O valor da massa total é estimado com base no material que é proposto utilizar para cada componente e com as massas disponibilizadas pelos fabricantes de cada componente em particular (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Massa de cada componente

Componente	Massa (g)	Ref.
Haste rígida	40	-
Conjunto de fixação	200	-
Transdutor	114	Anexo B
Carrinho	140	[25]
Massa total	494	

O coeficiente de atrito (μ), entre carrinho e guia considerado 0.002 [26].

Quanto à constante da mola do LVDT esta é de 2.34 gf/mm [Anexo B] (o LVDT no zero eléctrico possui uma força de 150 gf). Considerando que o LVDT se encontra todo recolhido e possuindo uma gama de ±25 mm, a mola exerce uma força de 2,04 N.

O diagrama de corpo livre do conjunto encontra-se representado na Figura 4.4. A Eq. 21 traduz o equilíbrio de forças na direção do movimento, a Eq. 27 o equilíbrio de forças

segundo a direção normal, as restantes equações apresentam o cálculo de cada força interveniente.

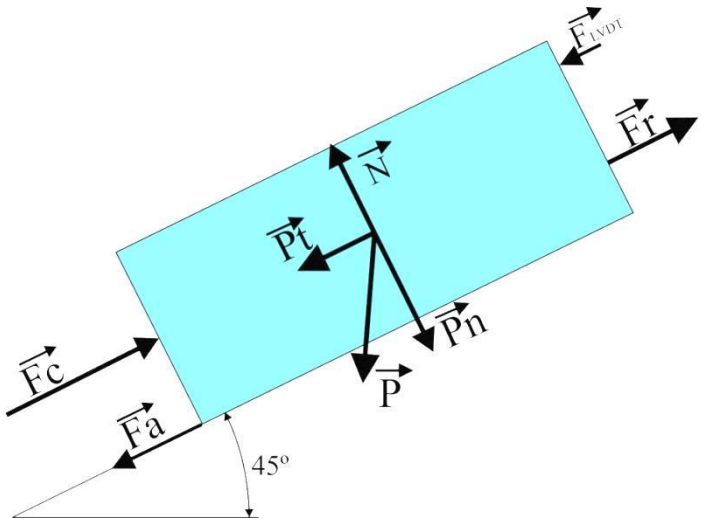


Figura 4.4 – Diagrama de corpo livre do plano inclinado (avanço)

$$Fr + Fc - Pt - Fa - F_{LVDT} = 0 \qquad \text{Eq. 21}$$

$$Fa = \mu * N \qquad \text{Eq. 22}$$

$$Fc = p * A_c \qquad \text{Eq. 23}$$

$$Ac = \pi r_c^2 \qquad \text{Eq. 24}$$

$$P = m_t * g \qquad \text{Eq. 25}$$

$$Pt = P * cos(45) \qquad \text{Eq. 26}$$

$$N = P * sin(45) \qquad \text{Eq. 27}$$

$$Fr = m_t * a \qquad \text{Eq. 28}$$

Fr - Força resultante; *Pt*- componente tangencial do peso; *N* - Esforço normal; *p* - pressão do atuador; A_c - Área do atuador; r_c -Raio do atuador; *a* - Aceleração resultante

No movimento de avanço do sistema de medição podem-se distinguir três situações distintas tendo em conta as forças de contacto do transdutor e da haste com a chapa:

- movimento inicial onde não existe contacto nem do transdutor nem da haste com a chapa;
- movimento em que existe o contacto do transdutor mas ainda não existe contacto da chapa com a haste rígida;
- encosto da haste à chapa;
- para o cálculo da força mínima necessária para mover o sistema considera-se a situação estática em que a força resultante (Fr) é nula.

Com base nos pressupostos apresentados é possível calcular a força/pressão mínima do cilindro no avanço (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Cálculo da força e correspondente pressão do atuador inclinado

	Instante	
	Inicial	Contacto
Força do cilindro (N)	3.44	4.57
Pressão de alimentação (bar)	0.68	0.91

A pressão calculada é a que garante o equilíbrio de forças, no entanto necessário garantir que o sistema quando está parado dispõe de força suficiente para iniciar o movimento assim definiu-se um acréscimo de pressão de 2/3 à pressão de alimentação, ou seja, pressão efetiva de 1.5 bar. O acréscimo de pressão conduz a uma força resultante igual a 2.93 N.

Mesmo com uma menor área no recuo, o peso do próprio sistema auxilia o movimento, deste modo não é necessário calcular o valor da pressão neste movimento (propõe-se a mesma pressão utilizada no avanço). O atuador poderia ter retorno por mola para cumprir este movimento, mas o seu atravancamento seria maior do que num cilindro de duplo efeito.

No início da operação o cilindro conduz o sistema até ao contacto com a chapa plana, assim que se inicia a operação de quinagem a peça móvel é forçada no sentido de retorno do cilindro. Logo para que a pressão na câmara seja sempre constante, assim propõe-se a utilização de uma válvula reguladora de pressão (VP1). Isto tipo de válvulas possibilitam o controlo da pressão mesmo para valores muito reduzidos (mínimo de 0.02 bar). Caso não fosse utilizada uma válvula deste tipo as forças transmitidas ao transdutor poderiam danificá-lo, ou então a chapa seria deformada.

O circuito pneumático pensado para o movimento de avanço é apresentado na seguinte figura (Figura 4.5).

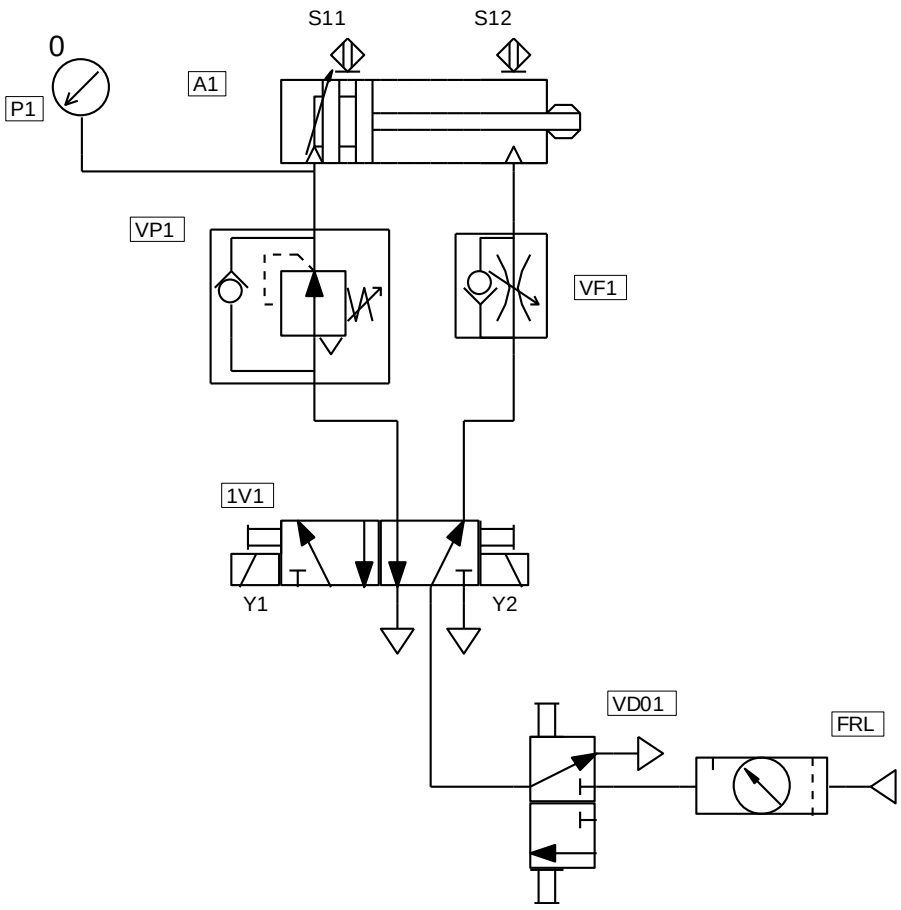


Figura 4.5 – Circuito pneumático

O cilindro avança quando o solenóide Y2 é ativado, o restritor VF1 permite a ajuste da velocidade de avanço do cilindro. O manómetro P1 facilita quer o ajuste da válvula VP1 quer para monotorização da pressão na câmara do cilindro pneumático.

O cilindro pneumático apresenta a ponta da haste roscada que é utilizada para o ligar ao conjunto de fixação, por intermédio de furo roscado presente numa das peças do conjunto.

O acionamento do sistema segundo a direção vertical é realizado por um cilindro pneumático igual ao anterior (mudando apenas o curso).

O curso deste atuador é definido pela variação da altura das matrizes, 40 mm. O cilindro tem que ser de duplo efeito para que as suas posições extremas sejam garantidas. O cilindro é da Festo e possui a referência DSNU-8-40-P (*www.festo.com*).

A metodologia utilizada no cálculo do primeiro atuador é utilizado para o cilindro vertical, deste modo apenas serão apresentados os elementos principais.

Na Tabela 4.5 são apresentadas as massas dos elementos que o atuador tem que mover e na Figura 4.6 encontra-se representado o diagrama de corpo livre.

Tabela 4.5 – Massa de componentes segundo a vertical

Componente	Massa (g)	Ref.
Conjunto inclinado	494	-
Massa da guia inclinada	471	[25]
Massa da peça de ligação	175	-
Massa do carrinho vertical	140	[25]
Massa total	1280	

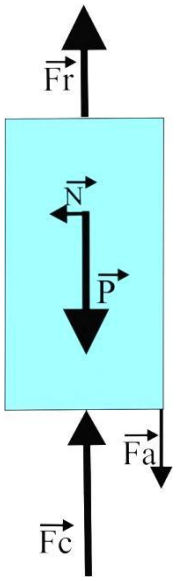


Figura 4.6 – Diagrama de corpo livre segundo a vertical (avanço)

A força mínima que o cilindro tem que realizar no avanço é de 12.6 N equivalente a uma pressão mínima de 2.5 bar. A pressão de alimentação para o movimento vertical proposta é igual a 3 bar resultando numa força de 2.4 N, esta força tem que ser suportada pelos batentes que garantem o posicionamento do sistema segundo a direção vertical.

No recuo é proposta a utilização da mesma pressão de modo a simplificar o ajuste das válvulas.

O circuito pneumático para o atuador vertical é semelhante ao apresentado no atuador anterior no entanto a válvula reguladora de pressão VP1 não necessária assim pode ser substituída por um restritor para ajuste da velocidade (Figura 4.5).

4.4 Validação da Solução

Deformação

O contacto do LVDT e da haste móvel com a chapa conduzem à deformação da mesma. Assim é necessário determinar qual a deformação expectável, para tal foi utilizado o software de elementos finitos ANSYS.

O ponto de aplicação das forças é função do ângulo de quinagem a medir e da abertura da matriz, deste modo é essencial definir quais os valores das variáveis (ângulo β e abertura

V) que vão ser analisados. Quanto aos ângulos de quinagem foram analisados os valores limites (30º e 140º) e o ângulo de 90º uma vez que é nesta situação que o contacto dos transdutores se dá segundo a perpendicular à chapa, podendo verificar-se neste caso a deformação máxima segundo o eixo do transdutor e da haste. Os valores da abertura da matriz usados para caracterizar a deformação da chapa são os seguintes (mm): V6, V10, V20 e V32.

Após definição das combinações (ângulo e abertura) é possível determinar qual a localização dos pontos de contacto em relação ao eixo de quinagem segundo a direção da aba da chapa a quinar (Figura 4.7). No Anexo F encontram-se os valores das variáveis Y_k e Y_i utilizados na determinação da deformação.

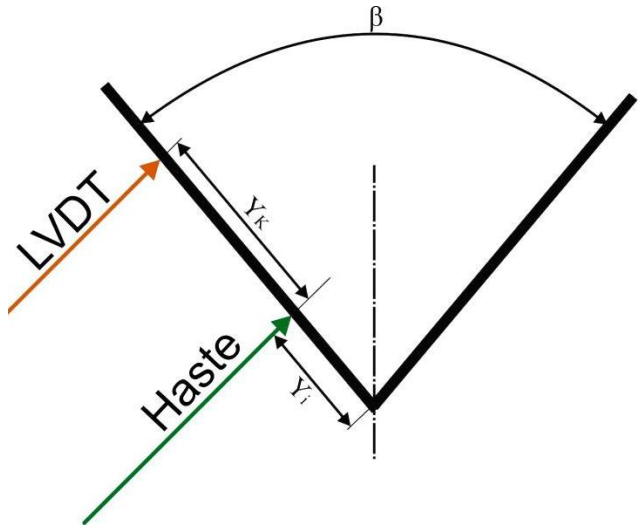


Figura 4.7 – Distâncias dos pontos de aplicação das forças sobre a chapa

A análise da deformação da chapa requer a definição de condições fronteira, ou seja, as restrições a que a chapa está sujeita. Como aproximação à situação real foi definido que a chapa possui um encastramento segundo a linha da dobra da chapa (linha de contacto com o punção, linha 3 na Figura 2.3). Esta aproximação é muito simplista uma vez que não é contabilizado o apoio da chapa sobre a matriz, o raio de curvatura do punção que apoia a chapa num área e não numa linha. Assim, pode-se afirmar que a deformação real é inferior à calculada.

Outro parâmetro igualmente importante na determinação da deformação da chapa é a espessura da mesma, uma vez que a deformação aumenta com a diminuição da espessura da chapa foi utilizado no cálculos a espessura de 0.8 mm como base para a determinação da deformação, pois esta é a menor espessura de chapa.

As dimensões da chapa modelada são de 90 mm de aba e 100 mm de comprimento, estes valores foram definidos uma vez que são valores usuais para chapas quinadas.

As forças utilizadas são de 2.08 N para o contacto do transdutor com o chapa e de 2.93 N para o contacto da haste rígida com a chapa.

Na Figura 4.8 e 4.9 são apresentadas as deformações da chapa segunda a direção da haste rígida, do transdutor respetivamente. No Anexo G encontra-se a título exemplificativo o relatório da simulação para o ângulo de 90º e V6.

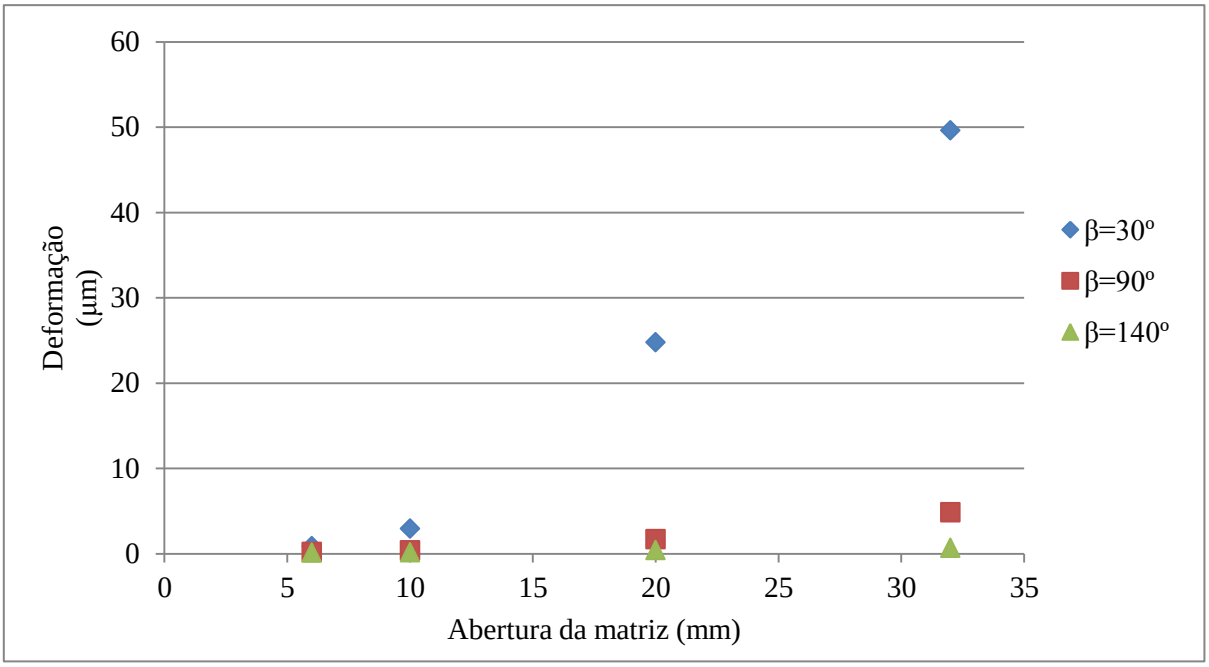


Figura 4.8 – Deformação da chapa no ponto de contacto chapa-haste rígida

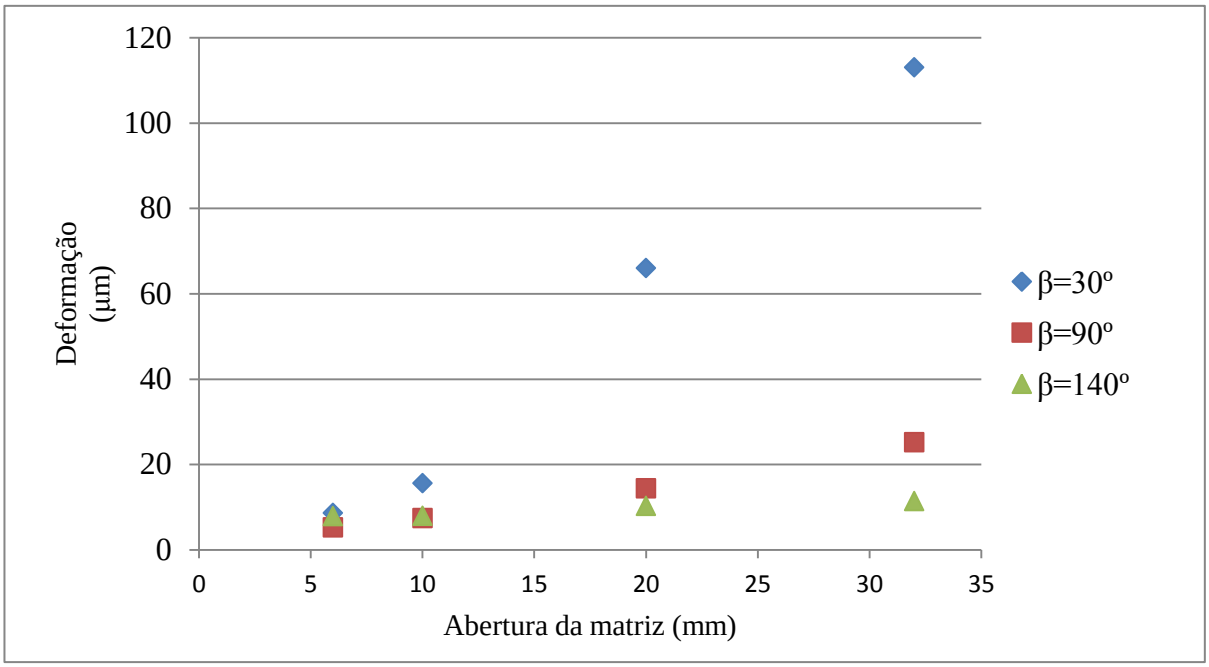


Figura 4.9 – Deformação da chapa no ponto de contacto chapa-transdutor

A análise das figuras permite concluir que a deformação da chapa pelo contacto com as pontas de prova do sistema apresenta um valor considerável, principalmente no caso do ângulo de 30º (deformação máxima 112 µm). Este valor de deformação é superior ao valor de exatidão mínima apresentada como requisito do transdutor (87 µm) assim é necessário contemplar este valor na determinação do ângulo de quinagem.

A compensação da deformação provocada pelo contacto pode ser realizada automaticamente pelo controlador da máquina, através da utilização de um modelo/função que caracterize a deformação da chapa de acordo com a quinagem que está a ser realizada.

Os cálculos foram repetidos para uma espessura de chapa superior e a partir de 1,5 mm. o valor da deformação é muito mais reduzido cerca de 50 µm para o ângulo de 30º e abertura de 30, deste modo caso não se pretenda utilizar uma função de compensação da deformação o sistema só deve ser utilizado para espessuras superiores a 1.5 mm.

Uma forma de minimizar a deformação da chapa passa pela substituição da mola do transdutor, pois é para o ponto de contacto deste elemento que se verificam os valores mais críticos de deformação da chapa.

Comportamento Dinâmico

Na análise do comportamento dinâmico do sistema é necessário considerar duas situações distintas, a primeira corresponde ao avanço de todo o dispositivo até entrar em contacto com a chapa plana, a segunda é o acompanhamento da chapa ao longo da deformação da chapa.

Analisando o primeiro caso, o sistema é constituído por dois conjuntos de massas com movimento relativo entre si, sendo uma delas a massa (m_1) da parte móvel do transdutor (haste) e outra a soma das massas (m_2) dos restantes componentes presentes no movimento inclinado. Em termos de elementos elásticos existe apenas a mola do transdutor, com a sua constante igual a 2.34 gf/mm. Não tendo dados para o amortecimento do sistema não foi considerado este parâmetro nesta aproximação. Sobre o sistema de medição é exercida uma força constante correspondente ao acionamento do cilindro no movimento de avanço de 7.54 N. A Figura 4.10 representa o modelo dinâmico do sistema de medição para a primeira situação, as equações 29 e 30 são as equações de movimento do sistema (o $Mov_1(t)$ é relativo a posição inicial da chapa).

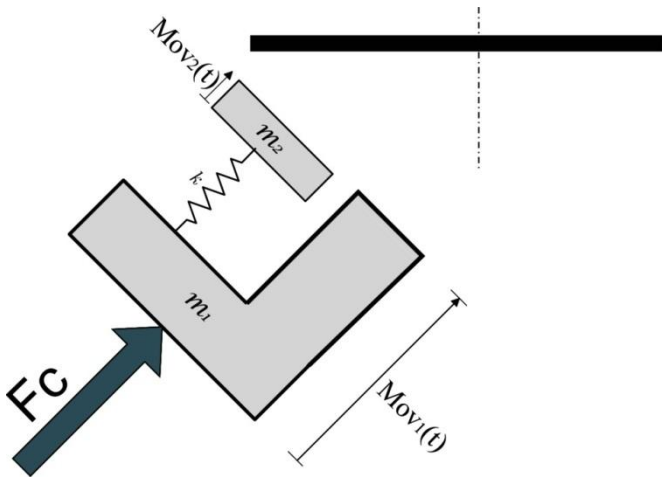


Figura 4.10 – Modelo dinâmico do caso inicial

$$\frac{d^2 Mov_1(t)}{dt^2} \cdot m_1 = -m_1 \cdot g \cdot \cos(\pi / 4) - k \cdot (Mov_1(t) - Mov_2(t)) + Fc \qquad \text{(Eq. 29)}$$

$$\frac{d^2 Mov_2(t)}{dt^2} \cdot m_2 = -m_2 \cdot g \cdot \cos(\pi / 4) - k \cdot (Mov_2(t) - Mov_1(t)) \qquad \text{(Eq. 30)}$$

O movimento de avanço encontra-se restringido pelo contacto da haste rígida com a chapa, ou seja, quando existe o equilíbrio de forças entre a chapa e a haste rígida o movimento cessa, nessa altura é possível calcular o ângulo de quinagem. Para estimar o tempo que demora a atingir um ponto de equilíbrio definiu-se que o sistema na posição inicial se encontra na posição de repouso e na final está em contacto com a chapa reta (i.e. chapa plana).

Utilizando o software Working Model 2D, foi determinado o comportamento dinâmico do sistema. Na Figura 4.11 a azul encontra-se representado o Mov1 e a preto o Mov 2.

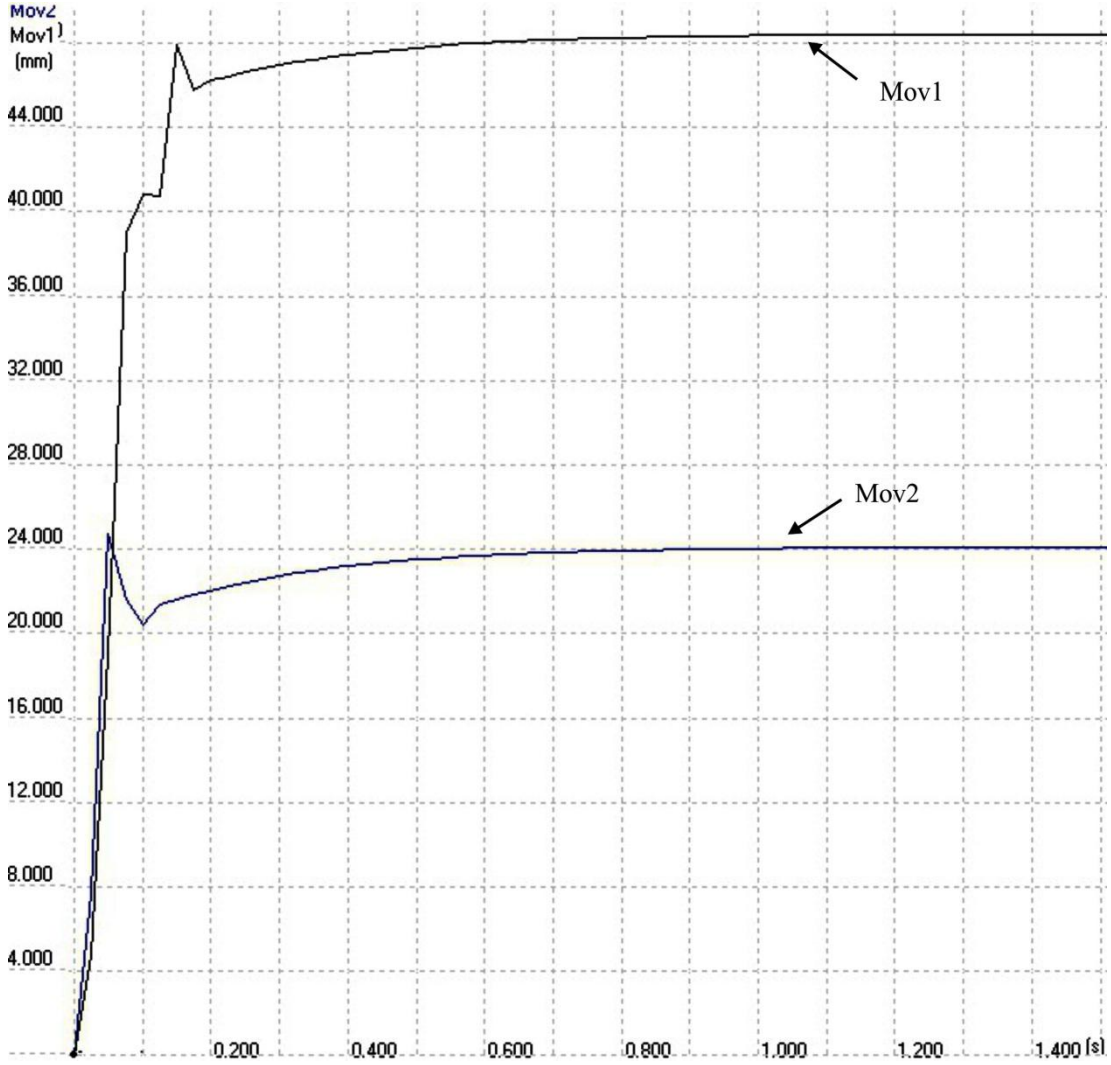


Figura 4.11 – Resposta dinâmica do sistema partindo da posição de repouso

Analisando o gráfico anterior, o sistema necessita aproximadamente de 0.3 s para atingir o equilíbrio partindo da posição de repouso.

O segundo caso é o mais importante pois caracteriza o tempo que o sistema de medição demora a acomodar a variação do ângulo de quinagem. O modelo dinâmico (Figura 4.12 e Eq. 31) neste caso é mais simples pois apenas existe uma massa em movimento, o núcleo do LVDT, e a mola do transdutor.

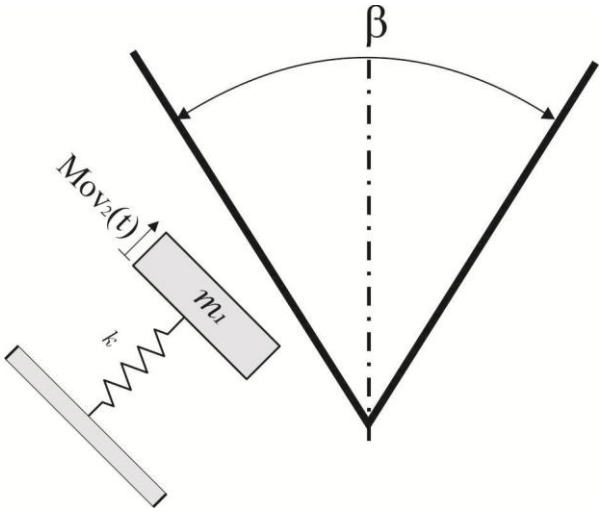


Figura 4.12 – Modelo dinâmico para o segundo caso

$$\frac{d^2 Mov_2(t)}{dt^2} \cdot m_2 = -m_2 \cdot g \cdot \cos(\pi / 4) + k \cdot Mov_2(t) \qquad \text{Eq. 31}$$

Assumindo-se que a chapa se deforma num intervalo de tempo muito curto e a situação mais desfavorável (maior curso do transdutor) corresponde a um ângulo de 30º, foi calculado o tempo de acomodação utilizando novamente o Working Model 2D (Figura 4.13)

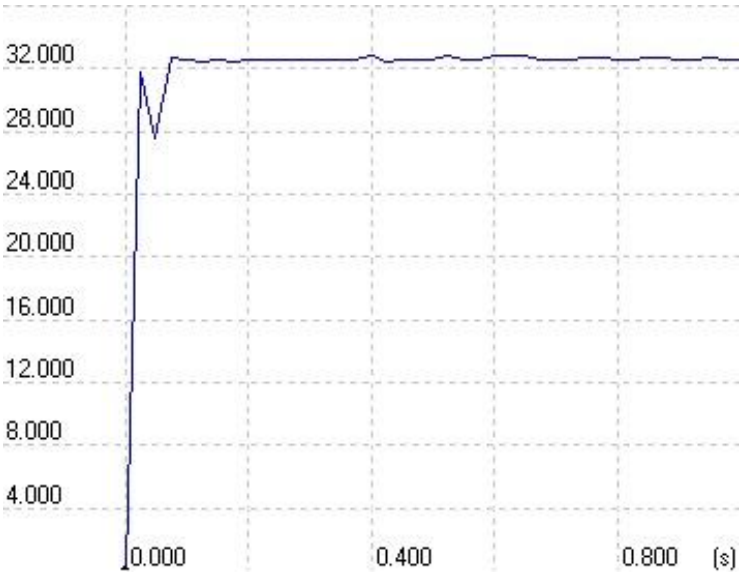


Figura 4.13 - Resposta dinâmica do sistema para o ângulo de quinagem de 30º

Analisando o gráfico é possível determinar que o tempo máximo que o sistema necessita para estabilizar, com uma variação instantânea do ângulo de quinagem, é de 100 ms.

Encurvadura

Sendo as solicitações de uma ordem de grandeza muito inferior ao limite das guias, não são apresentados estes cálculos. De igual modo os cálculos da encurvadura das hastes dos cilindros não são apresentados uma vez que a carga crítica de encurvadura é nos dois casos muito superior a solicitação.

Na Figura 4.14 é apresentada a modelação dos principais componentes da solução proposta.

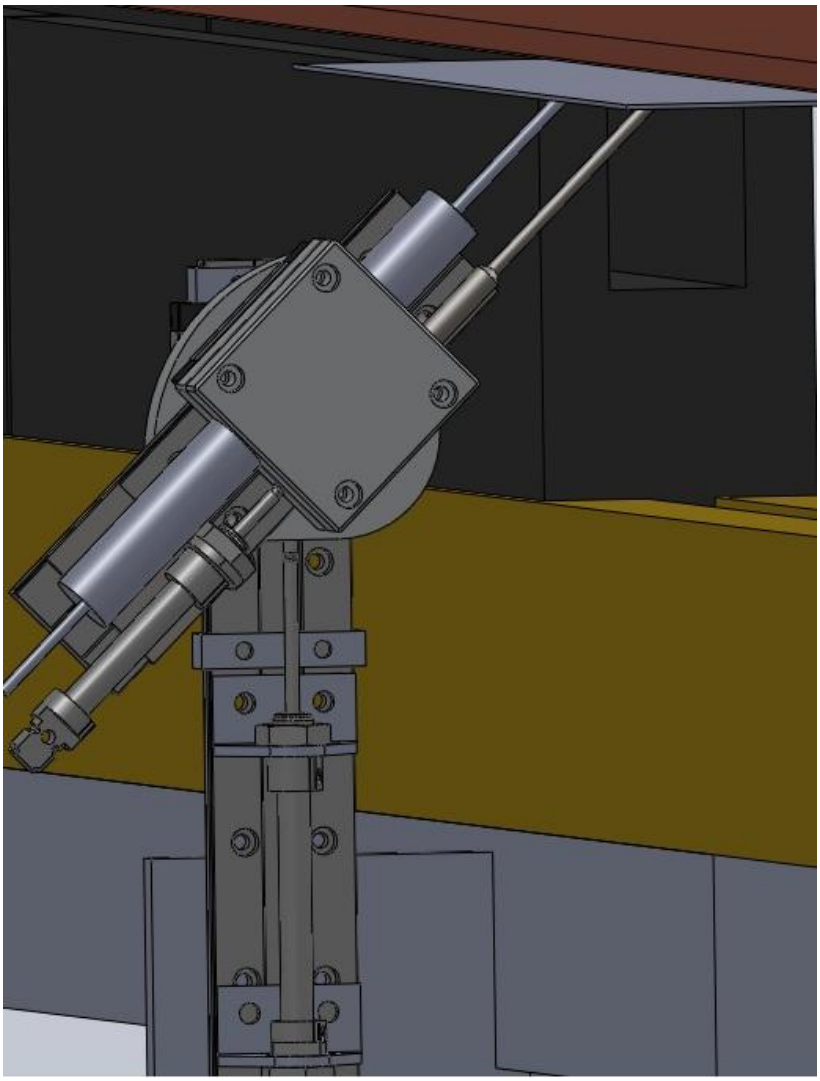


Figura 4.14 – Modelação da solução

4.5 Qualidade de Medição Prevista

A determinação da resolução do sistema requer o conhecimento da sensibilidade do transdutor escolhido, 165 mV/V/mm. Quando o transdutor possuir um deslocamento de ±25 mm na saída será possível medir, respetivamente, ±4.125 V (considerando a alimentação de -5 V a 5 V). Admitindo um conversor A/D de 12 bits, ou seja, 4096 combinações, o que conduz a uma resolução na medição da tensão igual a 2.44 mV. A este valor de tensão corresponde um deslocamento de 0.014 mm, ou seja, a menor distância observável na saída do transdutor é de 14 µm.

Seguindo o caminho inverso ao utilizado no capítulo anterior, é possível com a resolução expectável do transdutor determinar qual a resolução que é prevista para a medição do ângulo de quinagem. A resolução prevista da solução é igual a 0.04º, o que poderá conduzir a uma exatidão igual ou melhor que a dos sistemas existentes.

4.6 Limites da Solução

Gama de Medição

A gama de medição encontra-se limitada por dois elementos, o curso do transdutor e o curso do cilindro que atua o conjunto transdutor e haste rígida. Deste modo é necessário combinar a gama que cada elemento tem com a gama que é realmente conseguida. A gama de medição real é a interseção das duas gamas.

A gama de medição angular do transdutor é calculada utilizando as equações relativas ao cálculo do curso mínimo exigido (Eq. 13 a 17). Teoricamente o curso do transdutor possibilita a medição desde a posição horizontal da chapa (180º) até, no limite, um ângulo entre as abas de 0º (valor sem significado no processo de quinagem).

Quanto à gama de medição angular teórica da haste rígida esta utiliza para o cálculo o curso máximo do atuador (25 mm) e as equações definidas no cálculo do curso máximo da haste rígida (Eq. 18 a 20). O limite deste elemento é o mais crítico uma vez que permite a medição apenas na gama de 2º a 180º.

Tendo em conta que o menor ângulo que tem interesse medir numa operação de quinagem é de 30º a gama de medição real é de 30º a 180º, sabendo porém que o sistema permitiria medir ângulos mais agudos.

Gama de Matrizes

A solução apresentada restringe-se à utilização de matrizes com uma altura de 80 ou 120 mm, estando limitada pelo curso do atuador escolhido para o movimento vertical. No entanto caso seja pretendido medir ângulos de quinagem em matrizes com outras dimensões, é apenas necessário mudar o curso do atuador.

Em última análise o sistema para se adaptar a uma infinidade de alturas de matrizes necessita de um atuador que permita o respetivo posicionamento vertical, assim será necessário definir posições intermédias para o atuador e não apenas posições extremas, tal como acontece num cilindro pneumático.

O sistema encontra-se limitado a matrizes com uma largura máxima de 100 mm, este valor é definido pelo comprimento da haste rígida com uma seção igual a Ø4 mm.

Tempo de Medição

O tempo de medição engloba a constante de tempo do transdutor (o tempo que este demora a obter na saída o sinal de tensão correspondente à medição), o tempo que é necessário para realizar a conversão A/D, o cálculo do ângulo de quinagem propriamente dito e a dinâmica do sistema.

A constante de tempo do transdutor é retirada do Anexo B e é igual a 0,4 ms. O tempo, estimado, da conversão e do cálculo do ângulo de quinagem é de 6 ms. Este último é um valor usual neste tipo de conversores. Somando todas as componentes tem-se o tempo de medição máximo igual a 106.4 ms.

Aba Necessária (y)

A aba necessária (*y*) foi definida aquando do cálculo do curso do LVDT (Figura 4.1). Este valor é diferente da aba visível. A solução apresentada não se encontra limitada pela aba visível mas sim pelo valor da aba *y* (distância do ponto de contacto do transdutor com a chapa ao ponto de contacto da chapa com o V da matriz).

As equações 14 a 17 traduzem matematicamente a relação entre a aba necessária e o ângulo de quinagem. Tal como o curso do transdutor o valor crítico desta aba corresponde ao menor valor do ângulo de quinagem (30º). Na Figura 4.15 é apresentada para este ângulo de quinagem a variação da aba em função da abertura da matriz.

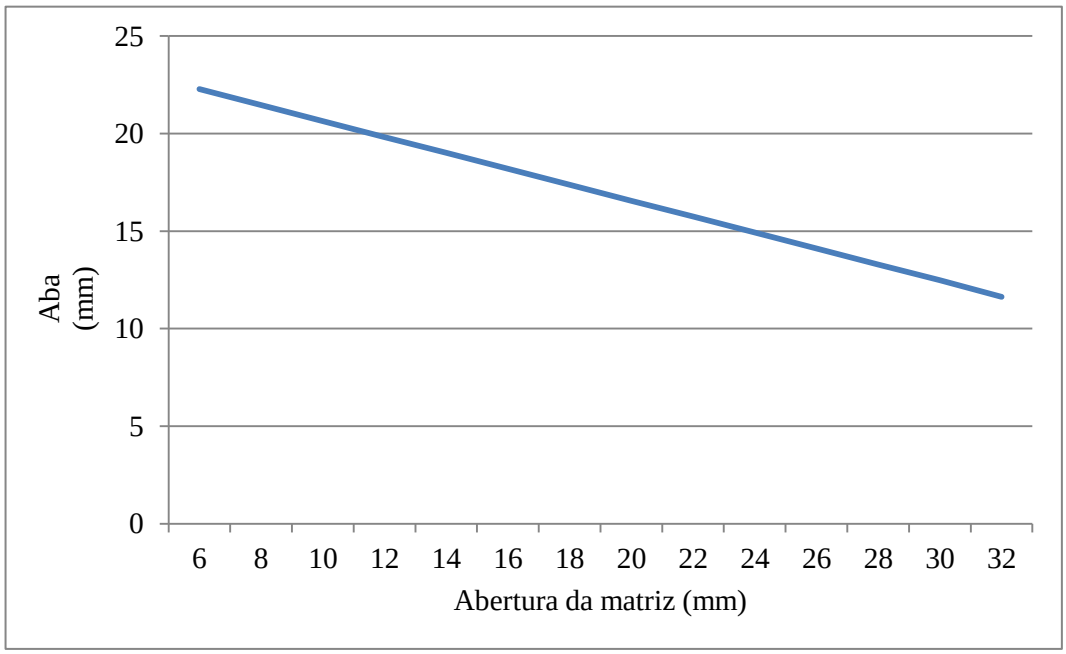


Figura 4.15 – Abertura da matriz vs. aba necessária

A análise da figura permite definir a variação da aba *y* dos 11 aos 23 mm.

Medição ao Longo do Comprimento

A solução prevê que a sua montagem seja a meio do comprimento da máquina, como tal para que o ângulo de quinagem possa ser medido ao longo do comprimento é necessário que sejam utilizados múltiplas zonas de medição, Figura 4.16.

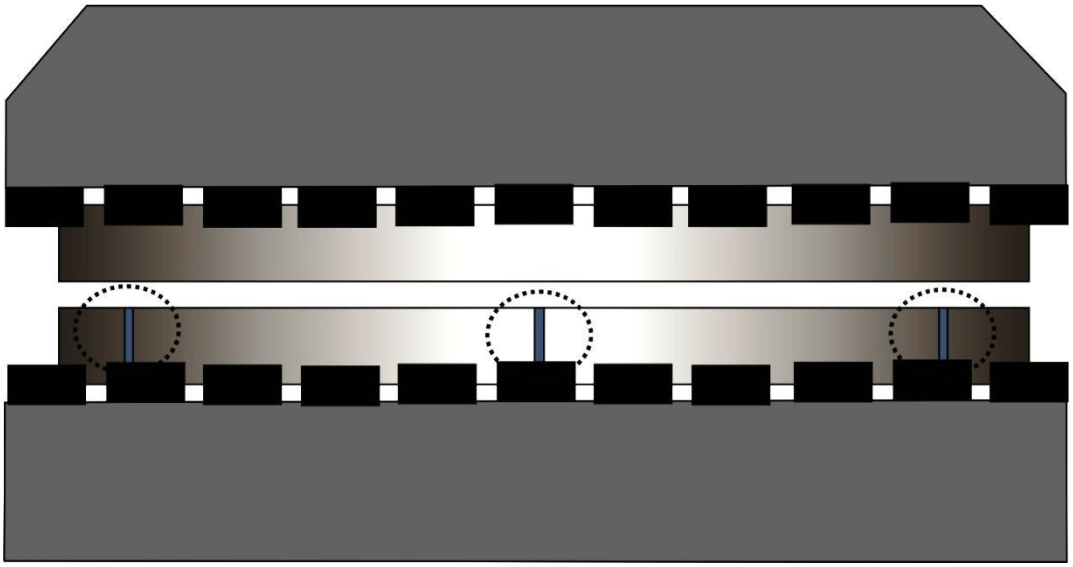


Figura 4.16 – Montagem do sistema de medição ao longo do comprimento

Área Ocupada

Um dos critérios na escolha de sistema de medição do ângulo de quinagem é a área de trabalho ocupada. Nas seguintes figuras são apresentadas as áreas que a solução ocupa (a preto a matriz, a amarelo o bombeado e a cinza a base/avental inferior).

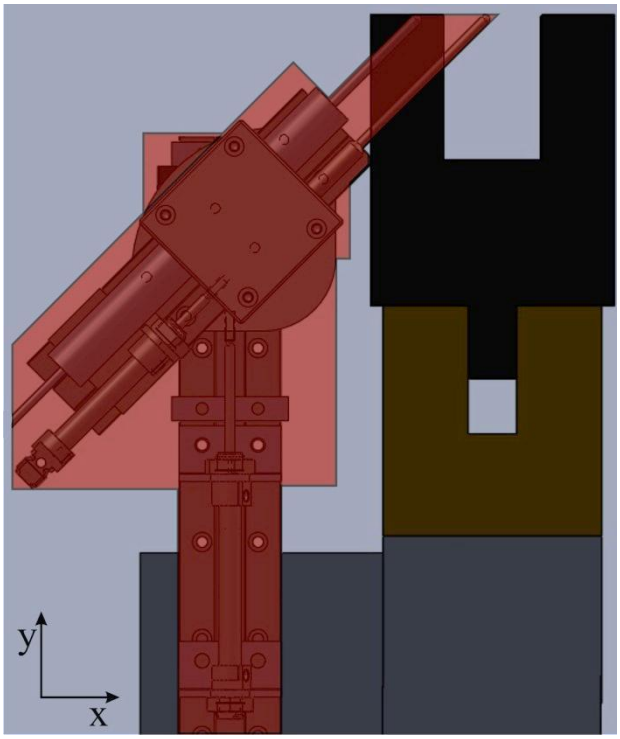


Figura 4.17 – Representação da área ocupada a vermelho (plano yx)

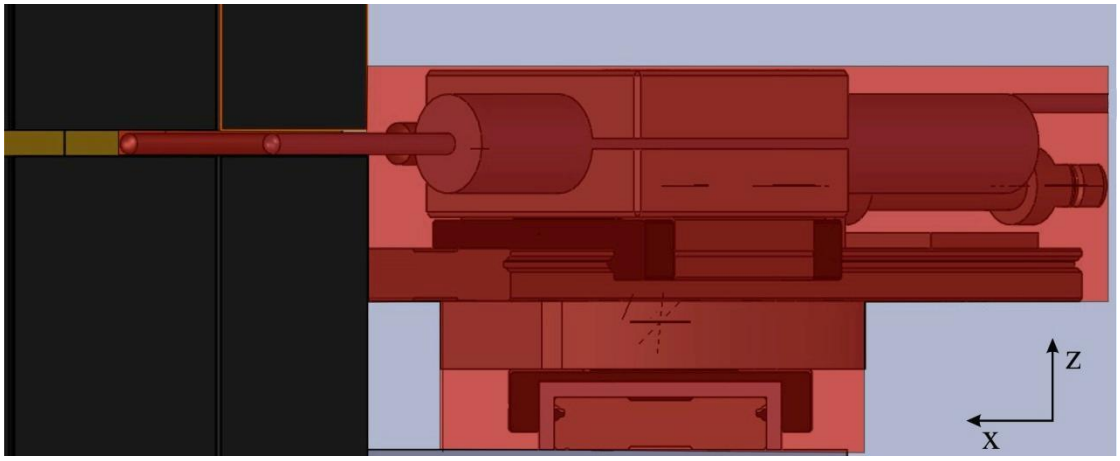


Figura 4.18 – Representação da área ocupada a vermelho (plano xz)

Segundo o eixo X, o sistema ocupa aproximadamente 200 mm, segundo Z o sistema ocupa 73 mm. O sistema segundo Y ocupa no máximo 300 mm, este valor é atingido quando se utilizam matrizes com uma altura de 120 mm (Anexo H).

Múltiplas Quinagens e Furos

A medição do ângulo quando existem quinagens prévias na chapa será possível desde que o volume utilizado não interfira com as medições.

O sistema tem capacidade para detetar furos caso o furo se encontre localizado no ponto de contacto transdutor chapa, uma vez que o transdutor apresenta um deslocamento fora do intrevalo de medição. Assim através da definição do deslocamento máximo admitido ao transdutor é possível verificar se o sistema se encontra em contacto ou não com a chapa.

4.7 Verificação dos requisitos

No final da definição completa da solução proposta é necessário verificar se esta cumpre todos os requisitos apresentados no capítulo anterior. Para facilitar a verificação dos requisitos foi criada a seguinte tabela.

Tabela 4.6 – Verificação dos requisitos

Requisitos	Solução proposta	Verificação
Gama de medição 30º a 140º	30º a 180º	☑
Exatidão ±0,5º	Resolução de 0.04º	☑
Facilidade de instalação e operação	Montagem expedita e operação com o mínimo de parametrização	☑
Utilização universal quanto ao tipo de quinagem	Sistema pode ser utilizado em qualquer tipo de quinagem	☑
Adaptabilidade às variações das dimensões das matrizes	Matrizes com largura máxima 100 mm e altura variável entre 80 e 120 mm	
Integração com o controlador	Atuadores e transdutor facilmente integráveis no controlador	☑
Natureza do material	Dimensionado para espessuras até 4 mm de duro alumínio	
Rapidez na medição	Tempo de medição previsto de 106.4 ms	☑
Medição em tempo real	Sistema em contacto contínuo com a chapa medição sempre disponível	
Medir fora da zona não utilizável	Folga f dada para garantir que sistema entra em contacto com a chapa fora da zona não utilizável	☑
Uso apenas da retaguarda da máquina	Sistema colocado apenas de um lado da matriz	☑
Chapa com múltiplas quinagens	Sistema não deteta a aba correta	X
Chapa com furos	Sistema deteta furos	☑
Espaçamento máximo de 5mm	Sistema apenas necessita de 4 mm	☑
Custo máximo de 5000€	Preço estimado 1500 €	☑

4.8 Conclusões

A definição de uma solução completa para a medição do ângulo de quinagem é um processo longo e iterativo. Logo a solução apresentada não é única mas sim a que melhor se adapta aos pressupostos assumidos no projeto

O transdutor escolhido é um LVDT com saída em DC por um lado para eliminar a necessidade de condicionamento do sinal de saída, mas também para facilitar a integração deste no controlador da quinadora.

As guias escolhidas para os dois movimentos são iguais para tornar o sistema mais simples. Sendo os esforços sobre estas muito reduzidos quando comparados com o máximo admissível, não foram realizados cálculos exaustivos.

A escolha dos atuadores seguiu o mesmo princípio das guias, ou seja, os dois atuadores escolhidos são iguais, sendo a única diferença o seu curso. Uma vez que estão sujeitos a esforços de compressão muito reduzidos a verificação dos mesmos à encurvadura não é necessária, podendo assim afirmar-se que as hastes não apresentam encurvadura.

O sistema possibilita a medição do ângulo de quinagem para matrizes com uma altura de 80 ou de 120 mm por intermédio do deslocamento vertical do conjunto. Quanto à largura máxima da matriz esta encontra-se limitada a 100 mm devido ao comprimento definido para a haste rígida.

A solução apresenta inúmeras vantagens em relação aos sistemas comerciais existentes, assim como, o baixo custo, resolução de 0.04º e elevada velocidade no cálculo da medição do ângulo de quinagem, no entanto a deformação causada pelo contacto com a chapa pode, para determinadas condições, apresentar um valor que põe em causa a exatidão do sistema.

O sistema assenta no princípio de que o ângulo de quinagem é simétrico em relação ao eixo de quinagem, caso isso não se verifique o ângulo de quinagem obtido não possui qualquer significado. Deste modo, é necessário que quando as ferramentas são montadas (punção e matriz) seja garantido o perfeito alinhamento entre elas.

Em suma a solução proposta possui todas as condições para que seja tida em consideração como alternativa às soluções presentes no mercado, mesmo com algumas limitações.

5 - Conclusão

A quinagem é um dos processos de fabrico mais utilizados para a obtenção de dobras lineares em chapas metálicas. Trata-se de um processo de deformação plástica baseado na flexão elasto-plástica aplicada a uma chapa. É um processo teoricamente simples, no entanto para que as peças produzidas tenham o rigor dimensional exigido torna-se essencial aumentar o controlo das variáveis intervenientes no processo: posição dos eixos, força aplicada, desgaste das ferramentas, etc.

A principal técnica de quinagem utilizada é a livre devido à capacidade de utilizar ferramentas universais para obtenção de ângulos de quinagem distintos, é exigida menor capacidade de força e consequentemente as quinadoras utilizadas podem ser de menor capacidade. Sendo as forças envolvidas menores do que para outras técnicas, o desgaste das ferramentas é significativamente menor.

O principal problema desta técnica é a reduzida exatidão dimensional das peças obtidas. Existem várias razões para tal acontecer (variações de espessura, desgaste das ferramentas, etc.), mas a principal é o retorno elástico que a chapa sofre quando a carga é removida. A resolução deste problema pode ser conseguida pela correção em projeto dos ângulos das ferramentas utilizadas, realizar a operação de quinagem a temperaturas elevadas, correção da profundidade de quinagem com o valor estimado para o retorno elástico. Mas todas estas soluções são limitadas pelo fato de tentarem reduzir o retorno pelo valor que é expectável e não pelo valor que realmente acontece.

A utilização de sistemas de medição do ângulo de quinagem intrínsecos à máquina permitem compensar os problemas associados à quinagem livre, através do controlo do processo de quinagem em malha fechada.

A evolução dos controladores numéricos e dos próprios sistemas de medição permite que o controlo do ângulo de quinagem seja em tempo real.

A exatidão deste tipo de sistemas é próxima dos 30 minutos. No entanto a elevada parametrização associada a um custo elevado das soluções torna difícil a sua utilização no meio industrial.

Uma operação de quinagem é relativamente simples no entanto o sistema de medição do ângulo de quinagem encontra-se sujeito a vários requisitos/condicionalismos. Estes advêm quer das características dos sistemas de medição comerciais quer dos requisitos apresentados pela Adira. Os três requisitos principais são: custo inferior a 5000€, para que o sistema tenha um custo competitivo; exatidão no mínimo de ±0.5º, para se equiparar aos existentes no mercado; a gama de 30º a 140º com intuito de incluir os ângulos de quinagem normalmente realizados.

A primeira solução estudada apresenta como principal vantagem uma reduzida área de trabalho ocupada, uma vez que a maioria do sistema se encontra dentro da matriz. No entanto é a solução que requer a melhor exatidão dos transdutores (21,8 µm), esta exigência, mais o fato de não existir guiamento na zona de trabalho conduziram à sua exclusão.

O sistema de medição proposto que utiliza os transdutores óticos é o que apresenta mais vantagens em relação às outras duas soluções estudadas, em particular: a não existência de qualquer contacto com a chapa, eliminando assim qualquer deformação. Mas por outro lado, este tipo de transdutores são muito suscetíveis à presença de irregularidades na superfície de chapa, menos robustos e mais caros.

O custo global do sistema assume um papel importante na decisão da escolha de uma nova solução, uma vez que elimina a utilização de transdutores óticos para a medição do ângulo de quinagem. A não utilização deste tipo de transdutores conduziu à proposta de uma solução de medição indireta do ângulo de quinagem utilizando um LVDT. Para o cálculo do ângulo de quinagem, a solução utiliza um LVDT para medir a diferença de posição entre o seu ponto de contacto com a chapa e uma haste móvel, que se encontra solidária ao corpo do transdutor.

Os sistemas comerciais apresentam geralmente um custo muito elevado, no entanto a solução proposta com um custo estimado de 1500 €, contraria essa tendência. Associado ao reduzido custo, o sistema de medição proposto apresenta uma resolução na medição do ângulo de quinagem de 0.04º o que potencia uma exatidão na medição do ângulo superior a dos sistemas comerciais. Outra vantagem deste sistema em relação aos sistemas comerciais é a sua abrangente gama de medição, de 30º a 180º.

A aba necessária por este sistema não necessita de ser visível, deste modo consegue-se realizar a medição mesmo com abas visíveis reduzidas (quando comparadas com o valor típico de 20 mm), a aba, máxima, *y* exigida pelo sistema é de 23 mm.

Após montagem do sistema de medição, este necessita apenas de uma operação de ajuste para identificar qual o deslocamento inicial do transdutor quando a chapa se encontra ainda plana. Esta operação é apenas necessária quando é alterada a matriz. As restantes variáveis necessárias (espessura da chapa, abertura e altura da matriz) para o sistema funcionar corretamente são dadas pelo comando numérico da quinadora.

A deformação induzida na chapa devido ao contacto desta com as pontas de prova é um dos principais problemas da solução. A deformação máxima estimada é aproximadamente de 0.1 mm este é um valor bastante elevado quando comparado com a resolução exigida na medição do deslocamento. Deste modo para reduzir o erro provocado pela deformação propõem-se a criação de uma tabela/função de erro, a ser integrada no controlador da quinadora, onde seja possível determinar a deformação da chapa para as condições programadas (ângulo de quinagem, abertura da matriz e espessura da chapa). Ou então, para ângulos próximos de 30º e abertura da matriz de 20 a 30 mm o sistema deve apenas ser utilizado para chapas com a espessura superior a 1.5 mm, uma vez que para esta espessura o valor de deformação é bastante mais reduzido.

O tempo de estabilização do sistema, é de cerca de 0.1 s, é um valor relativamente reduzido. No entanto numa operação de quinagem, caracterizada pela sua elevada rapidez, é considerável, representando aproximadamente 30% do tempo ciclo (1 s). A redução deste tempo passaria pelo aumento da força exercida sobre o sistema (força do cilindro pneumático) o que no entanto conduziria a um aumento da deformação. Deste modo o sistema é tanto mais rápido quanto menor for a exatidão exigida, assim sistema deve ser ajustado as necessidades de cada cliente.

Em suma, a solução proposta apresenta vantagens promissoras (custo e resolução) que devem ser tidas em conta na escolha de um sistema de medição do ângulo de quinagem. No entanto só a instalação de um protótipo funcional permitirá analisar a validade dos pressupostos utilizados na realização deste trabalho assim como a verificação da viabilidade da solução apresentada.

A utilização de uma solução sem qualquer tipo de contacto com a chapa elimina o problema da deformação causada, deste modo sugere-se a definição de uma solução em que o LVDT seja substituído por um transdutor ótico, sabendo no entanto que o custo do sistema irá aumentar. Esta escolha tem que ser um compromisso entre a exatidão pretendida e o custo do sistema.

O emprego do controlo em anel fechado das operações de maquinagem conduzirá a melhorias quer na qualidade das peças, quer no aumento da produtividade.

A realização do trabalho permitiu concluir que alguns dos parâmetros essenciais para a operação de quinagem não se encontram corretamente definidos, assim como, a espessura efetiva da chapa (não a teórica dada pelo fornecedor), direção de laminagem, empenos da chapa e desgaste das ferramentas utilizadas nas operações de quinagem. Deste modo é essencial que a determinação destas características sejam integradas na preparação das operações de quinagem.

6 - Referências e Bibliografia

[1] J. A. B. Pacheco, *Utilização de Quinadoras e Guilhotinas*, Primeira ed. Porto, 1992.

[2] J. Rodrigues and P. Martins, *Tecnologia Mecânica - Tecnologia da deformação plástica: Aplicações Industriais* vol. II, 2005.

[3] ADIRA, "Quinadora hidráulicas sincronizadas PA," ed, 2011.

[4] I. D. Lacchesi, *Tecnica de la Forja, Embuticion, Corte y Soldadura*, 1973.

[5] LVD. (2010, 25 de Fevereiro). *LVD INTRODUCES NEW EASY-FORM® LASER 200 ADAPTIVE BENDING SYSTEM*. Site: http://www.lvdgroup.com/en/latest-news2.aspx?Pid=724

[6] E. V. Finckenstein, N. Austerhoff, B. Heller, and H. Sulaiman, "Inprocess control system for flexible air bending of sheet metal," in *Production Engineering*. vol. IV, ed, 1997.

[7] J. R.Duflou, V. József, and R. Aerens, *Computer aided process planning for sheet metal bending*, 2004.

[8] R. Liet, "Darley's ACS angle measuring system for press brakes," apresentado em Proceedings of the 9th International Conference on Sheet Metal, Leuven, 2001.

[9] Darley, "Sheetmetal working machines," ed, 2010.

[10] Gasparini, "X-Presss PSG," ed, 2011.

[11] L. Gasparini, "Metal Sheet Press-Bending Machine," Estados Unidos da América Patent US 6.266.984 B1, 2000.

[12] W. Serruys, "Adaptive bending," apresentado em Proceedings of the 9th International Conference on Sheet Metal, Leuven, 2001.

[13] Trumpf. (2010, 15 de Fevereiro). *Innovative technology Bending: Angle sensor ACB*. Site: http://www.trumpf-machines.com/en/products/bending/innovative-technology/acb-angle-sensor.html

[14] Trumpf, "Bending Angle Sensor - Angle Sensor ACB," Trumpf, Ed., ed, 2010.

[15] W. Heckel, "In-process measurement of spring-back in sheet metal bending," apresentado em Proceedings of the 4th International Conference on Sheet Metal, Enschede, 1996.

[16] D. Lutters, A. H. Streppel, and H. J. J. Kals, "Adaptive press brake control in air bending," apresentado em Proceedings of the 5th International Conference on Sheet Metal, Belfast, 1997.

[17] G. J. Brinkman and M. Hiraizumi, "Angle Detection Method for Bending Machine, Angle Detection Apparatus and Angle Sensor," Estados Unidos da América Patent US 2001/0026363 A1, 2001.

[18] L. Safe, "IMG System Overview," ed, 2010.

[19] Trumpf. (2010, 30 de Febreiro). *Innovative technology Bending: Angle measuring system LCB*. Site: http://www.trumpf-machines.com/en/products/bending/innovative-technology/angle-measuring-system-lcb.html?tx_dgpsendafriend_pi1%5Bnc%5D=1&cHash=15b11db0a3

[20] LVD, "The PPEB system," ed, 2010.

[21] AMADA, "Press brakes HFE-M2 series," ed, 2010.

[22] Ursviken. (2010, 30 de Março). *Angle & Spring Back Controller*. Site: http://www.ursviken.com/index.php?id=57

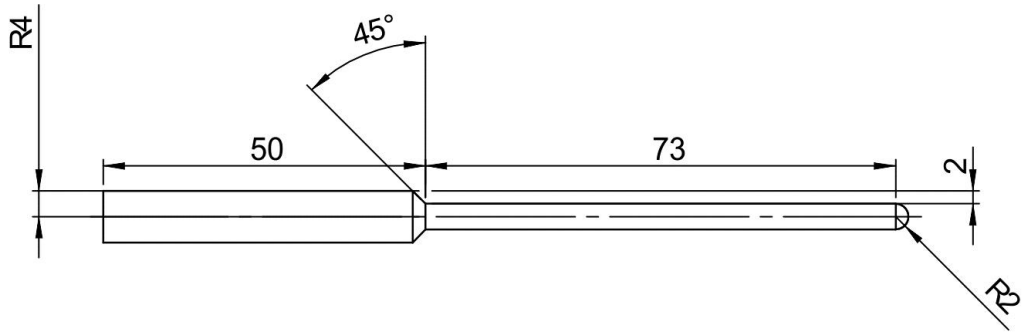
[23] Pilz, "Operating Manual: PSENvip RL D M Set," 2011.

[24] BANNER. (2011, 26 de Junho). Site: http://www.bannerengineering.com/en-US/products/8/Sensors/38/Laser-Sensors/590/L-GAGE-LH-Series

[25] INA, "Miniature linear recirculating ball bearing and guideway assemblies," I.-S. KG, Ed., ed. Germany, 2010.

[26] S. Group. (2011, 25 de Maio). *Media®Home*. Site: http://medias.schaeffler.de/medias/en!hp.info/KUE*UK*kshinweise;bvGxZ6VYuwH7

Anexo A : Desenho de definição da haste rígida

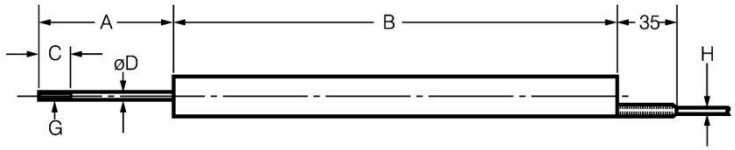


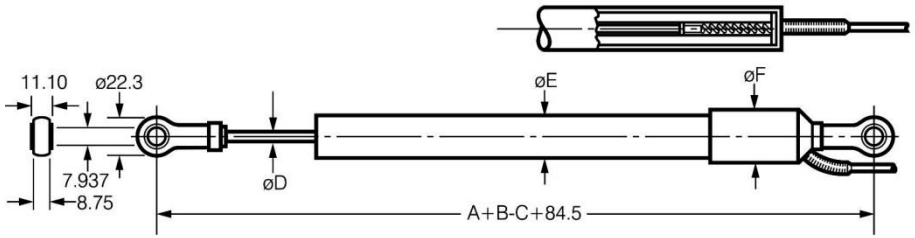
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:					Desenvolvimento de um Sistema de Medição do Ângulo de Quinagem
	Nome					Titulo
Desenhado	Pedro Fonseca					Haste Rigida
		MATERIAL: Aço de construção Ck45				Desenho nº 1
						A4
						Escala:1:1
						Página 1 de 1

Anexo B: Excerto do catálogo da Solartron metrology

standard ac & dc

long stroke displacement transducers





Dimensions mm

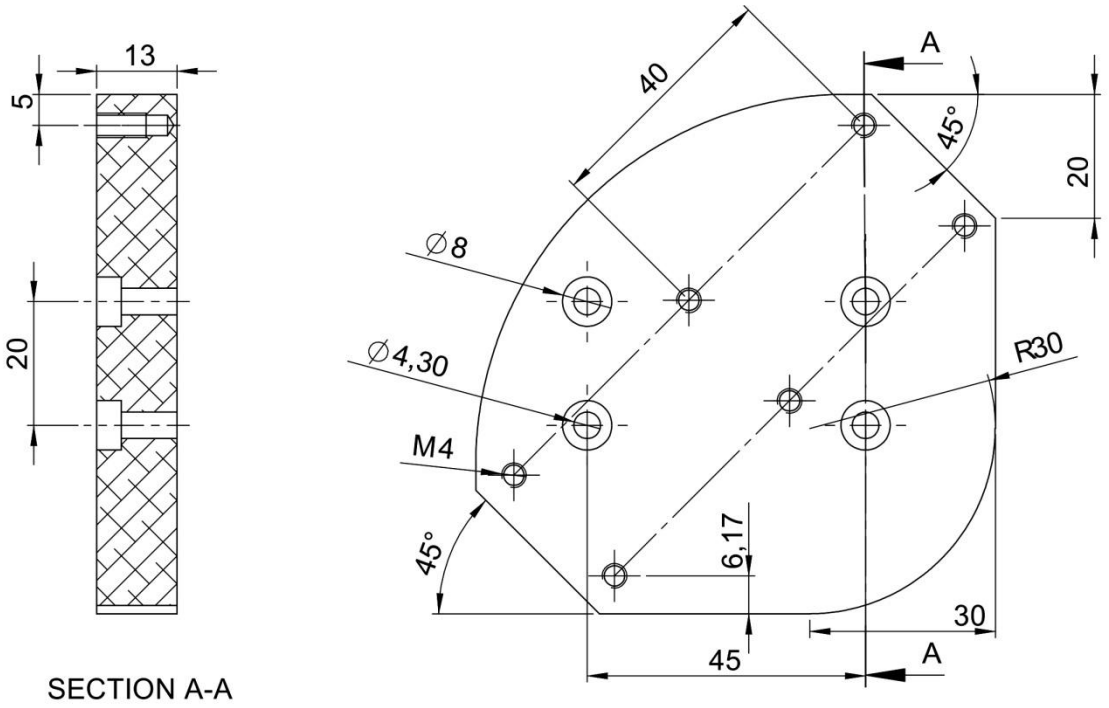
	AC15 ACR15 DC15 DCR15	AC25 ACR25 DC25 DCR25	AC50 ACR50 DC50 DCR50	AC100 ACR100 DC100 DCR100	AC150 ACR150 DC150 DCR150	AC250 - DC250 -	AC300 - DC300 -
A*	45	60	85	145	197	298	349
B	97	156	280	450	552	755	857
C	20	20	20	20	19	19	19
D	3.17	4.0	4.0	4.75	4.75	4.75	4.75
E	19	19	19	25	25	25	25
F	25	25	32	32	32	32	32
G	M3	M4	M4	M5	M5	M5	M5
H	3.5	3.5	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5

*at electrical zero

Specification

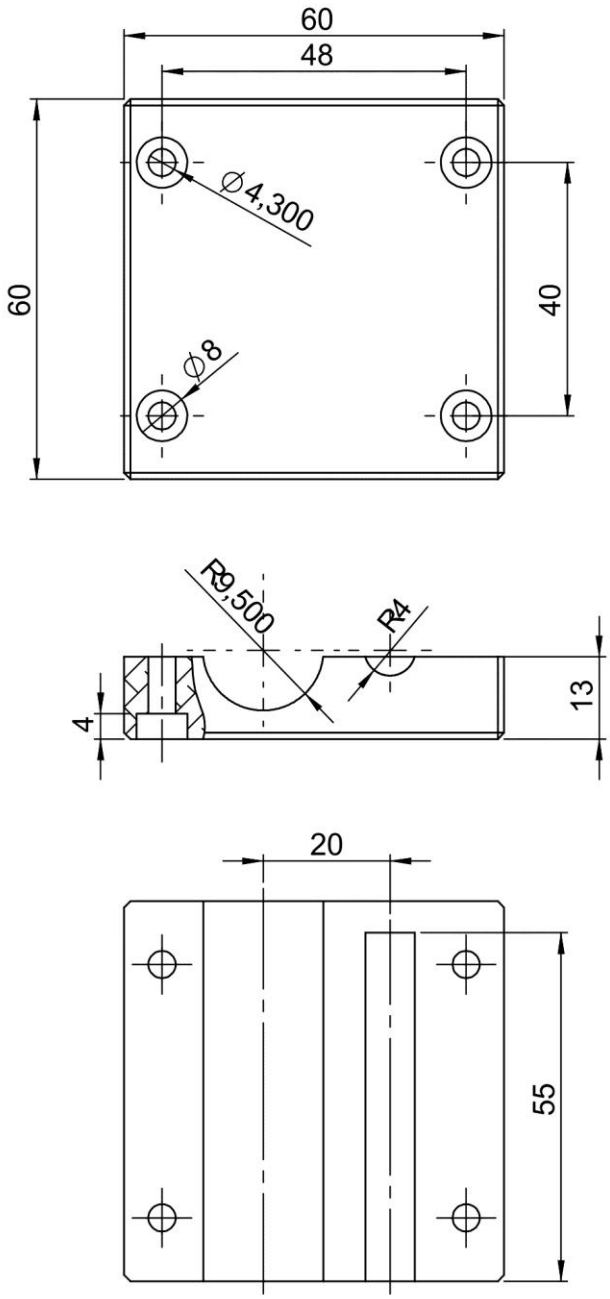
AC captive armature type **AC sprung armature type** **DC captive armature type** **DC sprung armature type**	**AC15** **ACR15** **DC15** **DCR15**	**AC25** **ACR25** **DC25** **DCR25**	**AC50** **ACR50** **DC50** **DCR50**	**AC100** **ACR100** **DC100** **DCR100**	**AC150** **ACR150** **DC150** **DCR150**	**AC250** - **DC250** -	**AC300** - **DC300** -
Linear measuring stroke, ±mm	15	25	50	100	150	250	300
Mechanical: AC & DC series							
Max stroke, ±mm	22	35	62	125	178	279	330
Weight, g Body, including leads Armature assembly	 60 10	 96 18	 170 25	 600 54	 900 78	 1300 106	 1600 122
Spring rate	3.3	2.34	1.95	1.19	1.0		
Force at electrical zero, in g ACR	110	150	185	120	120		
Electrical: AC series							
Winding configuration	LVDT	LVDT	LVDT	LVDT	LVDT	LVDT	LVDT
Sensitivity, mV/V/mm (typical)	35	20	9.3	5	3.2	2.1	1.7
Energising current, mA	6	4	4	6	5	6	9
Output impedance, **Ω**	220	210	160	160	150	110	90
Input/Output phase shift, °	7	9	10	7	7	5	2
Zero phase shift, kHz	2.4	2	1.6	2.6	23	7	5.5
Energising voltage	1 to 10V rms						
Energising frequency	5kHz						
Residual voltage at zero	>0.5%						
Temperature range	-40 to +100°C						
Temperature coefficient % measuring stroke	Zero <0.005%/°C Sensitivity % per °C <0.01%/°C						
Termination	3m PVC insulated 5 core 19/0.07mm screened cabel. 100 to 300: 28/0.07mm screened cable						
Calibration	The specification provided is with a supply of 5V rms 5kHz and a calibration load of 100k**Ω** at 20°C. Variations of these parameters will result in changes of performance						
Electrical connections							
Red & blue	Primary Energising						
White	Secondary Signal						
Green	Secondary OV						
Yellow	Secondary centre tap (dc not connected)						
Red & white	In phase for inward displacement						
Electrical: DC series							
Winding configuration	LVDT	LVDT	LVDT	LVDT	LVDT	LVDT	LVDT
Sensitivity, mV/V/mm at 10V dc (typical)	280	165	60	20	13.3	8.0	6.6
Energising current at 10V, mA	10	18	40	40	40	40	40
Input voltage range, V	9 to 24	9 to 24	9 to 24	9 to 15	9 to15	9 to 15	9 to 15
Output ripple	<1% full scale deflection						
Response time constant	0.4 ms up to 50mm						
Frequency response	For transducers up to ±50mm: –3dB attenuation at 100Hz, –20dB/decade above100Hz						
Temperature range	-30°C to +80°C						
Temperature coefficient % total stroke	Zero <0.005%/°C Sensitivity % per °C <0.015%/°C						
Non-linearity	0.3% is available						
Termination	3m pvc insulated 5 core 14/0.07mm screened cable. 100 to 300: 14/0.1mm screened cable						
Calibration	Specification is provided with a transducer output impedance of 2k**Ω** into a calibration load of 20k**Ω** at 20°C. Variations of these parameters will result in changes of performance						
Electrical connections							
Red & blue	Primary Energising						
White	Secondary Signal						
Green	Secondary OV						
Red & white	+ve output on white lead with respect to green for inward displacement						

Anexo C : Desenho de definição da ligação direção inclinada



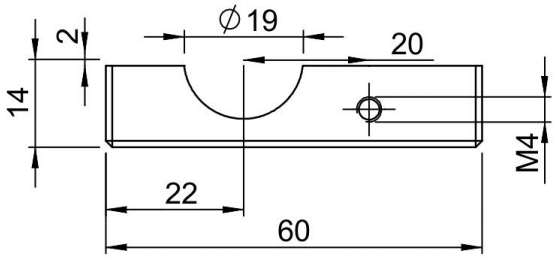
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:					Desenvolvimento de um Sistema de Medição do Ângulo de Quinagem
	Nome					Título
Desenhado	Pedro Fonseca					Ligação direção inclinada
				MATERIAL: Aluminio		Desenho nº 1	A4
						Escala:1:1	Página 1 de 1

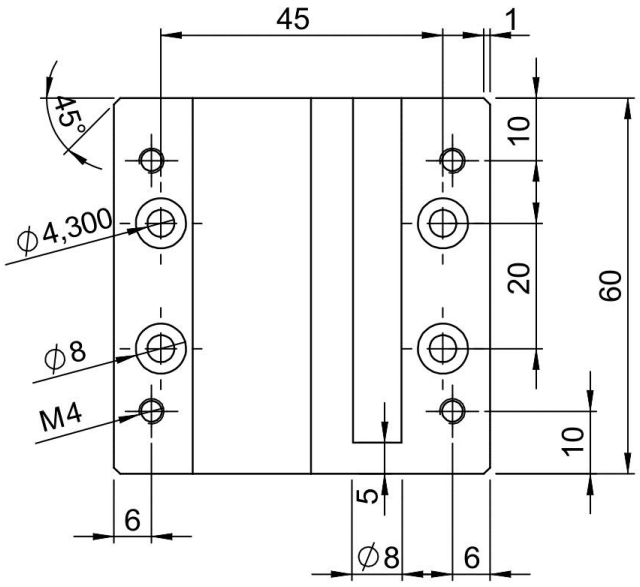
Anexo D : Desenho de definição da tampa superior



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:						Desenvolvimento de um Sistema de Medição do Ângulo de Quinagem
	Nome						Titulo
Desenhado	Pedro Fonseca						Tampa superior
			MATERIAL:				Desenho nº
			Aluminio				1
							A4
							Escala:1:1
							Página 1 de 1

Anexo E : Desenho de definição da tampa inferior





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

Desenvolvimento de um Sistema de Medição do Ângulo de Quinagem

	Nome
Desenhado	Pedro Fonseca

Titulo

Tampa Inferior

MATERIAL: Aluminio

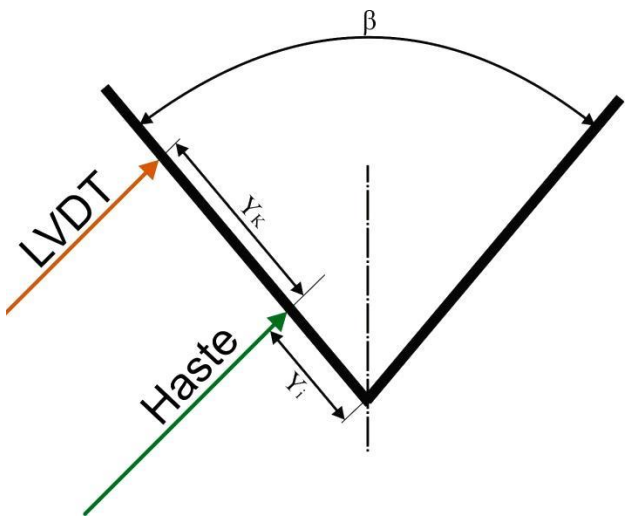
Desenho nº 1

A4

Escala:1:1

Página 1 de 1

Anexo F : Distância do transdutor e da haste função de β e V



β (º) / V (mm)	30º		90º		140º	
	Y_i (mm)	Y_k (mm)	Y_i (mm)	Y_k (mm)	Y_i (mm)	Y_k (mm)
6	11,48	34,58	3,95	23,95	2,65	25,82
10	17,58	40,67	5,36	25,36	3,21	26,39
20	32,81	55,91	8,90	28,90	4,63	27,81
25	40,43	63,53	-	-	-	-
32	-	-	13,14	33,14	6,34	29,51

Anexo G : Relatório da simulação β =90º e V6

Contents

Units

Model (B4)
- Geometry
  - chapa90
- Coordinate Systems
- Mesh
  - Body Sizing
- **Static Structural (B5)**
  - Analysis Settings
  - Loads
  - Solution (B6)
    - Solution Information
    - Results
    - Probes

Material Data
- Structural Steel

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (B4)

Geometry

TABLE 2
Model (B4) > Geometry

Object Name	*Geometry*
State	Fully Defined
Definition	
Source	C:\Users\Pedro_Fonseca\Desktop\ANSYS TESE\a_files\dp0 \Geom\DM\Geom.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Millimeters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Part Color
Bounding Box	
Length X	127,28 mm
Length Y	64,771 mm
Length Z	100, mm
Properties	
Volume	14368 mm³
Mass	0,11279 kg
Scale Factor Value	1,
Statistics	
Bodies	1

Active Bodies	1
Nodes	3899
Elements	1763
Mesh Metric	None
Preferences	
Parameter Processing	Yes
Personal Parameter Key	DS
CAD Attribute Transfer	No
Named Selection Processing	No
Material Properties Transfer	No
CAD Associativity	Yes
Import Coordinate Systems	No
Reader Save Part File	No
Import Using Instances	Yes
Do Smart Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\Pedro_Fonseca\AppData\Local\Temp
Analysis Type	3-D
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (B4) > Geometry > Parts

Object Name	*chapa90*
State	Meshed
Graphics Properties	
Visible	Yes
Transparency	1
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Length X	127,28 mm
Length Y	64,771 mm
Length Z	100, mm
Properties	
Volume	14368 mm³
Mass	0,11279 kg
Centroid X	0,14132 mm
Centroid Y	13,322 mm
Centroid Z	50, mm
Moment of Inertia Ip1	131,9 kg·mm²
Moment of Inertia Ip2	245,58 kg·mm²
Moment of Inertia Ip3	189,5 kg·mm²
Statistics	
Nodes	3899
Elements	1763
Mesh Metric	None

Coordinate Systems

TABLE 4
Model (B4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	*Global Coordinate System*	*Coordinate System*	*Coordinate System 2*
State	Fully Defined		
Definition			
Type	Cartesian		
Coordinate System ID	0,	Program Controlled	
Origin			
Origin X	0, mm	-2,7931 mm	-16,228 mm
Origin Y	0, mm	-16,2 mm	-2,765 mm
Origin Z	0, mm	50, mm	
Define By		Geometry Selection	
Geometry		Defined	
Directional Vectors			
X Axis Data	[1, 0, 0,]	[-0,70711 0,70711 0,]	
Y Axis Data	[0, 1, 0,]	[0,70711 0,70711 0,]	
Z Axis Data	[0, 0, 1,]	[0, 0, -1,]	
Principal Axis			
Axis		X	
Define By		Geometry Selection	
Geometry		Defined	
Orientation About Principal Axis			
Axis		Y	
Define By		Geometry Selection	
Geometry		Defined	
Transformations			
Base Configuration		Absolute	
Transformed Configuration		[-2,7931 -16,2 50,]	[-16,228 -2,765 50,]

Mesh

TABLE 5
Model (B4) > Mesh

Object Name	*Mesh*
State	Solved
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Coarse
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	0,80 mm
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	

Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
Statistics	
Nodes	3899
Elements	1763
Mesh Metric	None

TABLE 6
Model (B4) > Mesh > Mesh Controls

Object Name	*Body Sizing*
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	10, mm
Behavior	Soft

Static Structural (B5)

TABLE 7
Model (B4) > Analysis

Object Name	*Static Structural (B5)*
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	22, °C
Generate Input Only	No

TABLE 8
Model (B4) > Static Structural (B5) > Analysis Settings

Object Name	*Analysis Settings*
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled

Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
Nonlinear Controls	
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
Output Controls	
Calculate Stress	Yes
Calculate Strain	Yes
Calculate Contact	No
Calculate Results At	All Time Points
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	C:\Users\Pedro_Fonseca\Desktop\ANSYS TESE\a_files\dp0\SYS\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No
Solver Units	Active System
Solver Unit System	nmm

TABLE 9
Model (B4) > Static Structural (B5) > Loads

Object Name	*Fixed Support*	*Fixed Support 2*	*Force*	*Force 2*
State	Fully Defined			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	2 Edges	2 Vertices	1 Vertex	
Definition				
Type	Fixed Support		Force	
Suppressed	No			
Define By			Components	
Coordinate System			Global Coordinate System	
X Component			2,0718 N (ramped)	1,4708 N (ramped)
Y Component			2,0718 N (ramped)	1,4708 N (ramped)
Z Component			0, N (ramped)	

FIGURE 1
Model (B4) > Static Structural (B5) > Force

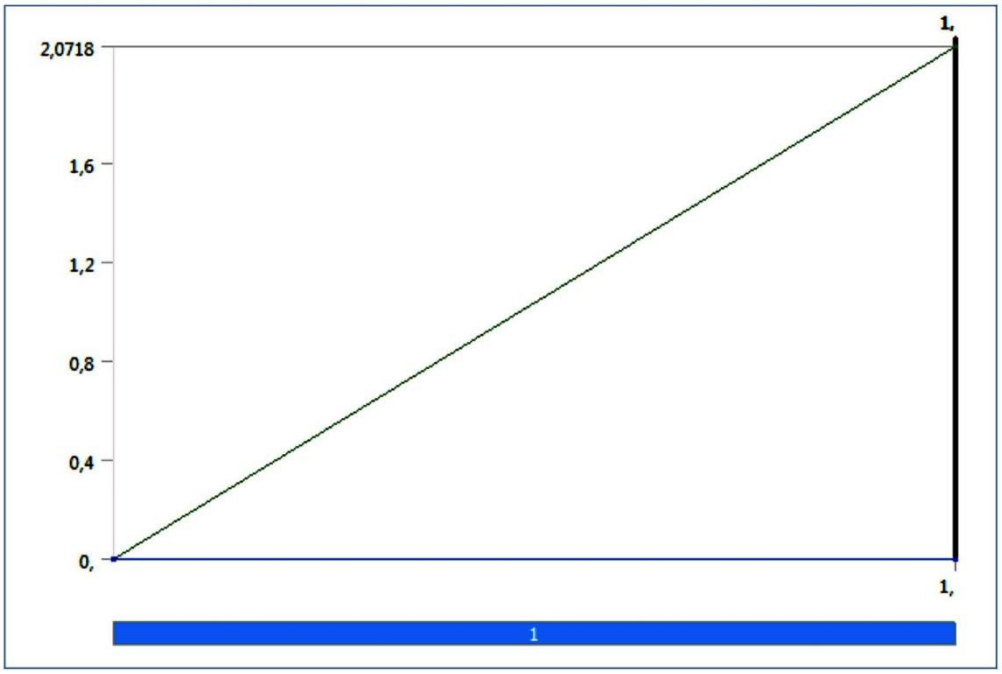
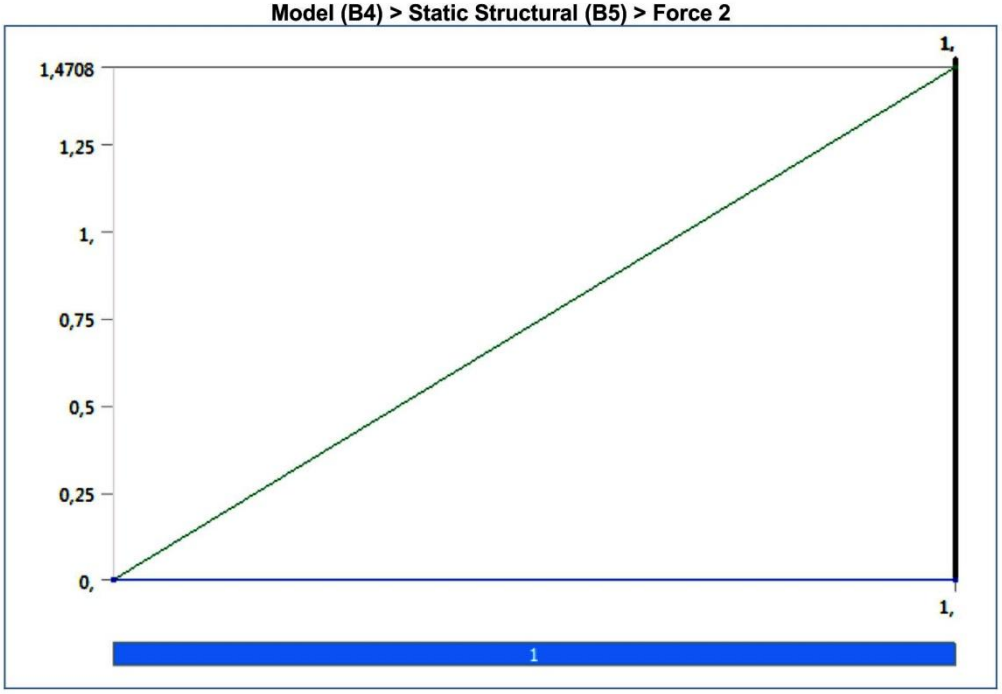


FIGURE 2
Model (B4) > Static Structural (B5) > Force 2



Solution (B6)

TABLE 10
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution

Object Name	*Solution (B6)*
State	Solved

Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
Information	
Status	Done

TABLE 11
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Solution Information

Object Name	*Solution Information*
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Update Interval	2,5 s
Display Points	All

TABLE 12
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Results

Object Name	*Directional Deformation*	*Directional Deformation 2*	*Directional Deformation 3*	*Total Deformation*
State	Solved			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	All Bodies			
Definition				
Type	Directional Deformation			Total Deformation
Orientation	Y Axis		X Axis	
By	Time			
Display Time	Last			
Coordinate System	Coordinate System	Coordinate System 2	Global Coordinate System	
Calculate Time History	Yes			
Identifier				
Results				
Minimum	-1,6604e-005 mm		-2,824e-006 mm	0, mm
Maximum	4,0035e-002 mm		2,8474e-002 mm	4,0035e-002 mm
Information				
Time	1, s			
Load Step	1			
Substep	1			
Iteration Number	1			

TABLE 13
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Probes

Object Name	*Deformation Probe*	*Deformation Probe 2*
State	Solved	
Definition		
Type	Deformation	
Location Method	Geometry Selection	
Geometry	1 Vertex	
Orientation	Coordinate System	Coordinate System 2
Options		
Result Selection	Y Axis	
Display Time	End Time	

Spatial Resolution	Use Maximum	
Results		
Y Axis	1,797e-004 mm	5,2362e-003 mm
Maximum Value Over Time		
Y Axis	1,797e-004 mm	5,2362e-003 mm
Minimum Value Over Time		
Y Axis	1,797e-004 mm	5,2362e-003 mm
Information		
Time	1, s	
Load Step	1	
Substep	1	
Iteration Number	1	

Material Data

Structural Steel

TABLE 14
Structural Steel > Constants

Density	7.85e-006 kg mm^-3
Coefficient of Thermal Expansion	1.2e-005 C^-1
Specific Heat	4.34e+005 mJ kg^-1 C^-1
Thermal Conductivity	6.05e-002 W mm^-1 C^-1
Resistivity	1.7e-004 ohm mm

TABLE 15
Structural Steel > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength MPa
0

TABLE 16
Structural Steel > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength MPa
250

TABLE 17
Structural Steel > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength MPa
250

TABLE 18
Structural Steel > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength MPa
460

TABLE 19
Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

Reference Temperature C
22

TABLE 20
Structural Steel > Alternating Stress Mean Stress

Alternating Stress MPa	Cycles	Mean Stress MPa
3999	10	0
2827	20	0
1896	50	0

1413	100	0
1069	200	0
441	2000	0
262	10000	0
214	20000	0
138	1.e+005	0
114	2.e+005	0
86.2	1.e+006	0

TABLE 21
Structural Steel > Strain-Life Parameters

Strength Coefficient MPa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient MPa	Cyclic Strain Hardening Exponent
920	-0.106	0.213	-0.47	1000	0.2

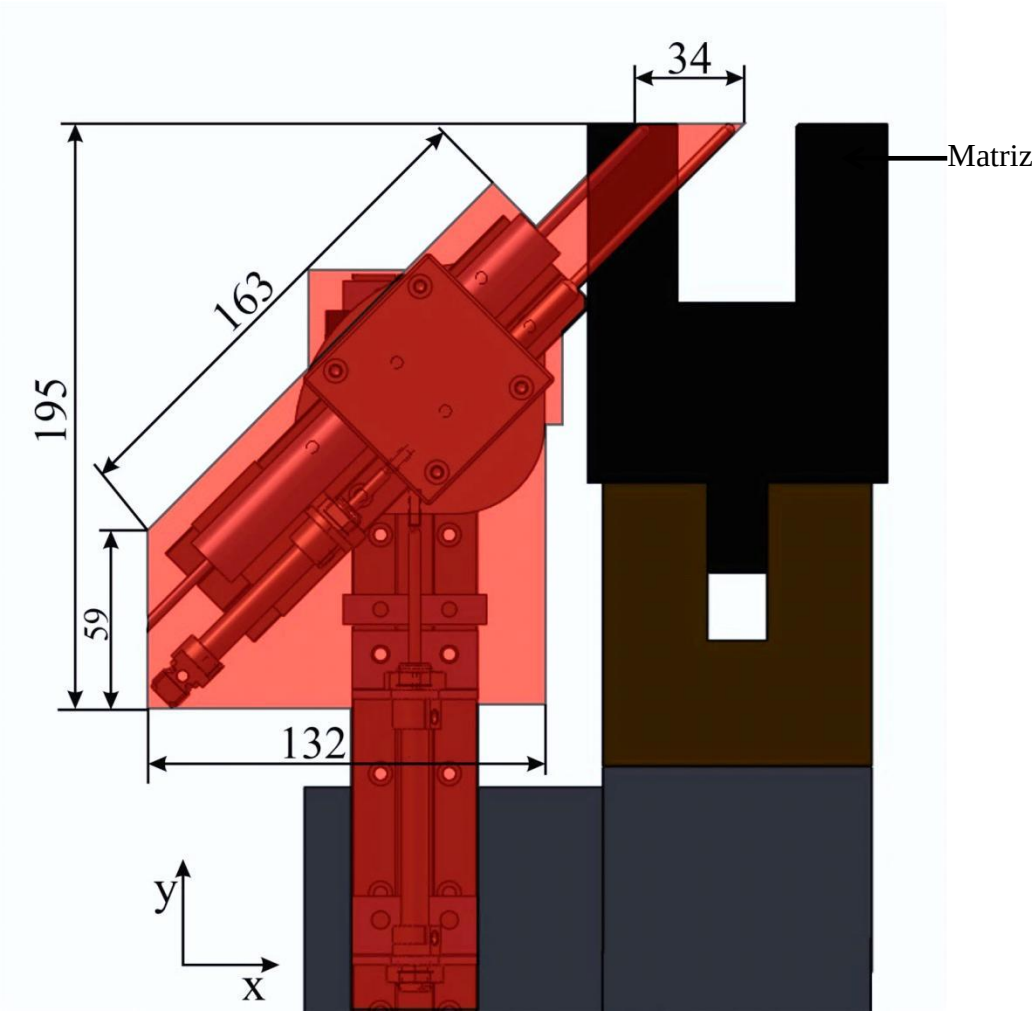
TABLE 22
Structural Steel > Isotropic Elasticity

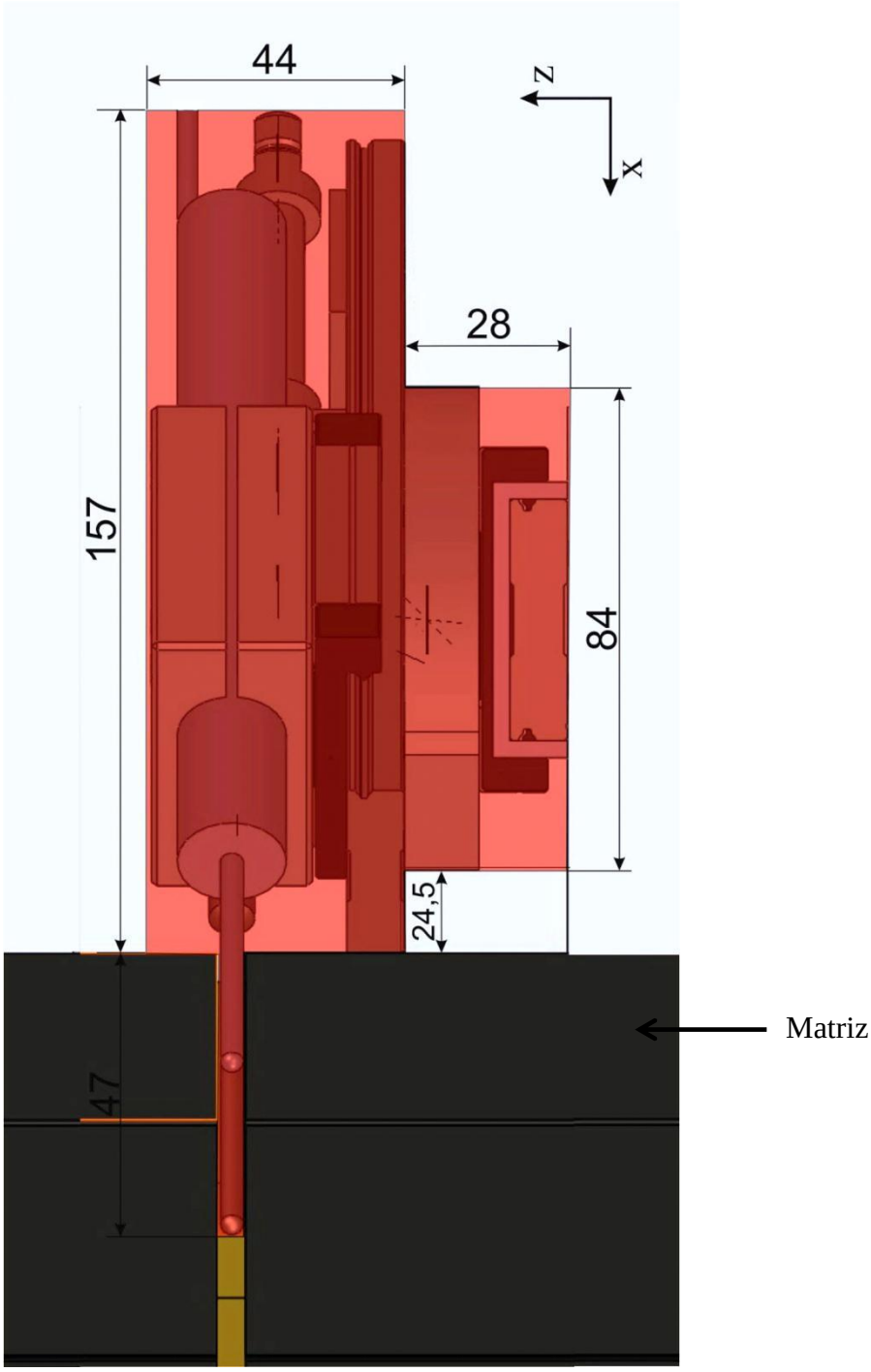
Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa
	2.e+005	0.3	1.6667e+005	76923

TABLE 23
Structural Steel > Isotropic Relative Permeability

Relative Permeability
10000

Anexo H : Inserção no volume de trabalho da quinadora


34
Matriz
163
195
59
132
y
x


157
47
44
28
24,5
84
z
x
Matriz