

**Desenvolvimento e simulação de um sistema inteligente e inovador
de compensação da deformação estrutural de uma quinadora para
todas as localizações da chapa ao longo do comprimento**

Projecto realizado na ADIRA S. A.

por

Miguel Alves Ribeiro Veloso de Castro

Relatório do Projecto Final do MIEM

Orientador na ADIRA S.A.: Engenheiro José Bessa Pacheco

Orientador na FEUP: Professor Paulo Tavares de Castro



FEUP

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Fevereiro de 2009

Desenvolvimento e simulação de um sistema inteligente e inovador de compensação de
deformações de uma quinadora

Dedico este trabalho aos meus pais e namorada.

Desenvolvimento e simulação de um sistema inteligente e inovador de compensação de
deformações de uma quinadora

Resumo

As quinadoras têm como função conformar chapas metálicas planas para que se obtenham dobras lineares. Um dos problemas deste processo, que acompanha as quinadoras desde os seus inícios, consiste na dificuldade de obtenção de uma dobra linear recta com ângulo constante ao longo da quinagem sobretudo quando o processo se desenrola em diferentes pontos ao longo do comprimento. Neste projecto é desenvolvido um sistema inovador que procura resolver este problema.

No início do projecto fez-se um estudo aprofundado sobre os métodos existentes no mercado que tentam atenuar os efeitos deste problema, sobre o que existe e existiu patenteado, e de seguida procurou-se criar um método eficaz e inovador.

Fez-se uma abordagem teórica para tentar compreender se este método seria eficiente e introduziram-se as modificações e ajustes necessários. O sistema final consiste num avental inferior modificado, para que este no acto de quinagem se deforme da mesma forma que o avental superior. Assim seria garantido o paralelismo entre os dois aventais o que eliminava o problema do ângulo não constante ao longo da quinagem. Também o problema da dobra linear recta seria eliminado se este método fosse aplicado aos dois aventais.

Este sistema consiste na colocação de vários cilindros hidráulicos ao longo do avental, tendo como função aplicar uma deformação pretendida ao avental. O controlo, a alimentação e o tipo de cilindros determinam a complexidade, custos e eficácia deste sistema.

Concluiu-se o trabalho com um estudo e análise deste processo recorrendo ao Método dos Elementos Finitos, modelando algumas alterações necessárias a nível estrutural.

Concluiu-se que o sistema realmente é eficaz e que abdicando de tolerâncias excessivamente apertadas se pode tornar mais simples e barato.

Desenvolvimento e simulação de um sistema inteligente e inovador de compensação de
deformações de uma quinadora

Abstract

Press break conform sheet metal flat to get linear folds. One of the problems of this process, which accompanies press break since their beginning, is the difficulty in obtaining a straight edge and a consistent bending angle, mostly when bending off center along the machine length. This project aims at developing an innovative system to solve this problem.

At the beginning of this project a detailed study of existing methods in the market seeking to minimise this problem was made, including a search of existing patents. An efficient and innovative method was then developed.

The first step consisted of a theoretical approach seeking to understand if this method would be efficient and making the required changes and adjustments. The final system consisted on a modified lower beam, which should follow the upper beam deflection during bending. Thus the parallelism between the two beams was ensured, eliminating the problem of non-constant bending angle. Also the straight edge fault would be eliminated if this method was applied to both beams.

This system consists of several hydraulic cylinders placed along the lower beam, with the function to apply the required deflection. The control and type of cylinders determine the complexity, cost and effectiveness of this system.

A study and analysis of this process using the Finite Element Method was made, modelling some necessary changes in the structure.

It was concluded that the system is really effective, and giving up of some narrow tolerances could become simpler and cheaper.

Desenvolvimento e simulação de um sistema inteligente e inovador de compensação de
deformações de uma quinadora

Agradecimentos

Agradeço a todas as pessoas do grupo ADIRA S.A. pelo apoio prestado na realização deste projecto, em especial ao meu orientador na empresa Engenheiro José Bessa Pacheco, ao Engenheiro Alexandre Wragg Freitas e ao Engenheiro Artur Freitas da Costa, pela enorme dedicação que tiveram durante a realização deste projecto.

Agradeço também ao meu orientador da FEUP, Professor Paulo Tavares de Castro pelo apoio e envolvimento que teve neste projecto.

Finalmente aos meus pais e namorada pelo incentivo e paciência.

Desenvolvimento e simulação de um sistema inteligente e inovador de compensação de
deformações de uma quinadora

Índice de Conteúdos

Capítulo 1 – Introdução	1
Apresentação da empresa ADIRA S.A.	1
Projecto realizado na ADIRA S.A.....	2
Desenvolvimento do projecto na ADIRA S.A.	2
Organização e temas abordados no presente relatório.....	3
História das quinadoras	4
Quinagem	6
Constituição das quinadoras	9
Raio mínimo de quinagem.....	11
Força de quinagem.....	12
Objectivo do projecto	13
Patentes	14
Capítulo 2 – Cálculo analítico	27
Parâmetros usados para comparação de resultados	28
Modelos teóricos	29
Análise da rigidez	33
Estudo inicial	36
Capítulo 3 – Cálculo numérico	53
Características do aço usado	55
Tipo de malha usada no software COSMOS	55
Materialização deste modelo	66
Alteração dos apoios.....	68
Modelo Final	75
Circuito Hidráulico	78
Método de controlo.....	80
Capítulo 4 – Resultados.....	81
Capítulo 5 – Conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.....	89
Bibliografia.....	91
Anexo A: Desvios de rectitude.....	95
Anexo B: Desvios de rectitude	101
Anexo C: Desvios de rectitude.....	107
Anexo E: Desvios de rectitude de uma QHD20040/60	123
Anexo F: Desvios de paralelismo de uma QHD20040/60	125

Anexo G: Desvio de rectitude de uma QHD20040	127
Anexo H: Desvios de paralelismo de uma QHD20040	129

Índice de Figuras

Figura 1-Quinagem.....	6
Figura 2-Relação tensão deformação	7
Figura 3-Parâmetros de quinagem.....	8
Figura 4-a) Quinagem livre ou quinagem ao ar; b) Quinagem forçada ou quinagem a fundo...	9
Figura 5-Quinadora ADIRA modelo QIHD 16040	10
Figura 6-Quinagem.....	10
Figura 7-Peça com fissuras.....	11
Figura 8-Variação do raio mínimo sobre a espessura com a diminuição da secção, num ensaio de tracção	12
Figura 9-a) Deformação de ambos os aventais no processo de quinagem; b) peça resultante ..	13
Figura 10-a) Vista frontal da quinadora; b) Sistema aplicado ao avental inferior	14
Figura 11-Sistema de compensação	15
Figura 12- Vista lateral do sistema	15
Figura 13-Mecanismo de compensação das deformações.....	16
Figura 14-Imagem explodida do sistema de bombeado	17
Figura 15-Sistema de compensação através de um cilindro central.....	18
Figura 16-a) Avental inferior intercalado por um material elástico b) Mecanismo lateral	19
Figura 17-“Vê da matriz” variável	19
Figura 18-Mecanismo de compensação adaptado ao avental superior.....	20
Figura 19-Mecanismo para efectuar perfis.....	21
Figura 20-Avental inferior com um material compressível.....	21
Figura 21-Quinadora constituída por um cilindro hidráulico.....	22
Figura 22- Sistema de compensação; a) Vista lateral; b) Vista de topo	23
Figura 23-Sistema de compensação; a) Vista de topo; b) Vista lateral	24
Figura 24-a) Avental superior dividido em duas peças; b) Aventais com forças aplicadas e eventuais deformações.....	25
Figura 25-a) Avental inferior com dois pinos centrais; b) Avental inferior.....	26
Figura 26-Deformação dos aventais de uma quinadora para uma peça quinada entre montantes	28
Figura 27-Deformação da viga que representa o avental	29
Figura 28-Deformação das vigas que representam os dois aventais	29
Figura 29-a) Avental inferior com três apoios; b) Partes constituintes do avental inferior.....	30
Figura 30-Forma idealizada a conferir ao avental	30

Desenvolvimento e simulação de um sistema inteligente e inovador de compensação de deformações de uma quinadora

Figura 31-Possível secção a conferir ao avental.....	31
Figura 32-Modelos considerados para o estudo analítico; a) Modelo 1 constituído por uma viga com três apoios; b) Modelo 2 constituído por uma viga com dois apoios e uma pressão de compensação constante; c) Modelo 3 constituído por uma viga com dois apoios e três almofadas hidráulicas de compensação; d) Modelo 4 constituído por uma viga com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	32
Figura 33-Viga simplesmente apoiada com carga Q1 entre os apoios.....	33
Figura 34-Deformações de vigas com diferente rigidez.....	34
Figura 35- Viga simplesmente apoiada com carga Q1 ligeiramente descentrada.....	35
Figura 36-Influência da rigidez do avental na capacidade para copiar uma deformação; a) Caso 1; b) Caso 2.....	35
Figura 37-Dimensões do avental inferior de uma QHD20040.....	36
Figura 38-Dimensões do avental inferior de uma QHD20040/60.....	37
Figura 39-Diferentes casos de carga simulando os diferentes posicionamentos da peça: a) Caso 1 a peça é colocada do início até meio do avental; b) Caso 2 a peça é colocada desde o montante até meio do avental; c) Caso 3 a peça é colocada do início do avental até ao primeiro montante; d) Caso 4 a peça é colocada entre os montantes	38
Figura 40-Avental inferior constituído por duas estruturas, uma delas com secção em O	53
Figura 41-Avental inferior constituído por duas estruturas, uma delas com secção em U	53
Figura 42-Avental inferior constituído por duas estruturas, uma delas com secção em U	54
Figura 43-a) Avental inferior constituído por três placas; b) Vista em corte (Funcionamento dos cilindros)	55
Figura 44-Avental inferior com quatro rasgos para os cilindros de compensação.....	56
Figura 45-Tensões máximas no avental para o pior estado de carga	56
Figura 46-Avental inferior com um rasgo para cada cilindro de compensação	57
Figura 47-Tensões máximas no avental para o pior estado de carga	58
Figura 48-Avental inferior com um rasgo para cada três cilindros de compensação entre montantes.....	58
Figura 49-Tensões máximas no avental para o pior estado de carga	59
Figura 50-Avental inferior com um rasgo para cada três cilindros de compensação entre montantes.....	60
Figura 51-Tensões máximas no avental para o pior estado de carga	60
Figura 52-Avental inferior com um rasgo para cada três cilindros de compensação entre montantes.....	61
Figura 53-Avental inferior com o rasgo dos cilindros de compensação unido ao apoio	61

Desenvolvimento e simulação de um sistema inteligente e inovador de compensação de deformações de uma quinadora

Figura 54-Tensões máximas no avental para o pior estado de carga	62
Figura 55-Local da tensão máxima no avental.....	63
Figura 56-Avental inferior com um rasgo para cada quatro cilindros de compensação	64
Figura 57-Tensões máximas no avental para o pior estado de carga	64
Figura 58-Deformação do avental móvel e do avental fixo compensado	65
Figura 59-Cilindro de compensação simplificado.....	66
Figura 60-Placa exterior com os rasgos para a colocação dos cilindros de compensação	67
Figura 61-Placa interior com os rasgos para a colocação dos cilindros de compensação	67
Figura 62 Deformação do avental superior pelo estudo analítico e pelo estudo numérico	68
Figura 63-Deformação do avental inferior pelo estudo analítico e pelo estudo numérico.....	69
Figura 64-Modificação dos apoios para um funcionamento em rótula: a) Apoio normal; b) Apoio em rótula	70
Figura 65-Deformação do avental inferior com apoios normais e com apoios em rótula.....	71
Figura 66-Vista frontal da placa interior do avental.....	71
Figura 67-Variação das tensões máximas com o deslocamento dos apoios, na placa interior.	72
Figura 68-Variação dos deslocamentos máximos com o deslocamento dos apoios, na placa interior	72
Figura 69-Vista frontal da placa exterior do avental	73
Figura 70-Variação das tensões máximas com o deslocamento dos apoios, na placa exterior	73
Figura 71-Variação dos deslocamentos máximos com o deslocamento dos apoios, na placa exterior.....	74
Figura 72- Variação das tensões máximas com o deslocamento dos apoios e dos cilindros de compensação.....	75
Figura 73-Disposição das almofadas hidráulicas ao longo do avental	76
Figura 74-Placa exterior final	77
Figura 75-Placa interior final.....	77
Figura 76-Modelo final.....	77
Figura 77-Rasgos aplicados às três placas.....	78
Figura 78-Circuito hidráulico	79
Figura 79-Casos de carga estudados: a) Caso 1; b) Caso 2; c) Caso 3; d) Caso 4; e) Caso 5 ..	81
Figura 80-Deformação dos aventais para o caso 1	82
Figura 81-Desvios de paralelismo para o caso 1	83
Figura 82- Deformação dos aventais para o caso 2	83
Figura 83- Desvios de paralelismo para o caso 2	84
Figura 84- Deformação dos aventais para o caso 3	84

Desenvolvimento e simulação de um sistema inteligente e inovador de compensação de deformações de uma quinadora

Figura 85- Desvios de paralelismo para o caso 3	85
Figura 86- Deformação dos aventais para o caso 4	85
Figura 87-Desvios de paralelismo para o caso 4	86
Figura 88- Deformação dos aventais para o caso 5	86
Figura 89-Desvios de paralelismo para o caso 5	87
Figura 90-a) Deformação do avental normal; b) Deformação do avental com três apoios	95
Figura 91-a) Deformação do avental normal; b) Deformação do avental com três apoios	96
Figura 92-a) Deformação do avental com dois apoios e uma almofada hidráulica; b) Deformação do avental com dois apoios e três almofadas (sem ajuste à peça)	96
Figura 93-a) Deformação do avental com dois apoios e três almofadas; b) Deformação da peça descentrada (com ajuste à peça)	97
Figura 94-a) Deformação do avental normal; b) Deformação do avental com três apoios; c) Deformação do avental com três ou seis almofadas	98
Figura 95-a) Deformação do avental norma; b) Deformação do avental com três apoios; c) Deformação do avental com dois apoios e uma almofada hidráulica; d) Deformação do avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas (sem ajuste à peça); e) Deformação do avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas (com ajuste à peça); f) Deformação da peça para um avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	99
Figura 96-a) Deformação do avental normal; b) Deformação do avental com três apoios	101
Figura 97- a) Deformação do avental normal (sem ajuste dos apoios); b) Deformação do avental normal (com ajuste dos apoios)	102
Figura 98- a) Deformação do avental com três apoios(sem ajuste dos apoios); b) Deformação do avental com três apoios(com ajuste dos apoios)	102
Figura 99- a) Deformação do avental com dois apoios e uma almofada hidráulica; b) Deformação do avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas (sem ajuste à peça); c) Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas (com ajuste à peça); d) Deformação da peça descentrada	103
Figura 100- a) Deformação do avental normal; b) Deformação do avental com três apoios (sem ajuste dos apoios); c) Deformação do avental com três apoios (com ajuste dos apoios)	104
Figura 101- a) Deformação do avental normal sem ajuste dos apoios; b) Deformação do avental normal com ajuste dos apoios; c) Deformação do avental com três apoios (sem ajuste dos apoios); d) Deformação do avental com três apoios (com ajuste dos apoios); e) Deformação do avental com dois apoios e uma almofada hidráulica; f) Deformação do avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas (sem ajuste à peça); g) Deformação do avental com dois apoios e	

Desenvolvimento e simulação de um sistema inteligente e inovador de compensação de
deformações de uma quinadora

três almofadas hidráulicas (com ajuste à peça); h) Deformação da peça para um avental com
dois apoios e três almofadas hidráulicas..... 106

Desenvolvimento e simulação de um sistema inteligente e inovador de compensação de
deformações de uma quinadora

Índice das Tabelas

Tabela 1-Valores das pressões, dos momentos máximos e do desvio de paralelismo	36
Tabela 2-Valores dos desvios para uma quinagem de 0 a 3 metros numa QHD20040/60	40
Tabela 3-Valores dos desvios para uma quinagem 1,5 a 2,5 metros numa QHD20040/60	41
Tabela 4-Valores dos desvios para uma quinagem de 0 a 1,5 metros numa QHD20040/60 ...	42
Tabela 5-Valores dos desvios para uma quinagem 1,5 a 4,65 metros numa QHD20040/60 ...	43
Tabela 6-Valores dos desvios para uma quinagem 2 a 3 metros numa QHD20040/60	44
Tabela 7-Valores dos desvios para uma quinagem 0 a 3 metros numa QHD20040	45
Tabela 8-Valores dos desvios para uma quinagem 0,45 a 1,45 metros numa QHD20040	46
Tabela 9-Valores dos desvios para uma quinagem 0 a 0,45 metros numa QHD20040	47
Tabela 10- Valores dos desvios para uma quinagem 0,45 a 3,6 metros numa QHD20040	48
Tabela 11-Valores dos desvios para uma quinagem 1 a 2 metros numa QHD20040	49
Tabela 12 – Pressão nas almofadas hidráulicas do caso 1.....	82
Tabela 13 – Desvio de paralelismo do caso 1	83
Tabela 14 – Pressão nas almofadas hidráulicas do caso 2.....	83
Tabela 15 – Desvio de paralelismo do caso 2	84
Tabela 16 – Pressão nas almofadas hidráulicas do caso 3.....	84
Tabela 17 – Desvio de paralelismo do caso 3	85
Tabela 18 – Pressão nas almofadas hidráulicas do caso 4.....	85
Tabela 19 – Desvio de paralelismo do caso 4	86
Tabela 20 – Pressão nas almofadas hidráulicas do caso 5.....	86
Tabela 21 – Desvio de paralelismo do caso 5	87

Desenvolvimento e simulação de um sistema inteligente e inovador de compensação de deformações de uma quinadora

Capítulo 1 – Introdução

Apresentação da empresa ADIRA S.A.

Este projecto foi realizado na empresa ADIRA S.A., fundada em 1956 por António Dias Ramos. A empresa inicia o seu percurso com o fabrico de tornos, fresadoras, plainas e limadoras, mas com o decorrer do tempo foi-se especializando na produção de máquinas-ferramenta para o trabalho de chapa. Iniciou a produção das primeiras guilhotinas mecânicas Portuguesas em 1961, e lançou a primeira quinadora hidráulica Portuguesa em 1964.

Nos anos 70, foi lançado o primeiro comando numérico Português, o Adiramatic concebido em parceria com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, dando origem à QIH-DNC.

Com um constante investimento na pesquisa científica e desenvolvimento tecnológico, cooperando com universidades e prestigiados laboratórios de pesquisa, prestando um importante serviço de apoio pós-venda, a ADIRA S.A. adquiriu uma longa experiência, permitindo hoje em dia ser uma empresa sólida, inovadora com prestígio e qualidade, exportando para mais de meia centena de países. É líder ibérica no fabrico de quinadoras e guilhotinas, um estatuto conquistado com a presença em diferentes áreas de negócio, desde os sectores da indústria automóvel, indústria aeronáutica, construção naval, telecomunicações, computadores, energias renováveis, ambiente, mobiliário metálico e de escritório, artigos de design, construções metálicas, elevadores, armaduras eléctricas, equipamentos de frio e AVAC. Na sua carteira de clientes constam marcas e organizações como US Navy, NASA, Lockheed, GM, Vulcano, OGMA, Martifer, Salvador Caetano, Siemens, Motorola, EFACEC, Nestlé, Thyssen, Bombardier, TAP e Air France.

A Adira foi o primeiro fabricante europeu a ser certificado pela ISO 9000 e o primeiro fabricante mundial a ter a gama completa de produtos com a certificação CE.

A qualidade do desempenho da Adira tem sido reconhecida, nacional e internacionalmente, através da obtenção de diversos prémios:

- Em 1979, António Dias Ramos recebe a Comenda da Ordem de Mérito Industrial;
- Na década de 80, a Adira obtém o Óscar Europeu das Actividades Económicas (da Câmara de Comércio Europeia);

Introdução

- Na década de 90 recebe os prémios para Trabalhos de Computação Gráfica da Intergraph e de Design para a Indústria;
- Desde 1992 que já foi reconhecida como PME – Prestígio pelo IAPMEI-BNU oito vezes.

Actualmente, a oferta da empresa centra-se em dois grandes tipos de produtos: as máquinas de corte da chapa (centros de corte a laser e guilhotinas hidráulicas) e as máquinas de deformação da chapa (quinadoras hidráulicas e células robotizadas de quinagem).

Ao longo do seu percurso foram criadas duas empresas, a Oxisol que se ocupa de toda a construção soldada e a Normáquina que se encarrega da importação e comercialização de produtos complementares aos seus. Em 1998 a empresa adquiriu a marca Guifil, um ex-concorrente. Com esta marca a ADIRA S.A. procura não perder terreno para os fabricantes de máquinas de menos tecnologia, mas com preços inferiores.

Projecto realizado na ADIRA S.A.

Este projecto realizado na empresa ADIRA S.A. vai de encontro com os objectivos traçados pela empresa. Consiste no desenvolvimento e concepção de um sistema inovador de compensação dos aventais de uma quinadora, capaz de garantir um ângulo constante ao longo de uma quinagem, sobretudo quando se realizam quinagens fora do centro e em diferentes locais ao longo do comprimento. Este sistema procura, de uma forma simples e económica e não fugindo às exigências do mercado empresarial, elevar as quinadoras a um novo patamar de precisão.

Desenvolvimento do projecto na ADIRA S.A.

Este projecto foi constituído por três fases. A primeira foi composta por uma aprendizagem inicial sobre o processo de quinagem, a constituição e tipos de quinadoras, e os métodos e práticas realizadas pela empresa. Foi também executado um longo estudo e análise sobre os métodos, sistemas e patentes presentes em mercado.

Numa segunda fase desenrolou-se o desenvolvimento teórico de possíveis soluções a conferir ao problema. Após uma longa comparação, análise e aperfeiçoamento obteve-se o sistema pretendido.

Numa terceira fase efectuou-se um estudo numérico, aplicando o método dos elementos finitos, ao sistema desenvolvido analiticamente. Foram realizados aperfeiçoamentos e modificações necessárias. Estudou-se o processo de materialização do sistema.

No decorrer do projecto foi necessária a utilização de ferramentas de trabalho disponíveis na empresa, como Solid Edge, Cosmos e Excel.

O desenvolvimento do projecto na ADIRA S.A. teve sempre o atento acompanhamento do orientador da empresa, e também, dum conjunto de profissionais da empresa que em muito contribuíram, com o seu conhecimento e larga experiência, para a sua realização.

Organização e temas abordados no presente relatório

O presente trabalho é constituído por 5 capítulos. No primeiro capítulo é feita uma apresentação da empresa onde o projecto decorreu e uma introdução ao projecto realizado. É feito um resumo do nascimento das máquinas ferramenta e são sintetizados os elementos mais importantes de uma quinadora, bem como as suas diferentes constituições, os diferentes métodos de quinagem, os seus erros inerentes e suas causas. Também aqui é feita uma apresentação dos métodos usados pelas empresas envolvidas nesta actividade que procuram resolver este problema, e algumas das suas patentes.

No segundo capítulo são criados diferentes modelos analíticos que procuram recriar as várias soluções adoptadas para o avental de uma quinadora. São estudados, verificados e comparados os diferentes modelos. É então escolhido um e iniciada a fase de materialização.

No terceiro capítulo é feito um estudo, análise e materialização do modelo desenvolvido através do método dos elementos finitos usando o software COSMOS. Aqui são encontradas as melhores soluções estruturais e resolvidos alguns problemas funcionais. São abordados dois métodos de controlo, já que sem um bom funcionamento destes todo este sistema torna-se ineficaz.

No quarto capítulo são apresentados os resultados e na quinto capítulo as conclusões, bem como possíveis trabalhos futuros que tornariam esta quinadora extremamente inteligente e precisa.

História das quinadoras

Desde a pré-história que o Homem utiliza e desenvolve ferramentas para o auxiliar nas suas tarefas. As primeiras ferramentas desenvolvidas datam da idade da pedra, onde o Homem fabricava, para cada actividade, uma ferramenta diferente: raspadores, pontas e arpões, serras, facas, brocas, etc.

Após a descoberta dos metais, as ferramentas de pedra foram substituídas por ferramentas metálicas. Da necessidade de criar um movimento de rotação das peças ou da própria ferramenta para auxiliar o Homem a trabalhar nos metais, surgem duas máquinas-ferramenta rudimentares: o furador a arco (desenvolvido pelos egípcios por volta de 1500 AC) e o torno arco de violino (ainda utilizado residualmente em alguns países). Estes instrumentos de accionamento giratório alternativo compostos por um arco e uma corda necessitavam da intervenção manual por parte do Homem.

Os principais acontecimentos que antecederam a revolução industrial estão relacionados com o desenvolvimento e aperfeiçoamento do torno e com a introdução da tecnologia hidráulica.

Em 1250 nasceu o torno accionado por pedal, representando um grande avanço face ao de accionamento por arco de violino pois permitia que ambas as mãos estivessem livres para trabalhar as peças metálicas.

Nos finais da Idade Média as principais máquinas-ferramenta utilizadas eram a: amoladora com pedra giratória abrasiva, o furador a arco e o torno de movimento contínuo. Nesta altura iniciou-se o fabrico de engrenagens metálicas, principalmente em latão, que eram aplicadas em instrumentos de astronomia e relógios.

Bramach, em 1777, utilizando um princípio desenvolvido por Blaise Pascal, patenteia a invenção da prensa hidráulica. No entanto pensa-se que tenham sido os irmãos Perier, entre 1769 e 1812, a desenvolver as prensas hidráulicas para a cunhagem da moeda.

Em 1840, Cavé inicia a fabricação de prensas hidráulicas de elevada pressão.

Embora a máquina a vapor de James Watt tenha sido concebida em 1765, só por volta de 1780 conseguiu construir uma máquina válida para fins industriais.

Foi a pedido de James Watt que, em 1775, John Wilkinson construiu uma mandriladora tecnicamente mais avançada e possuidora de maior precisão, accionada, como as suas antecessoras, por uma roda hidráulica.

A necessidade de melhorar a precisão das máquinas foi primeiramente admitida por Henry Maudslay, um dos principais fabricantes de máquinas-ferramenta. Esta necessidade estava directamente ligada às máquinas cujo objectivo era fabricar outras, no sentido de

uniformizar quer as medidas das peças produzidas quer das próprias máquinas (em 1805, chegou-se a construir um micrómetro de parafuso que utilizava para medir as peças acabadas).

Em 1897 constrói-se um torno para cilindrar, que marcou uma nova etapa no fabrico de máquinas-ferramenta através da introdução de novos elementos, como a construção totalmente metálica e a inclusão de guias planas de grande precisão para o deslizamento do carro porta-ferramentas.

O desenvolvimento industrial do séc. XIX (máquinas a vapor, barcos, automóveis, maquinaria têxtil, material para os caminhos de ferro, etc.) está directamente ligado ao desenvolvimento de diversos tipos de máquinas-ferramenta e processos de trabalho aplicados ao fabrico de peças metálicas de todo o tipo.

Com a entrada no séc. XX surgiram novas oportunidades para o desenvolvimento da indústria e das máquinas-ferramenta. O acontecimento mais relevante foi a utilização da electricidade para fins industriais. Os motores de corrente contínua, fabricados em pequena escala, e os de corrente alternada recebem um grande impulso neste início de século, substituindo as máquinas a vapor e as turbinas que, até ao momento, accionavam as transmissões de energia aos estabelecimentos industriais (mais tarde, acoplaram-se directamente às máquinas-ferramenta).

O grande desenvolvimento do séc. XX foi a aplicação do sistema CN (controlo numérico) às máquinas-ferramenta, conseguido em 1948 por John Parson.

A partir dos anos setenta, com o desenvolvimento da micro-electrónica, o CN passa a ser CNC pelo facto de ser incorporado um computador no sistema de controlo.

Desde os inícios da quinagem até aos dias de hoje, o homem evoluiu de uma quinagem feita manualmente com um martelo para métodos extremamente automatizados. O desenvolvimento de métodos mais rápidos, precisos, automatizados e mais baratos são agora uma realidade constante a um ritmo evolutivo nunca antes atingido.

Quinagem

A quinagem é um processo de conformação plástica que consiste na obtenção de uma dobra linear de uma chapa plana. Através da penetração de um punção numa matriz, como mostra a figura 1, dá-se o processo de quinagem da peça. O ângulo da dobra pretendido para a chapa vai depender da profundidade de penetração do punção na matriz.

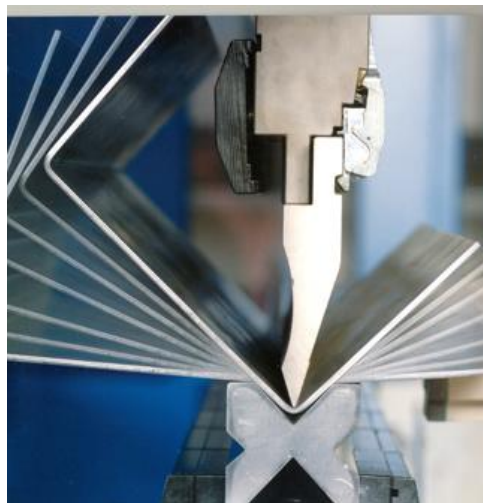


Figura 1-Quinagem

Hoje em dia vários ramos da indústria utilizam este processo para fabricar inúmeras peças para os mais variados fins. Alguns exemplos são: peças integrantes de maquinarias no ramo da agricultura; carroçarias de alguns carros na indústria automóvel; execução de perfilados diversos, desde os utilizados em trens de aterragem, aos de reforço de superfície de comando até à execução das próprias asas, na indústria aeronáutica; construção de baldes de carregamento e vagonetas de transporte na indústria extractiva; execução de estruturas metálicas de edifícios, caleiras de escoamento de águas fluviais, portas de acesso, aparelhos de ar condicionado na indústria de construção civil; construção dos rails de protecção de estradas, à sinalização vertical na indústria das vias de comunicação; fabrico de secretarias e cadeiras, arquivos e armários, armaduras de iluminação, tectos falsos, frigoríficos, arcas frigoríficas, fornos, fogões, chassis de computadores, etc.

A quinagem é um processo de flexão elasto-plástico aplicado a uma chapa plana. À medida que se dá a penetração do punção na matriz a chapa sofre uma deformação localizada na zona do punção. Assim que ultrapassa o limite elástico da chapa a ser quinada esta deformação torna-se numa deformação permanente com as características pretendidas, ou

seja, na dobra pretendida. Assim que é retirada a força exercida pelo punção, a peça sofre um retorno elástico. Este retorno é fruto da deformação elástica sofrida pela chapa.

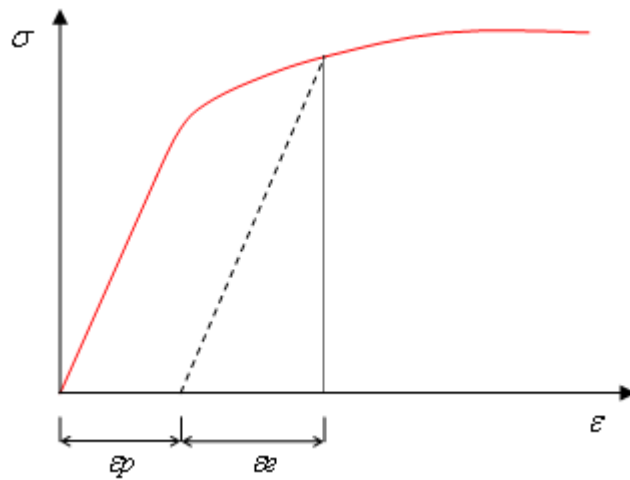


Figura 2-Relação tensão deformação

ϵ_e - Deformação elástica.

ϵ_p - Deformação plástica.

A dobra criada é constituída por um raio interior e por um ângulo de quinagem, na figura 3 representados por r_i e por β . O raio interior vai depender do valor da abertura da matriz, também designado por “Vê da matriz”, e pelo valor do raio do punção. O ângulo de quinagem vai depender também do “Vê da matriz” e da profundidade de penetração do punção.

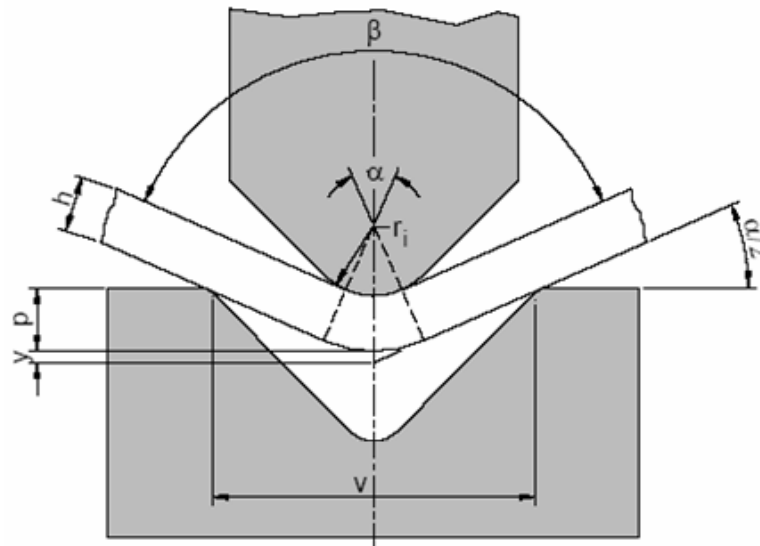


Figura 3-Parâmetros de quinagem

V – “Vê da matriz”

p – Profundidade de penetração

ri – Raio interior

y – Retorno elástico

β - Ângulo de quinagem

h – Espessura da chapa

Existem basicamente duas técnicas de quinagem. Uma designada por quinagem forçada ou por quinagem a fundo (figura 4b) e a outra designada por quinagem livre ou quinagem ao ar (figura 4a). Na quinagem forçada a chapa é esmagada entre o punção e a matriz sendo assim forçada a moldar-se ao contorno das ferramentas. Na quinagem livre a chapa sofre uma flexão plástica simples onde não há a total penetração do punção, podendo, esta situação, ser comparável a uma viga simplesmente apoiada com uma força a meio vão.



Figura 4-a) Quinagem livre ou quinagem ao ar; b) Quinagem forçada ou quinagem a fundo

Algumas das vantagens do primeiro caso passam por uma melhor repetição do ângulo de quinagem e redução do retorno elástico. Mas em contrapartida são necessárias forças extremamente elevadas quando comparadas com uma quinagem livre. Envolve um grande desgaste nas ferramentas e necessita de um par punção-matriz para cada ângulo de quinagem.

A quinagem livre, frequentemente usada, necessita de menos força o que provoca menor desgaste nas ferramentas. Com um par punção-matriz é possível obter os mais diversos ângulos embora com uma precisão relativamente limitada.

Existem então, na quinagem livre e para um conjunto punção-matriz, dois parâmetros que a regulam: a força e a profundidade.

Constituição das quinadoras

Basicamente as quinadoras são constituídas por um avental inferior onde está acoplada a matriz e por um avental superior onde está acoplado o punção. Estes aventais estão ligados a dois montantes que fazem parte da estrutura da quinadora. Na figura 5 e 6 são ilustrados alguns elementos principais de uma quinadora.



Figura 5-Quinadora ADIRA modelo QIHD 16040

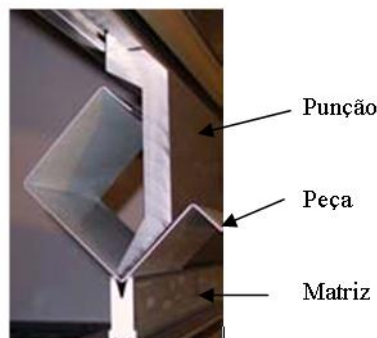


Figura 6-Quinagem

Existem dois tipos de quinadoras: a mecânica e a hidráulica. Nas quinadoras mecânicas o movimento do avental é transmitido por um volante de inércia que acumula energia cinética. Este é impulsionado por um motor de accionamento e, através de uma embraiagem, transmite o seu movimento a uma unidade de redução, que por sua vez transmite movimento a um sistema de biela-manivela, o qual produz o movimento alternado do avental.

As quinadoras hidráulicas utilizam cilindros hidráulicos para movimentar o avental móvel e podem ter um, dois ou mais cilindros.

Actualmente o mercado de quinadoras mecânicas praticamente não existe. As quinadoras hidráulicas sobressaíram devido a: elevados cursos disponíveis sendo extremamente simples o ajuste dos pontos mortos superior e inferior e do ponto de mudança de velocidade; o tempo de duração da carga pode ser facilmente ajustado; a facilidade de introdução de um comando sensível, movimentando o avental sempre que pressionado e

bloqueando o avental quando não premido, acrescentando alguma segurança; e também o facto de serem necessárias menos aptidões ao operador deste tipo de quinadoras.

Existem dois tipos principais de quinadoras: as ascendentes e as descendentes. Na quinadora ascendente o avental inferior é o avental móvel e o avental superior é o avental fixo. Na quinadora descendente passa-se o contrário, o avental móvel é o avental superior e o avental fixo é o avental inferior.

Algumas das vantagens da quinagem ascendente em relação à descendente são:

- 1-A segurança – para situações de falha de energia, o cair por gravidade do avental móvel, não coloca em risco o operador da máquina.
- 2-A dimensão – o facto de não necessitarem de dimensões tão grandes pode trazer vantagens a nível de transporte.
- 3-O funcionamento – é mais fácil para o operador trabalhar com esta máquina.
- 4-A simplicidade e a precisão – o uso de cilindros de simples efeito e a possibilidade de utilizar um terceiro cilindro no centro do avental móvel, usual neste tipo de quinadoras.

Por estas razões as quinadoras ascendentes eram as mais utilizadas. Contudo com a introdução, por parte das organizações reguladoras, das normas de segurança tornaram as descendentes nas mais comuns, uma vez que as regras de segurança tornaram semelhantes os custos de ambos os tipos de quinadoras. Estas têm como principal vantagem o curso de quinagem que permite ser longo sem afectar a altura de trabalho do operador e a operação de quinagem se desenrolar com o trabalho fixo.

Raio mínimo de quinagem

O raio mínimo de quinagem é aquele para o qual surgem fissuras à superfície da chapa (figura 7).

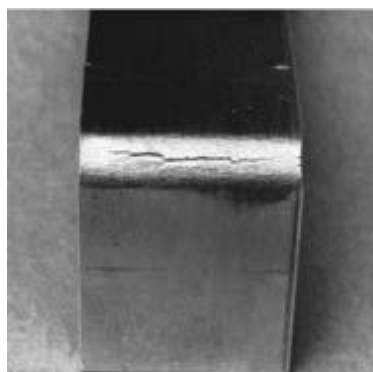


Figura 7-Peça com fissuras

Introdução

Para evitar estas fissuras, existem métodos de determinar este raio. Métodos empíricos ou usando ábacos construídos com base em ensaios experimentais.

De seguida é apresentado um gráfico obtido experimentalmente.

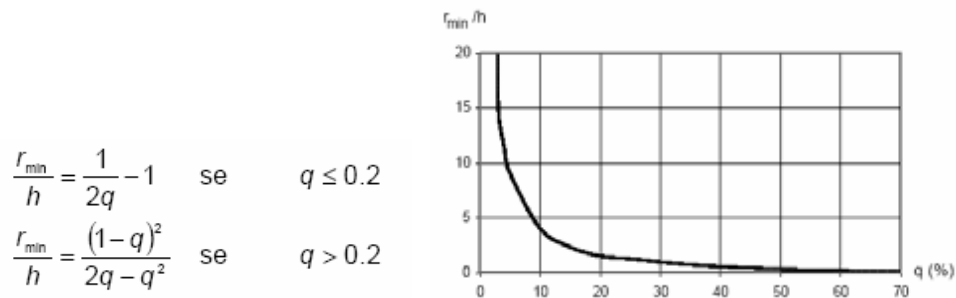


Figura 8-Variação do raio mínimo sobre a espessura com a diminuição da secção, num ensaio de tracção

onde:

$r_{\min}$ – raio interior mínimo,

q – percentagem de diminuição da secção num ensaio de tracção,

h – espessura da chapa [mm].

Este raio depende da direcção de laminagem, obtendo-se os raios mínimos mais pequenos quando esta direcção se encontra perpendicular à quinagem. Também depende do tipo de material e da abertura do “Vê da matriz”, sendo esta relação normalmente dada por, (J. Bessa Pacheco, 1992):

$$r_i \geq \frac{5}{32} V \quad [1]$$

r_i – raio interior mínimo,

V – abertura do “Vê da matriz” [mm].

Força de quinagem

A força requerida para quinar uma peça depende da abertura do “Vê da matriz”, da espessura da chapa a quinar, do comprimento da chapa a quinar e da tensão de ruptura da chapa. Um cálculo simplificado normalmente usado consiste em, (J. Bessa Pacheco, 1992):

$$F = k * \frac{\sigma * h^2 * l}{v} \quad [2]$$

onde $k = 1 + 4 * h / v$

e

σ - Tensão de ruptura da chapa [daN/mm²],

h – espessura da chapa [mm],

l – comprimento da chapa [mm],

V – abertura do “Vê da matriz” [mm].

Normalmente a abertura do “Vê da matriz” é seis vez maior que a espessura da chapa.

Objectivo do projecto

No processo de quinagem de chapa, devido às elevadas forças exercidas, ocorrem deformações em toda a estrutura da quinadora. Estas deformações são extremamente prejudiciais nos elementos de contacto com a peça, na matriz e no punção, porque perdem a sua rectitude ao longo da dobra e também o seu paralelismo, provocando uma incorrecta dobragem da peça (figura 9a). Esta normalmente adquire um ângulo de quinagem maior no centro que nas extremidades como ilustra a figura 9b.

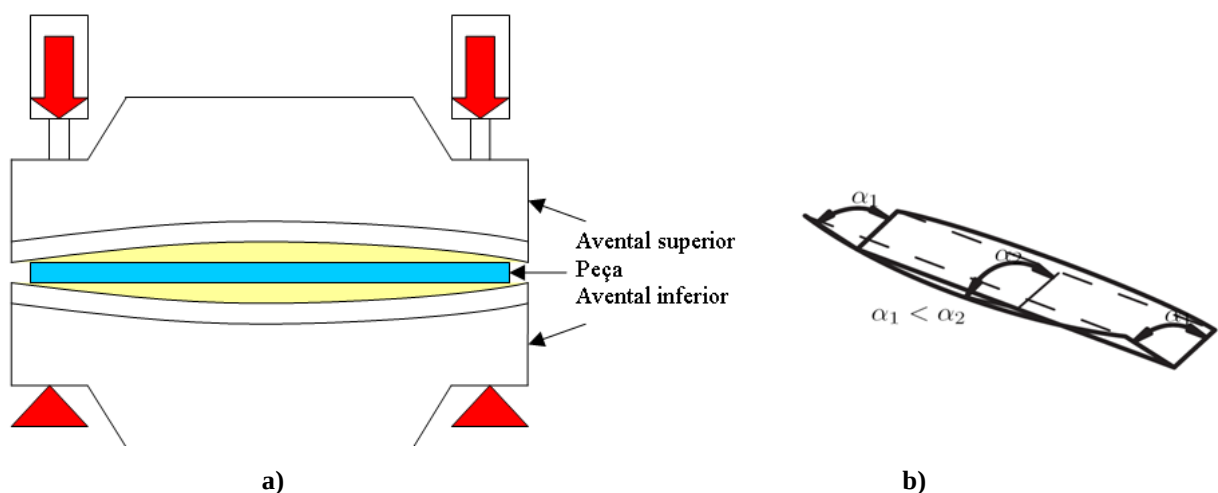


Figura 9-a) Deformação de ambos os aventais no processo de quinagem; b) peça resultante

Introdução

O presente projecto realizado na empresa ADIRA S.A. teve como objectivo o desenvolvimento e validação de um sistema inovador de compensação de deformação numa quinadora.

Patentes

Existem vários métodos para anular ou compensar a deformação dos aventais. São aqui referidas algumas ideias patenteadas; enquanto umas são colocadas em prática pelas empresas que projectam e produzem estas máquinas-ferramenta, outras não passam de ideias.

- “Press brake with active lower table”; inventor Claude Gascoin, patente pertencente à empresa Amada Europe (2000):

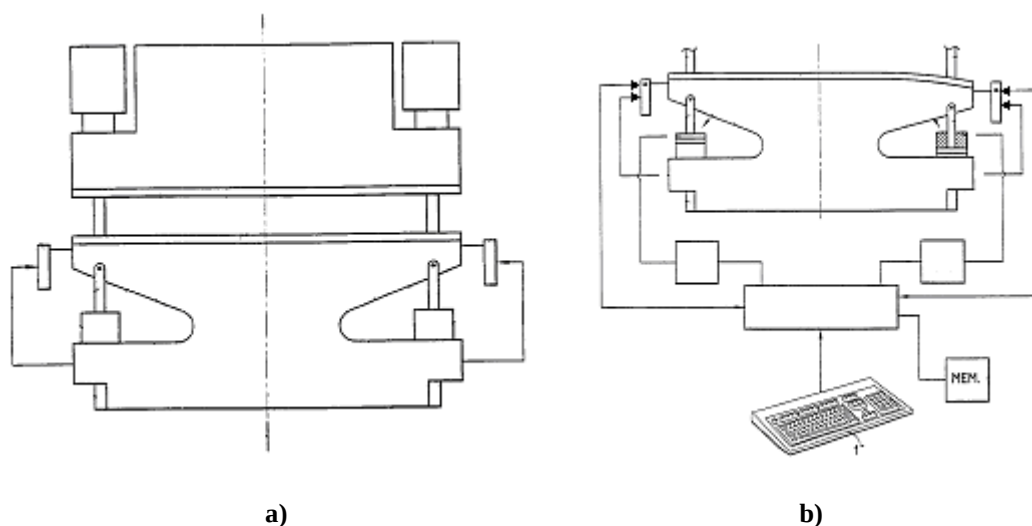


Figura 10-a) Vista frontal da quinadora; b) Sistema aplicado ao avental inferior

Este sistema aplicado ao avental inferior fixo tenta compensar, isto é, copiar a deformação do avental superior. O avental inferior possui uns rasgos laterais simétricos, como mostra a figura 9a, onde são colocados dois cilindros que actuam no sentido de deformar o avental procurando copiar a deformação do avental superior.

- “Compensation device for a press brake”; inventor Bruno J. Pelech (2000):

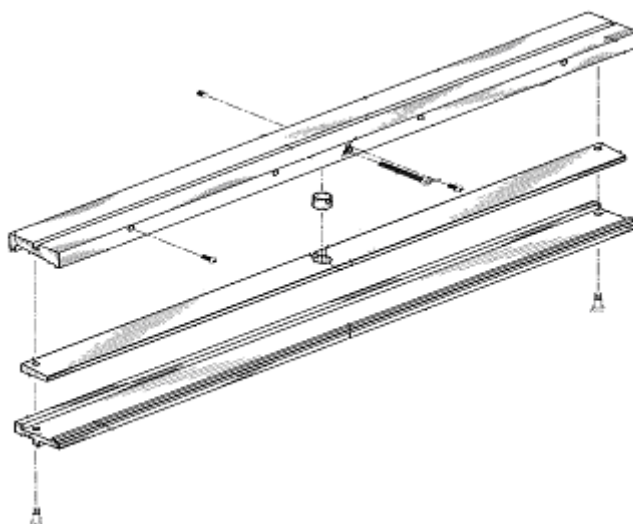


Figura 11-Sistema de compensação

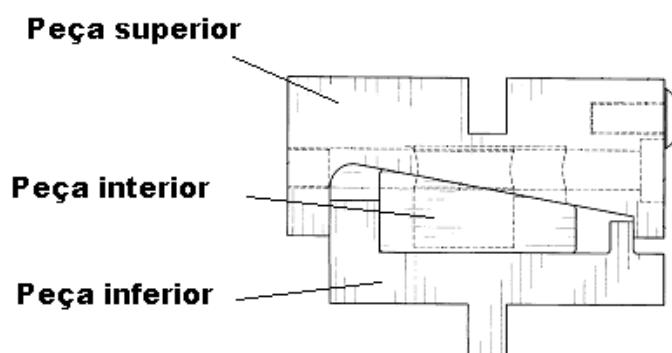


Figura 12- Vista lateral do sistema

Sistema constituído por três partes, duas exteriores que envolvem uma terceira, onde a parte interior vai ser ligeiramente deslocada no seu centro, através de um parafuso, provocando um deslocamento vertical da parte superior relativamente à parte inferior na zona central do sistema. Isto permite um deslocamento vertical da zona central do avental, ou seja, é sistema de compensação para quinagens centradas no avental.

Introdução

- “Apparatus and method for overcoming angular deviations in a workpiece”; inventor John Christian Tolkamp (2004):

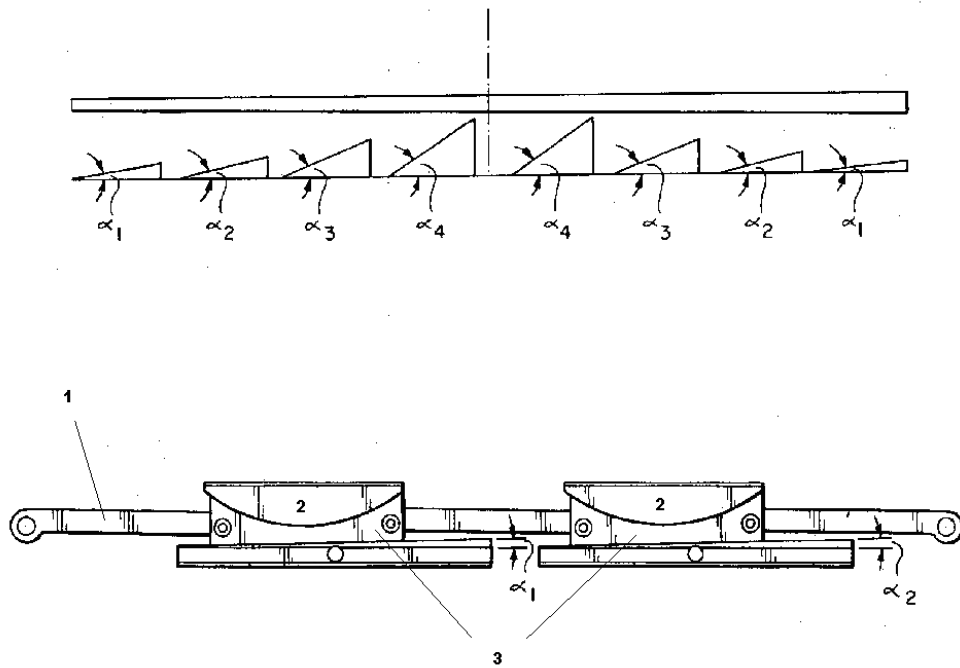


Figura 13-Mecanismo de compensação das deformações

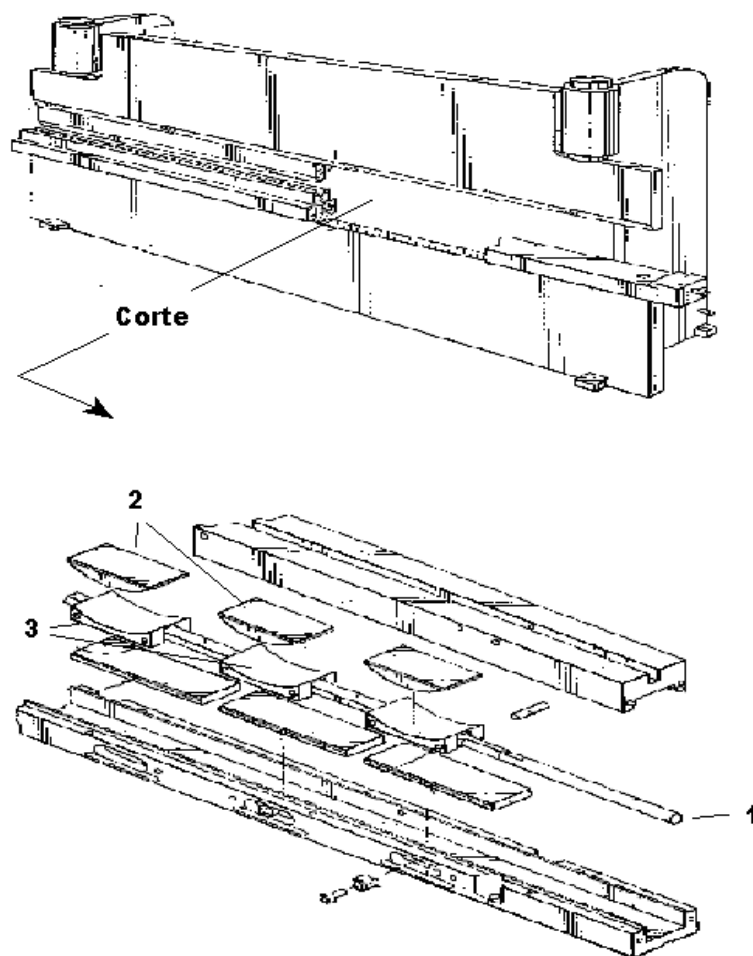


Figura 14-Imagem explodida do sistema de bombeado

Sistema semelhante ao anterior, também inserido na parte superior do avental fixo, designado por sistema de bombeado. Com o deslocamento horizontal da peça 1 da figura 13 as peças semicilíndricas 2 vão deslocar-se em relação às peças 3, as quais estão inclinadas na horizontal, com ângulos diferentes ao longo do avental. Estes ângulos são mais acentuados no centro do avental provocando nesta zona um maior deslocamento vertical. Também este sistema de compensação é aplicado para quinagens centradas no avental.

- “Deflection compensating assembly for a press brake”; inventor Raymond J. Graf, patente pertencente à Cincinnati Incorporated (1986):

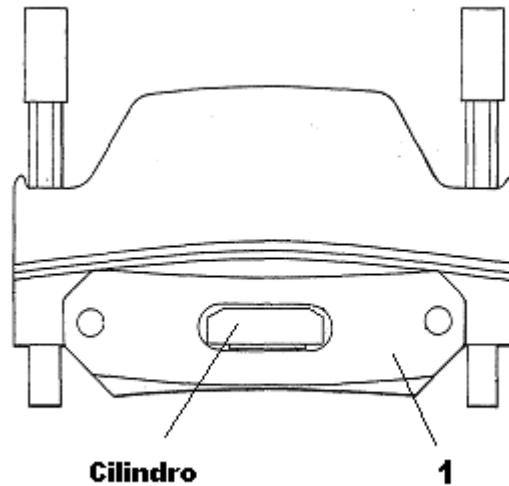


Figura 15-Sistema de compensação através de um cilindro central

Colocação de um terceiro cilindro no centro do avental inferior, encontrando-se este apoiado numa estrutura exterior 1, transmitindo a sua força e conseqüente deformação ao avental inferior. Também este sistema de compensação está dirigido para quinagens na zona central do avental.

- “Deflection compensating press brake”; inventor Donald Swenson, patente pertencente à Niagara Machines & Tool Works (1972):

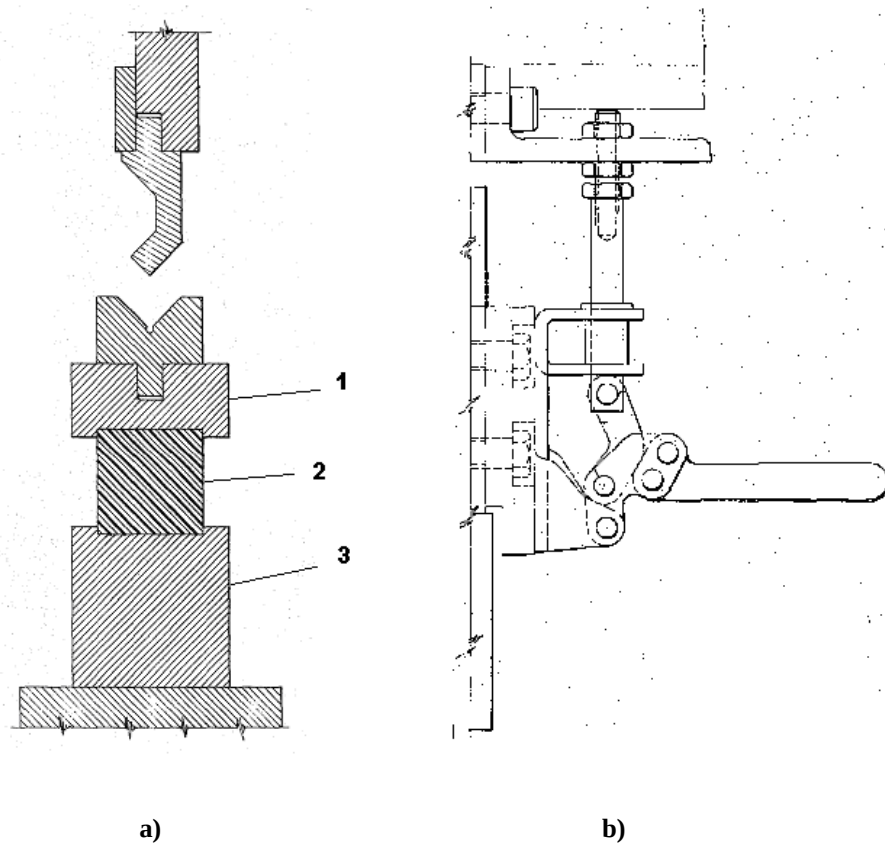


Figura 16-a)Avental inferior intercalado por um material elástico b)Mecanismo lateral

O avental inferior é dividido em duas partes e intercalado com um material com muita elasticidade 2. Existe também um mecanismo lateral que permite a aproximação da peça 1 com a peça 3, pressionando assim lateralmente o material elástico 2.

- “Apparatus for bending sheet material”; inventor autor Cornelis H. Liet (1987):

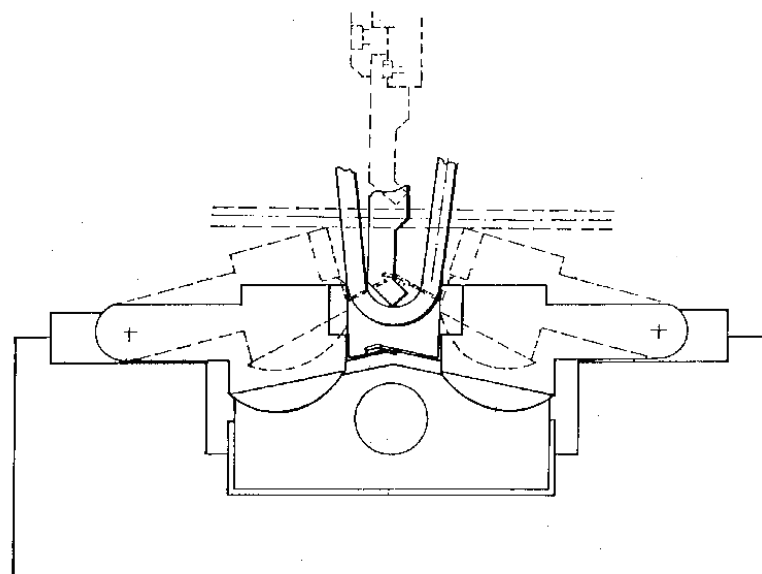


Figura 17-“Vê da matriz” variável

Introdução

Este mecanismo permite regular a abertura do “vê” da matriz à medida que se vai quinando. A matriz é constituída por duas peças que rodam segundo dois pontos e que ao fazerem-no aumentam ou diminuem a distância entre elas, isto é, permitem diminuir o “vê da matriz” à medida que se vai dando a quinagem. Tem como grande vantagem uma força de quinagem exigida mais baixa, logo menor deformação dos aventais.

-“Device for handling the upper moving table carrying the punch in a bending press”; inventor Antonio Manini; a patente pertence à Schiavi Macchine Industriali S.p.A., (2007):

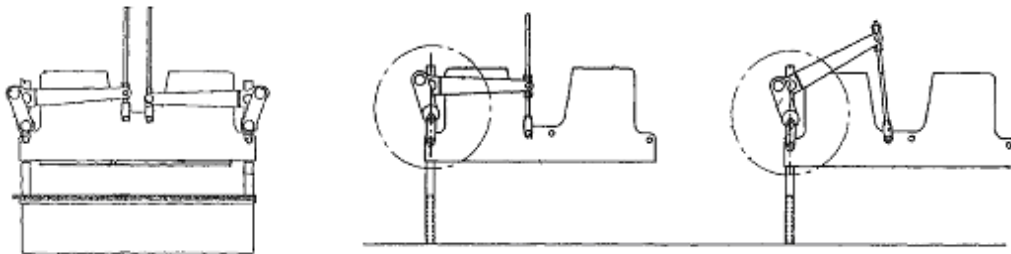


Figura 18-Mecanismo de compensação adaptado ao avental superior

Consiste num mecanismo que, através de dois cilindros hidráulicos, aplica um deslocamento vertical nas extremidades do avental superior e desta forma procura copiar a deformação do avental inferior.

- “Method of making lambda beams”; inventor Joseph R. Driear; a patente pertence a Kelley Company Inc. (1984):

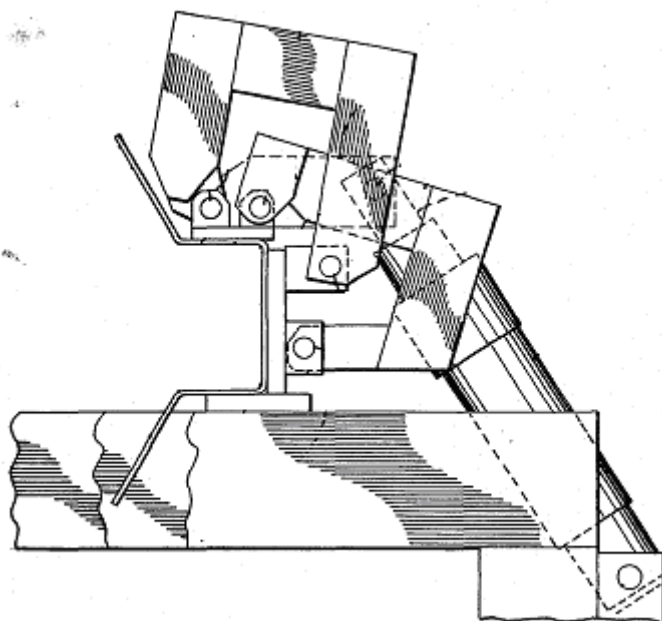


Figura 19-Mecanismo para efectuar perfis

Este mecanismo, constituído por um ou mais cilindros, confere à chapa alguns perfis diferentes.

- “Deflection compensating assembly for fabricating machine tools”; inventores Francois Gabella, Raymond J. Graf e Carl W. Koors; a patente pertence à Cincinnati Incorporated (1986).

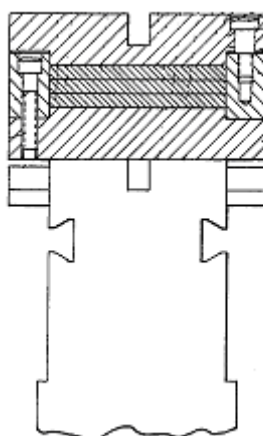


Figura 20-Avental inferior com um material compressível

Uma camada de poliuretano compressível é colocada entre o avental inferior e a matriz, efectuando a compensação para quinagens a fundo mas não para quinagens ao ar.

-“Variable pressure fluid actuated brake beam compensation”; inventor Walter Ernst (1958).

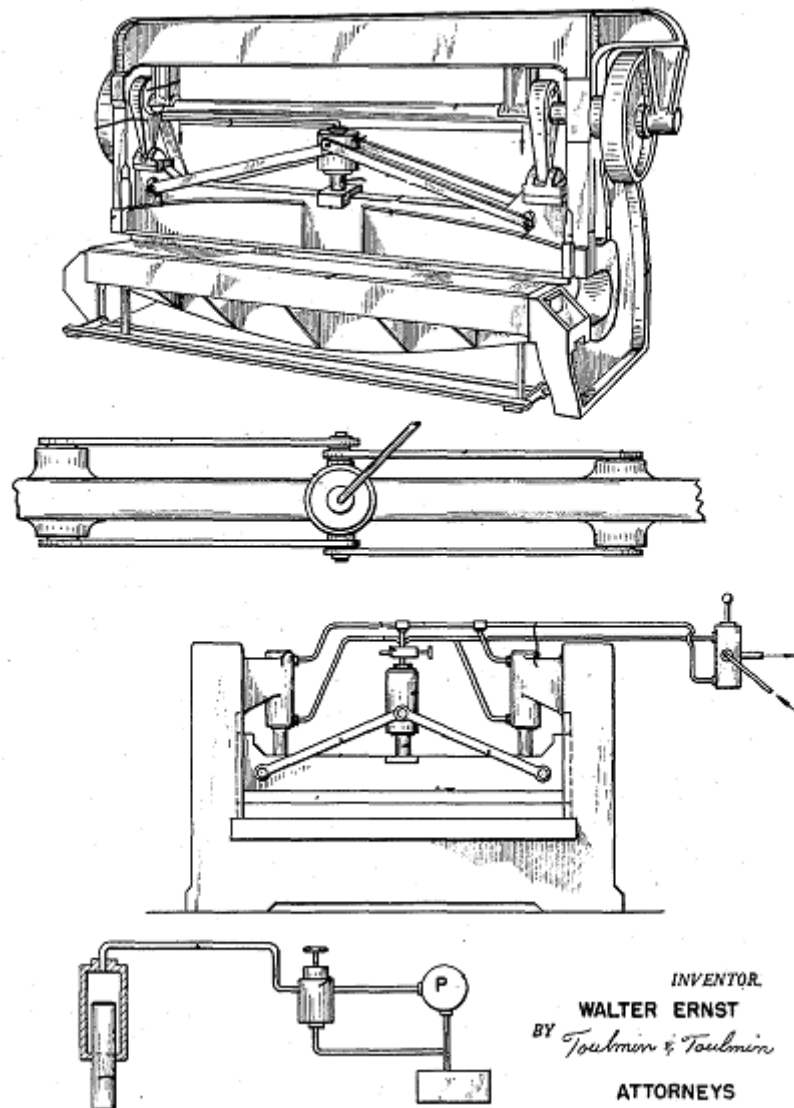


Figura 21-Quinadora constituída por um cilindro hidráulico

A colocação de um cilindro hidráulico no centro do avental permite reduzir a sua deformação nesta zona. Através de um sistema mecânico são transmitidas as forças aos extremos do avental. O adicionar de mais dois cilindros colocados nos extremos do avental também aqui é patenteado.

- “Press brake deflection compensation device”; inventor David L. Houston (1990).

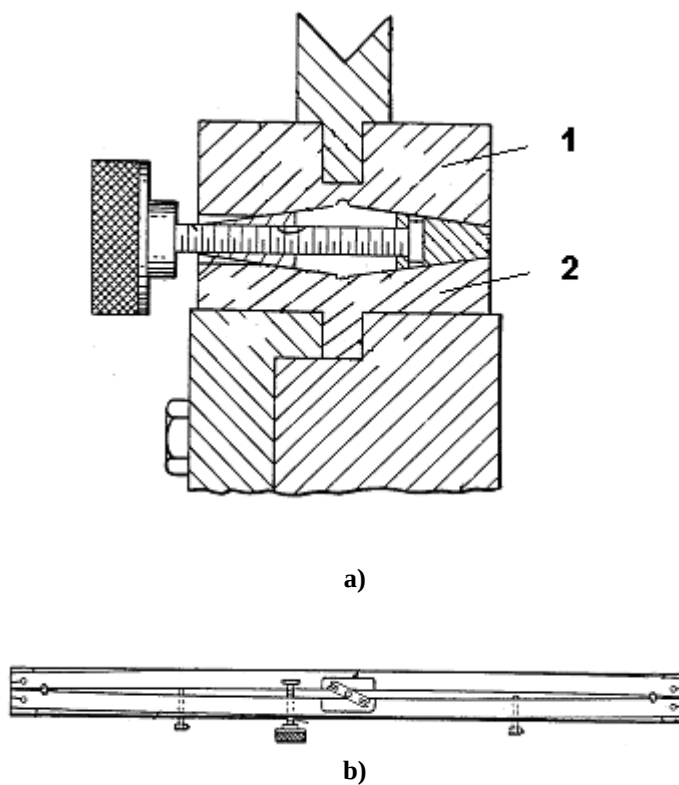


Figura 22- Sistema de compensação; a) Vista lateral; b) Vista de topo

Através de um parafuso é possível regular a distância entre duas cunhas. Estas ao afastarem-se uma da outra exercem uma força que afasta a peça 1 da 2 na zona central do avental, ou seja, compensando a deformação.

- “Deflection compensating means for press brakes and the like”; inventores Eugene W. Pearson e Arthur L. Pedersen; patente pertencente a Canron Corporation (1984).

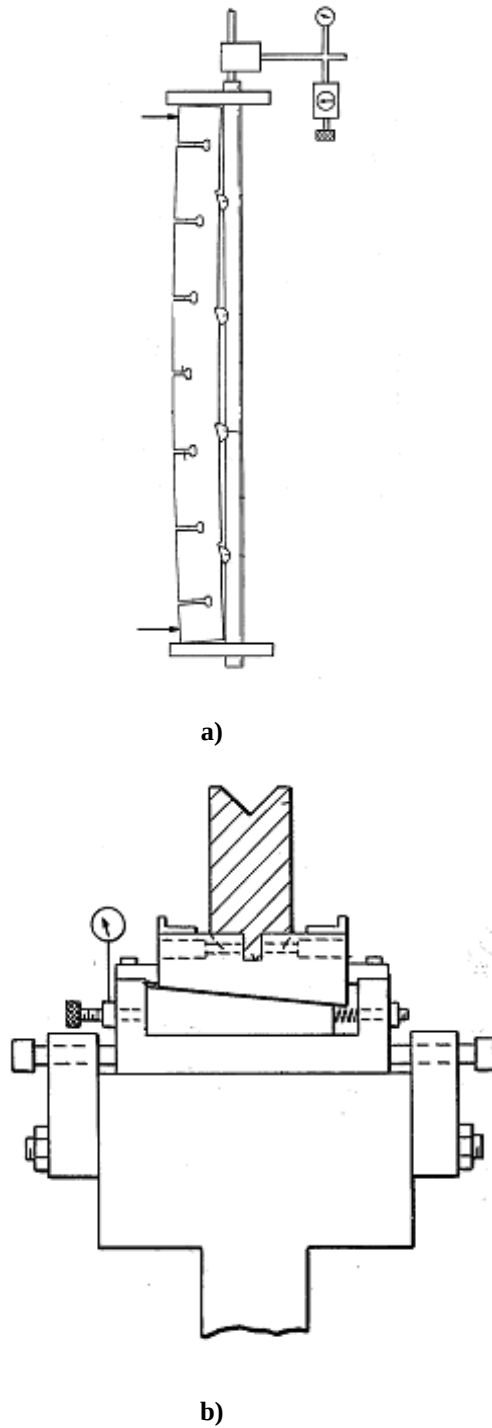
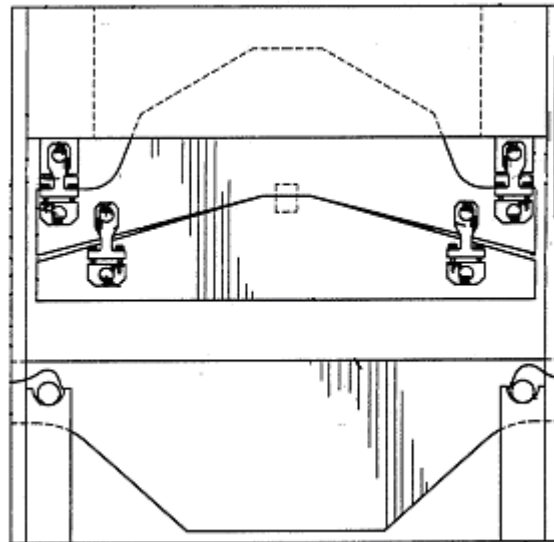


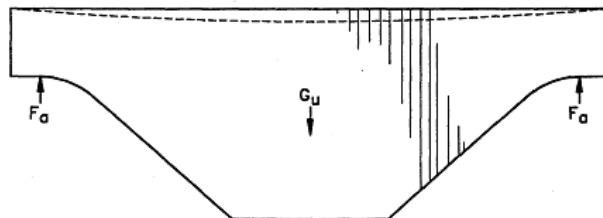
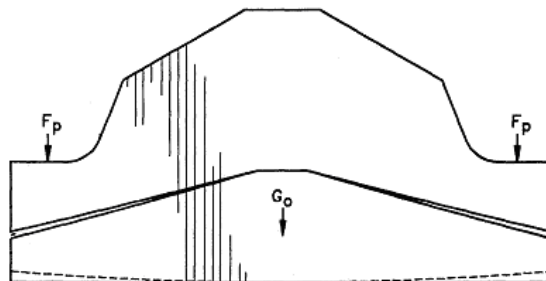
Figura 23-Sistema de compensação; a)Vista de topo; b)Vista lateral

O deslocamento de uma cunha provoca o afastamento vertical da matriz em relação ao avelal inferior efectuando-se assim a compensação.

- “Hydraulically operated press brake”; inventor Waldemar Krumholz; patente pertencente à M+S Brugg AG (1994).



a)



b)

Figura 24-a) Avental superior dividido em duas peças; b) Aventais com forças aplicadas e eventuais deformações

Avental superior dividido em duas partes, estando estas ligadas pelos seus extremos e com a geometria indicada na figura. A transmissão de forças é feita principalmente pelo centro do avental copiando assim a deformação do avental inferior. Pode ser usado o mesmo mecanismo no avental inferior.

Introdução

Um dos métodos usados pela AMADA para originar uma deformação no avental inferior igual ao avental superior, mantendo assim o paralelismo entre os aventais na zona de quinagem, baseia-se num avental inferior em “sandwich” que permite colocar os apoios na zona central do avental transmitindo maior rigidez nesta zona. Constituído por três partes, uma interior e duas exteriores, a estrutura da quinadora está directamente ligada às duas partes exteriores que de seguida se unem à parte interior através de uns pinos. Estes ao situarem-se numa zona central do avental dão origem a uma deformação, da parte interior, igual à deformação do avental superior. É assim conseguido um paralelismo entre os dois aventais para peças quinadas no centro da quinadora.

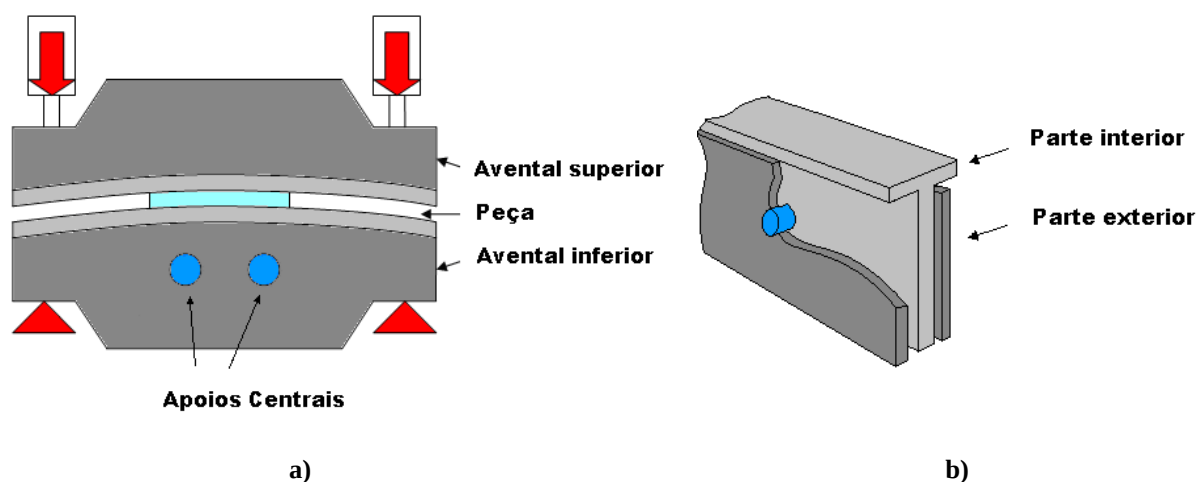


Figura 25-a) Avental inferior com dois pinos centrais; b) Avental inferior

Capítulo 2 – Cálculo analítico

Alguns dos métodos referidos anteriormente mostram bons resultados para peças quinadas na zona central dos aventais, o que já não sucede quando as peças são quinadas descentradas. Conseguir um sistema de compensação que funcione eficazmente e independente do local, ao longo do avental, onde a peça é quinada, é uma preocupação que já perdura à vários anos na indústria de concepção e projecto de quinadoras.

Este difícil problema reside no facto de que uma pequena deformação da centésima de milímetro ser suficiente para originar defeito na quinagem. Como exemplo, para uma chapa de aço RSt33, com uma abertura do “Vê da matriz” de 10mm, uma variação da penetração do punção na matriz de 0,05mm corresponde a 1º de variação de ângulo na chapa.

Para uma primeira abordagem ao problema, por forma a obter uma melhor e fácil compreensão e posterior análise dos diferentes parâmetros e características que regem todo o mecanismo, recorreu-se a uma análise analítica. Assim usou-se a teoria clássica das vigas onde os aventais seriam representados por vigas, a sua ligação aos montantes seria representada por dois apoios simples e a chapa a ser quinada seria substituída pela força que esta exerce no avental.

Ao recorrer a este tipo de análise, diferentes simplificações foram introduzidas. Somente os momentos flectores da viga foram levados em consideração, a inércia foi considerada constante ao longo do avental, a interacção entre o punção e a chapa e também entre a chapa e a matriz é considerada como uma força uniformemente distribuída. A expressão usada para o cálculo das deformações foi, (Roark, young, 1975):

$$v = \iint \frac{M(x)}{EI(x)} dx^2 \quad [3]$$

Usando como software de apoio o Excel, o que facilitou toda esta análise, iniciou-se o estudo com um avental normal de uma quinadora com 2100kN de capacidade e 6 metros de comprimento, representado por uma viga simplesmente apoiada com as suas exactas dimensões, para diferentes casos de carga, isto é, para diferentes comprimentos e locais de quinagem da peça ao longo do avental. Como exemplo é ilustrado de seguida a deformação dos dois aventais, superior e inferior, para uma peça quinada entre montantes, sendo-lhe imposta uma força de 71 ton/m (força máxima gerada pelo sistema hidráulico).

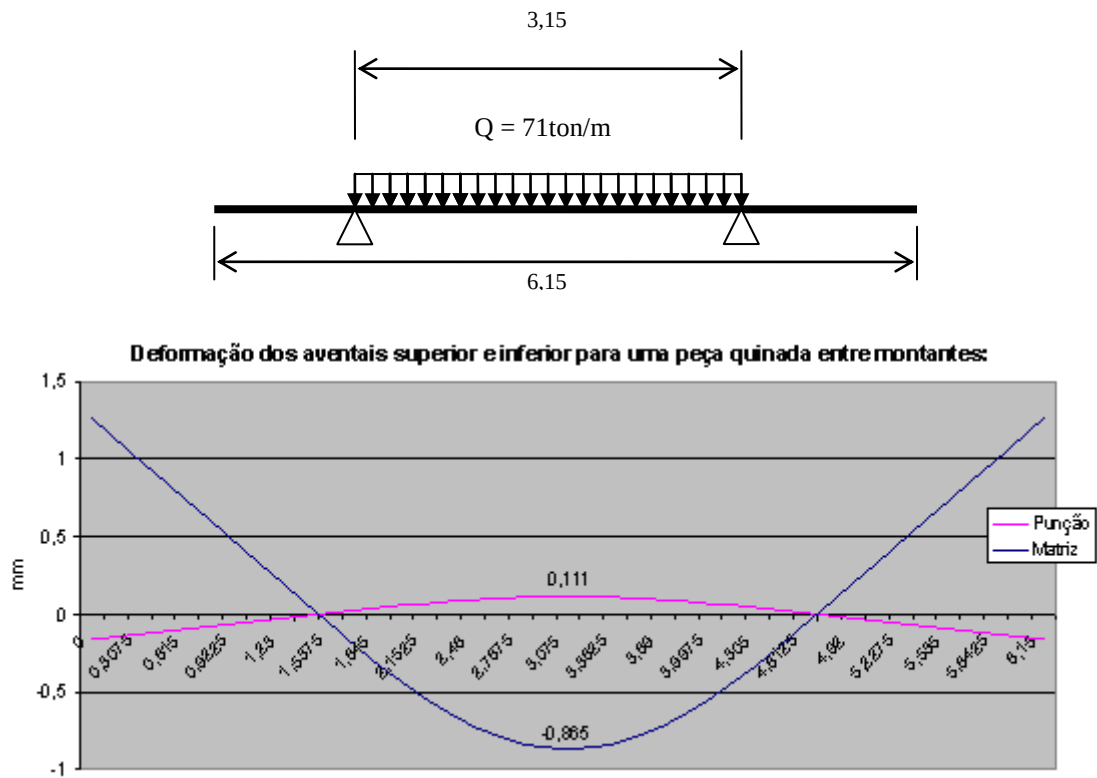


Figura 26-Deformação dos aventais de uma quinadora para uma peça quinada entre montantes

Na zona onde a peça se encontra, desde 1,5 m até 4,65 m ao longo do avental, constata-se uma variação da deformação relativa dos dois aventais que vai de 0 a 0,976 mm, o que independentemente da chapa e da abertura do “Vê” da matriz, por si só, vai originar uma grande variação do ângulo de quinagem ao longo da peça.

Parâmetros usados para comparação de resultados

Foram então usados dois parâmetros para a análise das deformações:

-Amplitude do erro de rectitude (r):

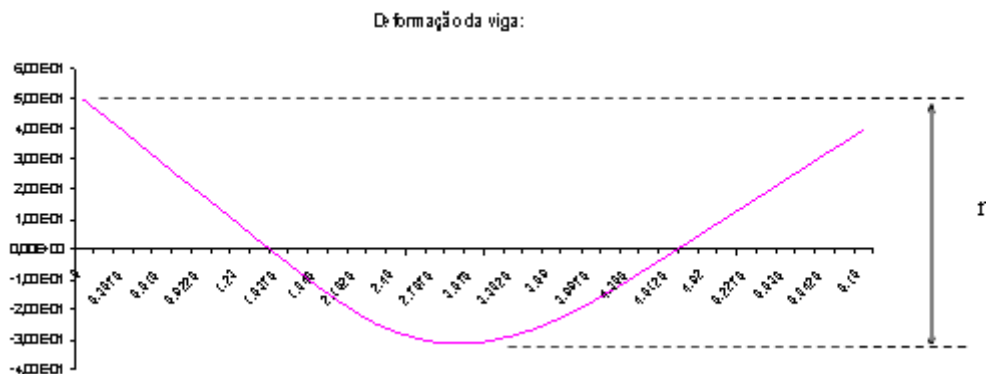


Figura 27-Deformação da viga que representa o avental

Este parâmetro dá-nos a informação sobre a linearidade de cada avental, apontando a distância entre o seu ponto máximo e o seu ponto mínimo. É representado pela letra r.

-Amplitude do desvio de paralelismo (p):

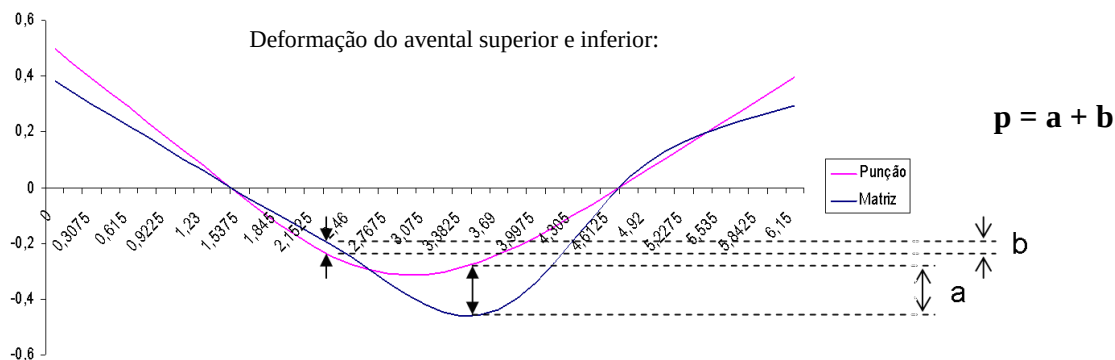


Figura 28-Deformação das vigas que representam os dois aventais

Este parâmetro dá-nos a informação sobre o paralelismo entre os dois aventais, ou seja, a soma do intervalo de maior afastamento com o intervalo de maior penetração entre a matriz e o punção, permitindo saber qual a variação angular ao longo da peça.

Modelos teóricos

Após uma extensa pesquisa foram desenvolvidas diferentes soluções com o objectivo de anular ou atenuar os erros existentes. Assim dividiu-se um dos aventais em duas partes e

pretendendo obter um avental com três apoios numa zona mais central, ligou-se uma das partes aos montantes, estando esta ligada à outra através dos referidos três apoios ou pinos. Esta última parte é que entraria em contacto com a peça. Esta solução supostamente mais rígida na zona central atenuaria bastante os erros causados pela deformação. Este modelo vai de encontro com uma solução referida anteriormente, aplicada pela AMADA, onde são usados dois pinos.

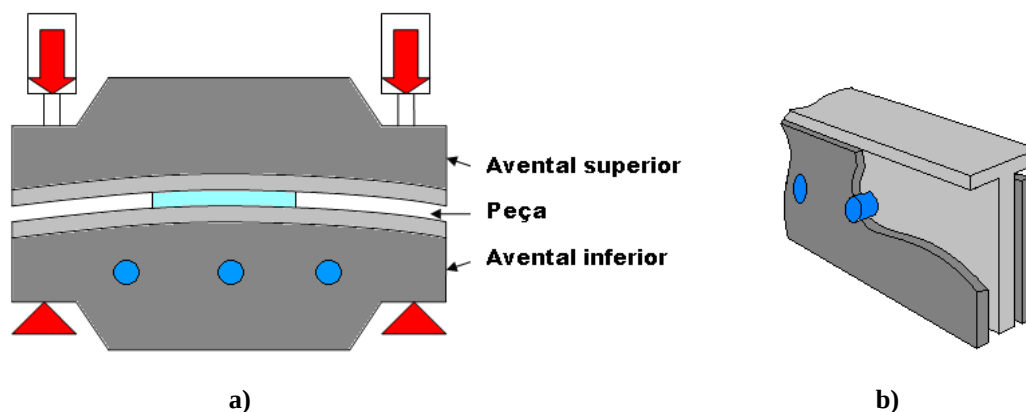


Figura 29-a) Avental inferior com três apoios; b) Partes constituintes do avental inferior

Uma outra solução consistia no uso de um sistema hidráulico para uniformizar as tensões e por conseguinte as deformações no avental. Desta forma idealizou-se um avental dividido em duas partes intercalado por uma zona preenchida com um fluído, o qual teria como função o uniformizar das tensões.

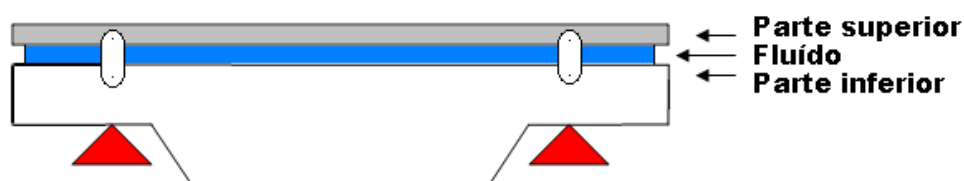


Figura 30-Forma idealizada a conferir ao avental

Rapidamente se apreciou a utilidade desta almofada hidráulica possuir uma pressão regulável permitindo a compensação do avental oposto, diminuindo assim o erro de paralelismo. Também rapidamente se apercebeu que a zona preenchida com o fluido poderia ser dividida em várias secções, isto é, em vez de uma só almofada hidráulica poderia ter-se várias e que o erro de paralelismo diminuía com o aumento do número de almofadas.

Na continuação desta ideia e também, como veremos mais tarde, após uma análise das inércias, chegou-se a uma outra secção que permitiria uma diferente solução.

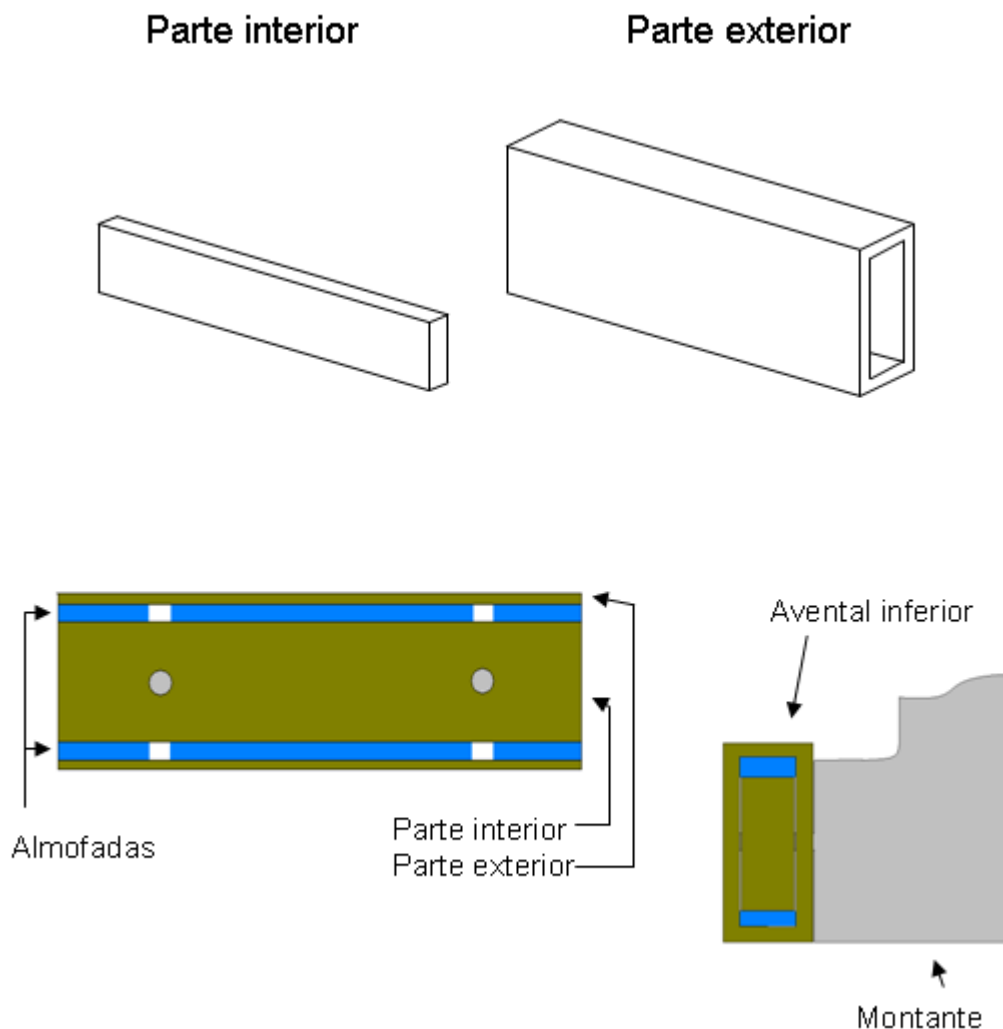


Figura 31-Possível secção a conferir ao avental

Através de uma parte exterior que envolvendo a parte interior permite a colocação de almofadas hidráulicas por cima e por baixo desta última, estas duas estruturas são ligadas aos montantes através dos mesmos apoios que lhes permitem simplesmente rodar. Esta solução tem a vantagem da compensação vertical ser feita nos dois sentidos.

Foram então considerados os seguintes modelos representando somente a parte do avental que entra em contacto com a peça, sendo omitida a parte inferior que liga o avental aos montantes:

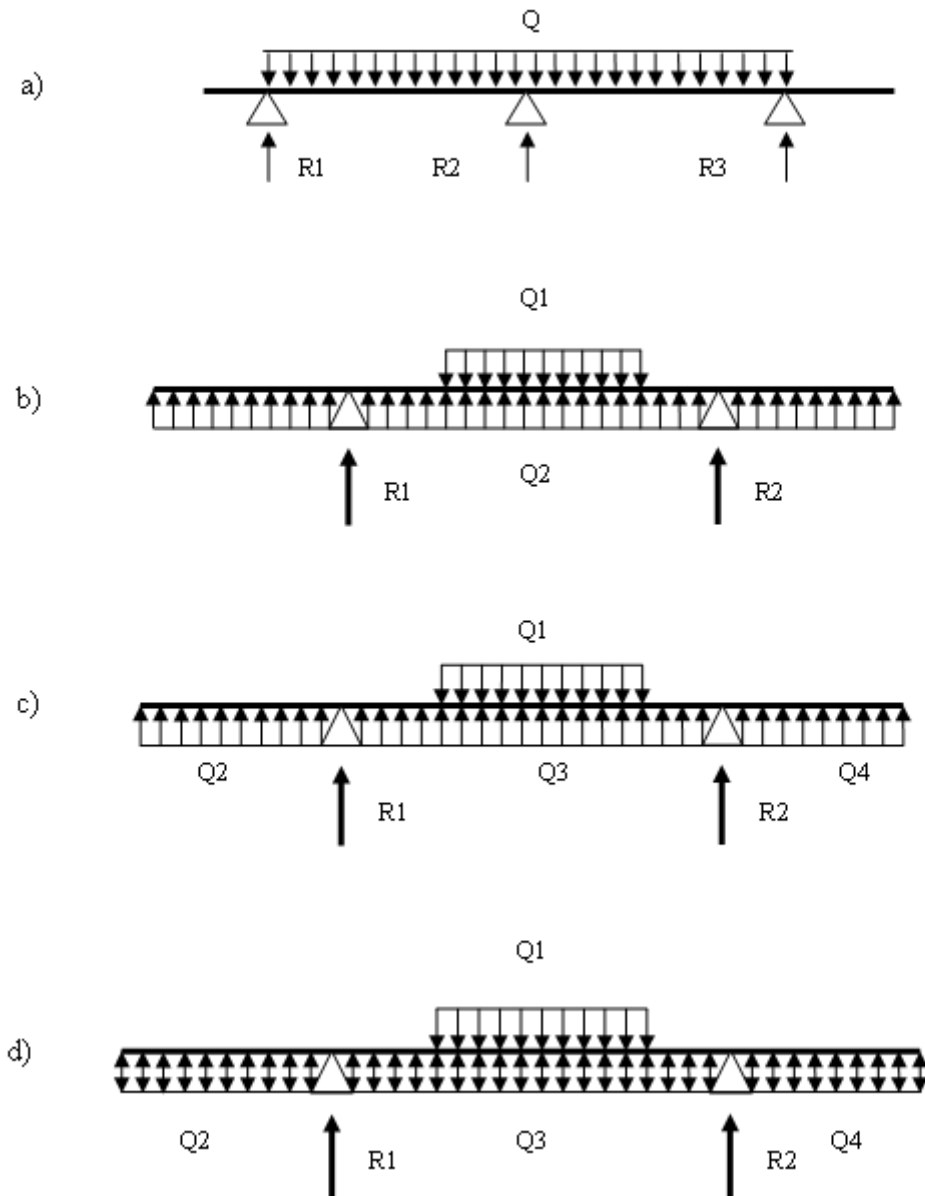


Figura 32-Modelos considerados para o estudo analítico; a) Modelo 1 constituído por uma viga com três apoios; b) Modelo 2 constituído por uma viga com dois apoios e uma pressão de compensação constante; c) Modelo 3 constituído por uma viga com dois apoios e três almofadas hidráulicas de compensação; d) Modelo 4 constituído por uma viga com dois apoios e seis almofadas hidráulicas

Modelo 1, representado na figura 33 a), constituído por uma viga com três apoios onde Q representa a força que a peça exerce no avental e R1, R2 e R3 as reacções dos apoios.

Modelo 2, representado na figura 33 b), constituído por uma viga com dois apoios e uma pressão de compensação constante, onde Q1 representa a força que a peça exerce no avental, R1 e R2 as reacções nos apoios e Q2 a força exercida pela almofada hidráulica de compensação.

Modelo 3, representado na figura 33 c), constituído por uma viga com dois apoios e três almofadas hidráulicas de compensação, onde Q1 representa a força que a peça exerce no

avental, R1 e R2 as reacções nos apoios e Q2, Q3 e Q4 as três almofadas hidráulicas de compensação separadas entre si na zona dos apoios.

Modelo 4, representado na figura 33 d), constituído por uma viga com dois apoios e seis almofadas hidráulicas, três para uma compensação ascendente e as outras três para uma compensação descendente. Onde Q1 representa a força que a peça exerce no avental, R1 e R2 as reacções nos apoios e Q2, Q3 e Q4 as seis almofadas hidráulicas que se situam duas a duas permitindo a compensação nos dois sentidos.

Análise da rigidez

Para o início desta análise era necessário um estudo aprofundado sobre a influência do momento de inércia destas duas partes constituintes do avental para com os resultados de compensação. A estrutura inferior ou interior necessita somente do momento de inércia suficiente para aguentar as cargas que lhe são exercidas. Quanto à estrutura superior ou exterior requer, por dois motivos, o máximo de momento de inércia possível.

- Quanto maior a inércia desta estrutura maior será a sua rigidez, logo menor será a sua deformação e também menor será o erro de rectitude. De seguida são ilustrados dois exemplos com inércias diferentes.

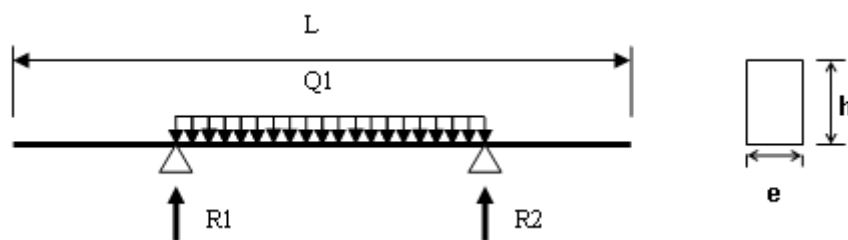


Figura 33-Viga simplesmente apoiada com carga Q1 entre os apoios

onde Q1 representa a força que a peça exerce no avental, R1 e R2 as reacções nos apoios e h e e a altura e espessura da secção da viga que nos permite obter a sua inércia através da seguinte relação, (Roark, young, 1975):

$$I = \frac{eh^3}{12}$$

[4]

Cálculo analítico

Para o caso 1: $e = 0,1 \text{ m}$

$h = 0,5 \text{ m}$

$I = 0,001 \text{ m}^4$

Para o caso 2: $e = 0,1 \text{ m}$

$h = 1 \text{ m}$

$I = 0,008 \text{ m}^4$

Dados comuns: $L = 6 \text{ m}$

$Q1 = 100 \text{ ton/m}$

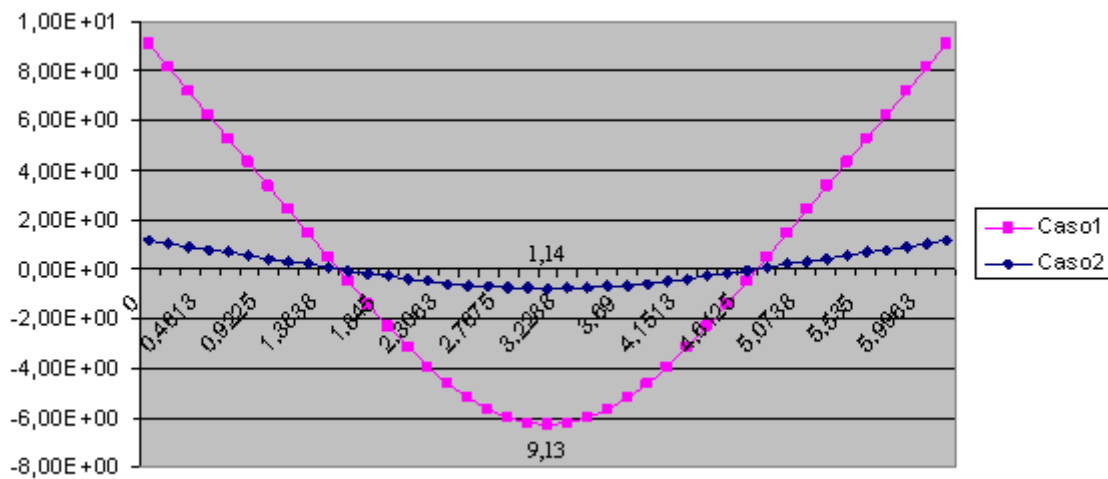


Figura 34-Deformações de vigas com diferente rigidez

Podemos observar que para o caso 1, em que a inércia é 8 vezes menor que o caso 2, a viga deforma-se muito mais, obtendo um limite máximo na zona da peça de 9,13 mm comparativamente com 1,14 mm do caso 2.

- Quanto maior a inércia desta estrutura menor o erro de desvio de paralelismo quando se tenta copiar uma deformação. De seguida são ilustrados dois exemplos com inércias diferentes para uma viga com três almofadas hidráulicas.

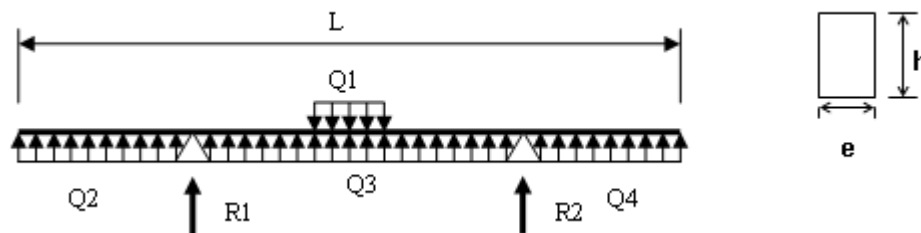


Figura 35- Viga simplesmente apoiada com carga Q1 ligeiramente descentrada

Utilizando os valores dos dois casos anteriores pretende-se copiar a deformação de uma viga com características idênticas em ambas as situações.

Para o caso 1: $e = 0,1 \text{ m}$

$h = 0,5 \text{ m}$

$I = 0,001 \text{ m}^4$

Para o caso 2: $e = 0,1 \text{ m}$

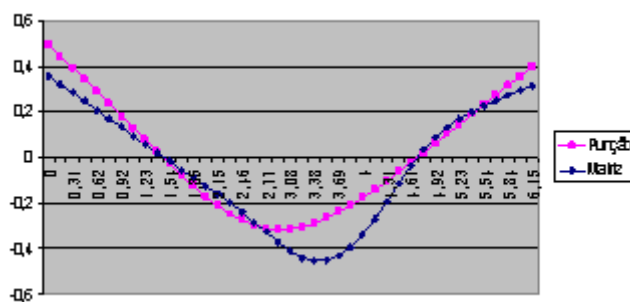
$h = 1 \text{ m}$

$I = 0,008 \text{ m}^4$

Dados comuns: $L = 6 \text{ m}$

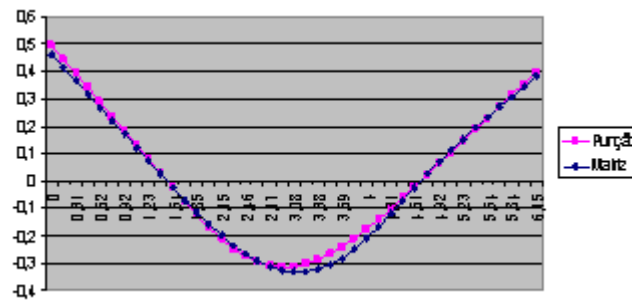
$Q1 = 100 \text{ ton/m}$

Caso 1 ($h=0,5 \text{ m}$):



a)

Caso 2 ($h=1 \text{ m}$):



b)

Figura 36-Influência da rigidez do avental na capacidade para copiar uma deformação; a) Caso 1; b) Caso 2

aqui designado por punção a viga cuja deformação se pretende copiar e por matriz a viga que se está a analisar. Observa-se que o caso 2 copia bastante melhor a deformação do punção que o caso 1 sendo a amplitude do desvio de paralelismo do caso 2 de 0,05 mm e do caso 1 de 0,24 mm.

Mostra-se de seguida alguns dos dados usados:

Tabela 1-Valores das pressões, dos momentos máximos e do desvio de paralelismo

	Caso 1:	Caso 2:	
Momento máx. =	166.704,63	591.120,57	Nm
Q2 =	0	0	N/m
Q3 =	522.201,35	913.315,10	N/m
Q4 =	134.277,87	217.694,03	N/m
Desvio máx. Paralelismo =	0,24	0,05	mm

O grande inconveniente do aumento do momento de inércia é que quanto maior este for maior têm que ser as pressões nas almofadas hidráulicas para a compensação pretendida.

Estudo inicial

No estudo aqui apresentado foram consideradas duas medidas diferentes para simular os aventais. Uma correspondente a uma quinadora QHD20040 e outra correspondente a uma quinadora QHD20040/60. Foram escolhidas estas duas quinadoras para este estudo porque devido à sua constituição são as que apresentam entre elas o erro de quinagem mais pronunciado.

As dimensões usadas para o caso da quinadora QHD20040 são:

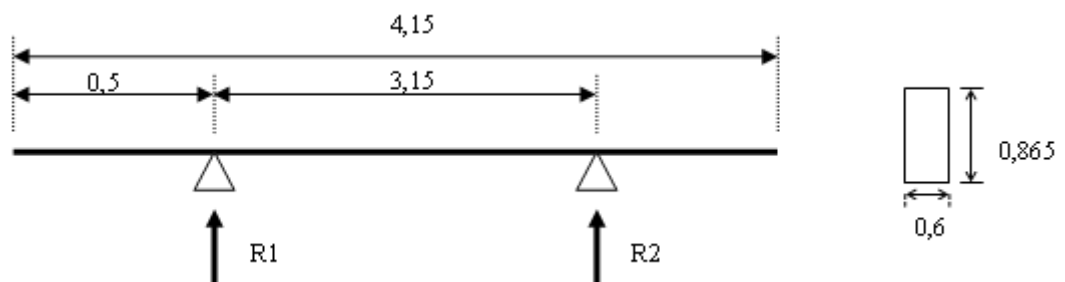


Figura 37-Dimensões do avental inferior de uma QHD20040

As dimensões usadas para o caso da quinadora QHD20040/60 são:

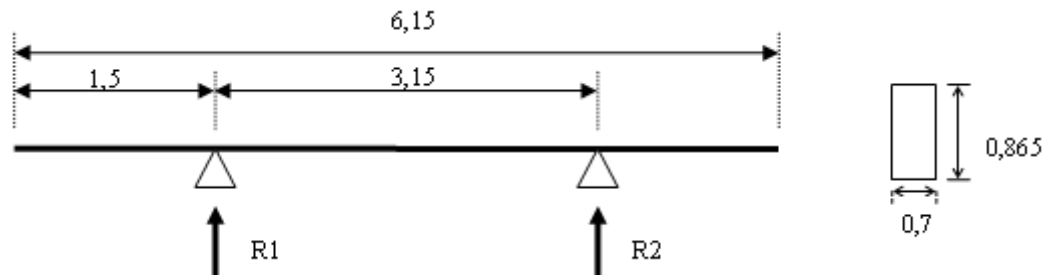


Figura 38-Dimensões do avental inferior de uma QHD20040/60

Ou seja, a diferença entre estas duas quinadoras encontra-se num acréscimo de comprimento dos seus aventais para fora dos montantes, sendo estes acréscimos designados por bigornas. Estas aumentam a zona de quinagem mas tornam a quinadora mais susceptível aos erros de quinagem.

Foram também consideradas diferentes situações de carga, isto é, diferentes posicionamentos da peça ao longo do avental com diferentes intensidades. Destas situações as com mais importância são apresentadas de seguida. A peça é representada pela força Q .

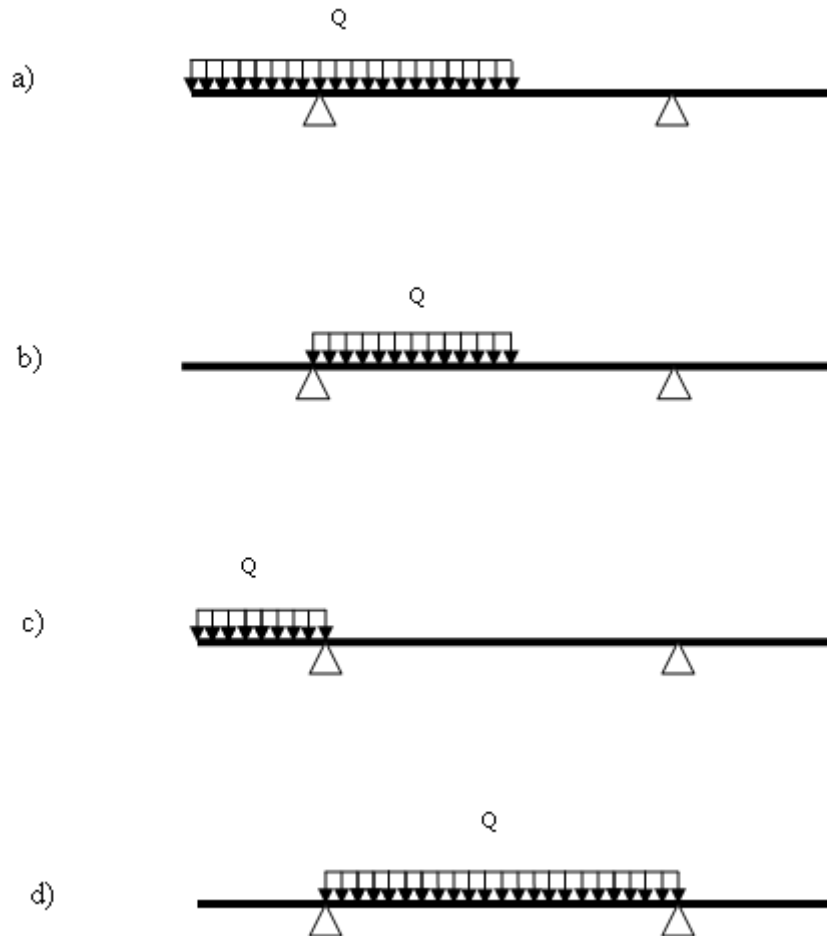


Figura 39-Diferentes casos de carga simulando os diferentes posicionamentos da peça: a) Caso 1 a peça é colocada do início até meio do avental; b) Caso 2 a peça é colocada desde o montante até meio do avental; c) Caso 3 a peça é colocada do início do avental até ao primeiro montante; d) Caso 4 a peça é colocada entre os montantes

A força exercida pelo avental na peça depende da pressão dos cilindros principais, que têm como limite máximo de pressão 30 MPa.

Para tentar compreender qual o melhor modelo a dar ao avental superior e inferior foi feita uma conjugação dos vários modelos como aventais superiores e inferiores. Assim foram criadas várias tabelas com as amplitudes dos desvios de paralelismo e com as amplitudes de rectitude.

De seguida são apresentadas as tabelas com as amplitudes dos desvios de paralelismo para os diferentes casos de carga, considerando todo o avental e considerando somente o local onde a peça é quinada.

A negrito estão os valores das amplitudes dos desvios de paralelismo, os valores que não se encontram a negrito são os valores da amplitude do erro de rectitude. Este paralelismo entre os dois aventais é optimizado de duas formas. É optimizado considerando todo o avental, ou optimizado somente no local da peça, sendo este último bastante mais preciso na zona da peça e bastante menos preciso nas zonas fora desta. Nas tabelas é designado “com ajuste” quando a optimização é feita só na zona da peça e “sem ajuste” quando a optimização é feita ao longo de todo o avental.

É obvio que a máquina teria que saber o local onde a peça se encontraria para fazer uma quinagem com ajuste à peça. Um dos métodos possíveis para o fazer sem que o operador tivesse que indicar à máquina o local da peça, seria através duns sensores de pressão nos cilindros principais, que fornecessem a relação de pressão existente entre os dois cilindros. Esta informação juntamente com o comprimento da peça tornaria possível através de um cálculo muito simples determinar o local exacto desta.

Assim os resultados dos desvios de paralelismo obtidos para os diferentes estados de carga são de seguida apresentados.

Caso 1-Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 0, x = 3$ metros.

Tabela 2-Valores dos desvios para uma quinagem de 0 a 3 metros numa QHD20040/60

1 Avental Superior Avental Inferior			1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça			Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	p	1,145	–	4,051	–	0,406	0,433	0,018	0,319	0,018	0,319
		r	0,047	–	0,047	–	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047
	Peça	p	0,250	–	4,051	–	0,227	0,025	0,011	0,0006	0,011	0,0006
		r	0,047	–	0,047	–	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047
2-Avental com três apoios	Avental	p	–	–	0,451	–	0,092	0,092	0,406	0,433	0,018	0,018
		r	–	–	0,044	–	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
	Peça	p	–	–	0,451	–	0,076	0,076	0,227	0,026	0,011	0,011
		r	–	–	0,044	–	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	p	–	–	–	–	0,406	0,433	0,018	0,319	0,018	0,319
		r	–	–	–	–	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046
	Peça	p	–	–	–	–	0,227	0,025	0,011	0,0006	0,011	0,0006
		r	–	–	–	–	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	p	–	–	–	–	–	–	0,018	0,319	0,018	0,319
		r	–	–	–	–	–	–	0,002	0,002	0,002	0,002
	Peça	p	–	–	–	–	–	–	0,011	0,0006	0,011	0,0006
		r	–	–	–	–	–	–	0,001	0,001	0,001	0,001
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	p	–	–	–	–	–	–	–	–	0,018	0,319
		r	–	–	–	–	–	–	–	–	0,002	0,002
	Peça	p	–	–	–	–	–	–	–	–	0,011	0,0006
		r	–	–	–	–	–	–	–	–	0,001	0,001

Caso 2-Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 1,5$, $x = 2,5$ metros.

Tabela 3-Valores dos desvios para uma quinagem 1,5 a 2,5 metros numa QHD20040/60

2 Avental Superior Avental Inferior			1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça			Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	p r	0,900 0,103	–	0,251 0,103	–	0,900 0,103	0,900 0,103	0,057 0,103	1,202 0,103	0,036 0,103	0,972 0,103
	Peça	p r	0,265 0,030	–	0,073 0,030	–	0,265 0,030	0,265 0,030	0,014 0,030	0,0008 0,030	0,018 0,030	0,0003 0,030
2-Avental com três apoios	Avental	p r	–	–	0,176 0,021	–	0,119 0,021	0,119 0,021	0,014 0,021	0,316 0,021	0,008 0,021	0,253 0,021
	Peça	p r	–	–	0,047 0,010	–	0,041 0,010	0,041 0,010	0,003 0,010	0,0002 0,010	0,005 0,010	8,2E-5 0,010
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	p r	–	–	–	–	0,900 0,103	0,900 0,103	0,057 0,103	1,201 0,103	0,036 0,103	0,972 0,103
	Peça	p r	–	–	–	–	0,265 0,030	0,265 0,030	0,014 0,030	0,0008 0,030	0,018 0,030	0,0003 0,030
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	p r	–	–	–	–	–	–	0,057 0,006	1,201 0,006	0,036 0,006	0,972 0,006
	Peça	p r	–	–	–	–	–	–	0,014 0,001	0,0008 0,001	0,018 0,001	0,0003 0,001
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	p r	–	–	–	–	–	–	–	–	0,036 0,004	0,972 0,004
	Peça	p r	–	–	–	–	–	–	–	–	0,018 0,002	0,0003 0,002

Caso 3-Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 0, x = 1,5$ metros.

Tabela 4-Valores dos desvios para uma quinagem de 0 a 1,5 metros numa QHD20040/60

3 Avental Superior Avental Inferior			1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça			Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	p	1,037	–	0,547	–	0,548	0,548	9,1E-7	1,1E-6	9,6E-7	1,1E-6
		r	0,118	–	0,118	–	0,118	0,118	0,118	0,118	0,118	0,118
Peça		p	0,755	–	0,503	–	0,053	0,053	3,4E-7	5,9E-9	4,3E-7	5,9E-9
		r	0,086	–	0,086	–	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086
2-Avental com três apoios	Avental	p	–	–	0,492	–	2,513	2,513	0,034	4,904	9,2E-4	0,004
		r	–	–	0,056	–	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
Peça		p	–	–	0,459	–	2,085	2,085	0,034	4,7E-7	1,7E-4	4,7E-9
		r	–	–	0,052	–	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	p	–	–	–	–	0,495	0,548	0,048	1,482	5,2E-7	1,482
		r	–	–	–	–	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
Peça		p	–	–	–	–	0,199	0,053	0,012	6,5E-9	2,5E-7	6,5E-9
		r	–	–	–	–	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	p	–	–	–	–	–	–	0,000	0,000	0,000	0,000
		r	–	–	–	–	–	–	0,000	0,000	0,000	0,000
Peça		p	–	–	–	–	–	–	0,000	0,000	0,000	0,000
		r	–	–	–	–	–	–	0,000	0,000	0,000	0,000
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	p	–	–	–	–	–	–	–	–	0,000	0,000
		r	–	–	–	–	–	–	–	–	0,000	0,000
Peça		p	–	–	–	–	–	–	–	–	0,000	0,000
		r	–	–	–	–	–	–	–	–	0,000	0,000

Caso 4-Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 1,5, x = 4,65$ metros.

Tabela 5-Valores dos desvios para uma quinagem 1,5 a 4,65 metros numa QHD20040/60

4 Avental Superior Avental Inferior			1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça			Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	p	2,397	—	0,316	—	2,397	2,397	0,000	0,000	0,000	0,000
		r	0,273	—	0,273	—	0,273	0,273	0,273	0,273	0,273	0,273
Peça		p	0,906	—	0,122	—	0,906	0,906	0,000	0,000	0,000	0,000
		r	0,103	—	0,103	—	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103
2-Avental com três apoios	Avental	p	—	—	0,101	—	2,114	2,114	0,003	0,029	0,003	0,029
		r	—	—	0,013	—	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Peça		p	—	—	0,025	—	0,926	0,926	0,003	0,001	0,003	0,001
		r	—	—	0,002	—	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	p	—	—	—	—	2,397	2,397	0,000	0,000	0,000	0,000
		r	—	—	—	—	0,273	0,273	0,273	0,273	0,273	0,273
Peça		p	—	—	—	—	0,906	0,906	0,000	0,000	0,000	0,000
		r	—	—	—	—	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	p	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000	0,000	0,000
		r	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000	0,000	0,000
Peça		p	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000	0,000	0,000
		r	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000	0,000	0,000
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	p	—	—	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000
		r	—	—	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000
Peça		p	—	—	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000
		r	—	—	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000

Caso 5-Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 980kN descentrada compreendida entre $x = 2$, $x = 3$ metros.

Tabela 6-Valores dos desvios para uma quinagem 2 a 3 metros numa QHD20040/60

5 Avental Superior Avental Inferior			1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça			Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	p	1,438	—	1,236	—	1,140	1,140	0,046	0,661	0,041	0,661
		r	0,133		0,133		0,133	0,133	0,133	0,133	0,133	0,133
	Peça	p	0,215	—	0,806	—	0,137	0,137	0,021	2,7E-4	0,012	2,7E-4
		r	0,020		0,020		0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
2-Avental com três apoios	Avental	p	—	—	0,151	—	1,236	1,236	0,035	0,495	0,032	0,495
		r			0,019		0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
	Peça	p	—	—	0,038	—	0,806	0,806	0,013	1,5E-4	0,022	1,5E-4
		r			0,004		0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	p	—	—	—	—	1,412	1,412	0,046	0,559	0,041	0,661
		r					0,161	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161
	Peça	p	—	—	—	—	1,778	1,778	0,021	9,0E-4	0,012	2,7E-4
		r					0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	p	—	—	—	—	—	—	0,046	0,661	0,041	0,661
		r							0,005	0,005	0,005	0,005
	Peça	p	—	—	—	—	—	—	0,021	2,7E-4	0,012	2,7E-4
		r							0,002	0,002	0,002	0,002
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	p	—	—	—	—	—	—	—	—	0,041	0,661
		r									0,004	0,004
	Peça	p	—	—	—	—	—	—	—	—	0,012	2,7E-4
		r									0,001	0,001

Caso 6-Avental com 4,05m de comprimento com uma força de 550Kn/m descentrada compreendida entre $x = 0$ e $x = 3$ metros.

Tabela 7-Valores dos desvios para uma quinagem 0 a 3 metros numa QHD20040

6 Avental Superior Avental Inferior			1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça			Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Aventa	p	0,989	–	0,835	–	0,009	0,009	0,006	0,012	0,006	0,012
		r	0,159		0,159		0,159	0,159	0,159	0,159	0,159	0,159
	Peça	p	0,989	–	0,835	–	0,009	0,009	0,004	5E-4	0,004	5E-4
		r	0,159		0,159		0,159	0,159	0,159	0,159	0,159	0,159
2-Avental com três apoios	Aventa	p	–	–	0,030	–	0,016	0,015	0,002	0,002	0,002	0,002
		r			0,005		0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Peça	p	–	–	0,030	–	0,007	0,007	0,002	0,002	0,002	0,002
		r			0,005		0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Aventa	p	–	–	–	–	0,194	0,194	0,006	0,012	0,006	0,012
		r					5,5E-4	5,5E-4	5,5E-4	5,5E-4	5,5E-4	5,5E-4
	Peça	p	–	–	–	–	0,191	0,191	0,004	5,0E-4	0,004	5,0E-4
		r					5,5E-4	5,5E-4	5,5E-4	5,5E-4	5,5E-4	5,5E-4
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Aventa	p	–	–	–	–	–	–	0,006	0,012	0,006	0,012
		r							0,001	0,001	0,001	0,001
	Peça	p	–	–	–	–	–	–	0,004	5,0E-4	0,004	5,0E-4
		r							7,2E-4	7,2E-4	7,2E-4	7,2E-4
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Aventa	p	–	–	–	–	–	–	–	–	0,006	0,012
		r									0,001	0,001
	Peça	p	–	–	–	–	–	–	–	–	0,004	5,0E-4
		r									7,2E-4	7,2E-4

Caso 7-Avental com 4,05m de comprimento com uma força de 980Kn/m descentrada compreendida entre $x = 0,45$ e $x = 1,45$ metros.

Tabela 8-Valores dos desvios para uma quinagem 0,45 a 1,45 metros numa QHD20040

7 Avental Superior Avental Inferior			1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça			Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	p	0,482	–	0,294	–	0,067	0,115	0,047	0,343	0,027	0,280
		r	0,077	–	0,077	–	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077
	Peça	p	0,242	–	0,195	–	0,025	0,017	0,013	6,6E-4	0,009	2,1E-4
		r	0,039	–	0,039	–	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039
2-Avental com três apoios	Avental	p	–	–	0,088	–	0,004	0,003	0,015	0,019	0,010	0,016
		r	–	–	0,014	–	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
	Peça	p	–	–	0,036	–	0,001	0,001	0,002	0,000	4,6E-4	0,000
		r	–	–	0,005	–	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	p	–	–	–	–	0,071	0,115	0,048	0,349	0,027	0,280
		r	–	–	–	–	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
	Peça	p	–	–	–	–	0,027	0,017	0,013	7,1E-4	0,009	2,1E-4
		r	–	–	–	–	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	p	–	–	–	–	–	–	0,047	0,343	0,027	0,274
		r	–	–	–	–	–	–	0,007	0,007	0,007	0,007
	Peça	p	–	–	–	–	–	–	0,013	6,6E-4	0,009	2,3E-4
		r	–	–	–	–	–	–	0,001	0,001	0,001	0,001
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	p	–	–	–	–	–	–	–	–	0,027	0,280
		r	–	–	–	–	–	–	–	–	0,004	0,004
	Peça	p	–	–	–	–	–	–	–	–	0,009	2,1E-4
		r	–	–	–	–	–	–	–	–	0,001	0,001

Caso 8-Avental com 4,05m de comprimento com uma força de 2500Kn/m descentrada compreendida entre $x = 0$ e $x = 0,45$ metros.

Tabela 9-Valores dos desvios para uma quinagem 0 a 0,45 metros numa QHD20040

8 Avental Superior Avental Inferior			1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça			Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Aventa	p	0,261	—	0,106	—	0,261	0,261	0,000	0,037	0,000	0,000
	r		0,042		0,042		0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042
Peça	p		0,108	—	0,064	—	0,108	0,108	0,000	0,000	0,000	0,000
	r		0,018		0,018		0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
2-Avental com três apoios	Aventa	p	—	—	0,083	—	0,053	0,053	4,9E-4	0,009	4,9E-4	0,003
	r				0,013		0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Peça	p		—	—	0,052	—	0,027	0,027	2,3E-4	0,000	2,3E-4	0,000
	r				0,013		0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Aventa	p	—	—	—	—	0,261	0,261	0,000	0,000	0,000	0,000
	r						0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042
Peça	p		—	—	—	—	0,108	0,108	0,000	0,000	0,000	0,000
	r						0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Aventa	p	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000	0,000	0,000
	r								0,000	0,000	0,000	0,000
Peça	p		—	—	—	—	—	—	0,000	0,000	0,000	0,000
	r								0,000	0,000	0,000	0,000
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Aventa	p	—	—	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000
	r										0,000	0,000
Peça	p		—	—	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000
	r										0,000	0,000

Caso 9-Avental com 4,05m de comprimento com uma força de 2500Kn/m descentrada compreendida entre $x = 0,45$ e $x = 3,6$ metros.

Tabela 10- Valores dos desvios para uma quinagem 0,45 a 3,6 metros numa QHD20040

9 Avental Superior Avental Inferior			1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça			Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Aventa	p	1,457	—	0,211	—	0,030	0,030	0,000	0,000	0,000	0,000
		r	0,152	—	0,152	—	0,152	0,152	0,152	0,152	0,152	0,152
	Peça	p	0,938	—	0,149	—	0,028	0,028	0,000	0,000	0,000	0,000
		r	0,235	—	0,235	—	0,235	0,235	0,235	0,235	0,235	0,235
2-Avental com três apoios	Aventa	p	—	—	0,053	—	0,016	0,016	0,005	0,005	0,003	0,007
		r	—	—	0,008	—	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
	Peça	p	—	—	0,026	—	0,011	0,011	0,005	0,005	0,003	0,001
		r	—	—	0,008	—	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Aventa	p	—	—	—	—	0,013	0,013	0,002	0,002	0,000	0,000
		r	—	—	—	—	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	Peça	p	—	—	—	—	0,006	0,006	0,001	9,6E-4	0,000	0,000
		r	—	—	—	—	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Aventa	p	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000	0,000	0,000
		r	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000	0,000	0,000
	Peça	p	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000	0,000	0,000
		r	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000	0,000	0,000
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Aventa	p	—	—	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000
		r	—	—	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000
	Peça	p	—	—	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000
		r	—	—	—	—	—	—	—	—	0,000	0,000

Caso 10-Avental com 4,05m de comprimento com uma força de 980Kn/m descentrada compreendida entre $x = 1$ e $x = 2$ metros.

Tabela 11-Valores dos desvios para uma quinagem 1 a 2 metros numa QHD20040

10 Avental Superior Avental Inferior			1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça			Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	p	0,859	–	0,367	–	0,064	0,086	0,011	0,150	0,032	0,150
		r	0,139		0,139		0,139	0,139	0,139	0,139	0,139	0,139
	Peça	p	0,241	–	0,405	–	0,024	0,032	0,010	3,8E-4	0,006	3,8E-4
		r	0,039		0,039		0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039
2-Avental com três apoios	Avental	p	–	–	0,077	–	0,064	0,085	0,041	0,159	0,032	0,159
		r			0,012		0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
	Peça	p	–	–	0,036	–	0,038	0,035	0,014	5,4E-4	0,011	5,4E-4
		r			0,012		0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	p	–	–	–	–	0,086	0,086	0,040	0,150	0,032	0,150
		r					0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
	Peça	p	–	–	–	–	0,032	0,032	0,012	3,8E-4	0,006	3,8E-4
		r					0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	p	–	–	–	–	–	–	0,039	0,106	0,032	0,150
		r							0,005	0,005	0,005	0,005
	Peça	p	–	–	–	–	–	–	0,011	0,002	0,006	3,8E-4
		r							0,002	0,002	0,002	0,002
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	p	–	–	–	–	–	–	–	–	0,032	0,150
		r									0,005	0,005
	Peça	p	–	–	–	–	–	–	–	–	0,006	3,8E-4
		r									0,001	0,001

É de fácil percepção que o avental superior é o que define a amplitude de rectitude, e o avental inferior é o que define a amplitude do desvio de paralelismo. Assim a escolha do melhor avental superior e inferior deverá recair naquele que cumpre os requisitos mínimos destes dois erros e que por sua vez simplifica o processo de montagem e diminuição de custos.

Para a quinadora QHD20040/60 o objectivo pretendido seria obter um erro máximo de amplitude de rectitude de 0,1mm/m e um erro máximo de amplitude de desvio de paralelismo de 0,05mm.

Para uma chapa de aço de alta resistência com 800MPa de tensão de ruptura, com um metro de comprimento e uma força de quinagem de 980kN, um desvio de paralelismo de 0,05mm origina uma variação angular de 0,38° na chapa.

As situações com melhores resultados foram sublinhadas e perante estas concluiu-se que o modelo 5, seguido do modelo 4, como avental inferior, apresentavam os melhores resultados para o erro de paralelismo. Aqui como pior caso de desvio de paralelismo, para o modelo 4 e para a quinadora QHD20040/60, obtinha-se o caso 5. Atingindo uma amplitude de desvio de paralelismo máxima de 0,021mm, para uma quinagem sem ajuste à peça e com avental superior normal, o que, para um aço de alta resistência ($\sigma_r = 800\text{MPa}$), com a ajuda de uns ábacos e da expressão 2 se determinou uma variação angular da chapa de $0,15^\circ$. Já o modelo 5 tem o seu pior resultado no caso 2, com um avental superior normal e sem ajuste à peça, obtendo um valor máximo de 0,018mm, o que usando o mesmo aço corresponde a uma variação angular de $0,14^\circ$.

Na quinadora QHD20040 o pior caso de desvio de paralelismo do modelo 4 é o caso 7, com um avental superior normal e sem ajuste à peça, que tem um máximo de 0,013mm o qual, usando o mesmo aço, corresponde a uma variação angular da chapa de $0,1^\circ$. O modelo 5 apresenta os piores resultados também no caso 7, em que nas mesmas condições tem um valor máximo de 0,009mm, o qual corresponde a uma variação angular de $0,07^\circ$.

Assim, uma vez que a diferença entre estes dois modelos era mínima, optou-se pelo modelo 4 devido a uma maior simplificação de construção, menores custos e óptimos resultados.

Para o avental superior optou-se por continuar com o já existente, não havendo portanto neste avental modificações, sendo o seleccionado o modelo 1. Isto porque apesar de resultados ligeiramente inferiores aos modelos 4 e 5, este encontra-se dentro do pretendido e a sua simplicidade de construção e redução de custos tornam-no o escolhido.

Foram feitos vários testes para diversas dimensões de aventais e diversas posições de quinagem com várias intensidades, em Anexo são apresentados alguns desses testes.

Assim, a conjugação escolhida como a ideal para os aventais inferior e superior é a constituída por um avental normal como avental superior e um avental com três almofadas hidráulicas de compensação como avental inferior.

Neste ponto do estudo torna-se necessário progredir no sentido da materialização das almofadas hidráulicas de compensação. A primeira abordagem a esta materialização consistiu

em pequenos cilindros alinhados linearmente, preenchendo o espaço de cada almofada hidráulica. Estes teriam uma alimentação hidráulica para cada almofada.

Foi então realizado um estudo, para uma quinadora QHD20040 e QHD20040/60, sobre as dimensões a atribuir aos cilindros bem como o seu posicionamento e espaçamento sobre o avental.

Chegou-se à conclusão que o modelo a ser usado para o avental inferior exigia pressões demasiado elevadas nas almofadas hidráulicas de compensação para um correcto funcionamento. Assim, a melhor solução encontrada foi acrescentar uma almofada hidráulica ao sistema. Dividiu-se a almofada hidráulica central em duas e assim tornou-se possível, com menor pressão, obter uma igual deformação de compensação.

Tanto a quinadora QHD20040 como a quinadora QHD20040/60 seriam constituídas com duas almofadas hidráulicas centrais ambas com 9 cilindros. Estes cilindros teriam um diâmetro interior de 80 mm e estariam espaçados entre si de aproximadamente 67 mm. Como almofadas hidráulicas laterais, a quinadora QHD20040 seria constituída por 3 cilindros em cada almofada, de 80mm de diâmetro interior e com um espaçamento aproximadamente de 35mm. A quinadora QHD20040/60 possuiria 8 cilindros em cada almofada hidráulica lateral, com 80mm de diâmetro interior cada e com um espaçamento de aproximadamente 70mm entre si.

Capítulo 3 – Cálculo numérico

Neste capítulo modelou-se o sistema encontrado analiticamente através do método dos elementos finitos. Aqui, através de uma análise estrutural, procurou-se obter a melhor geometria para o avental bem como testar a eficácia deste sistema.

O modelo encontrado analiticamente consistia num avental com quatro almofadas hidráulicas de compensação. Duas localizadas entre montantes e as outras duas colocadas para fora destes. Para a materialização deste avental poder-se-ia utilizar diferentes estruturas, uma das quais já referida, estrutura com secção em O envolvendo uma outra com a forma de um paralelepípedo.

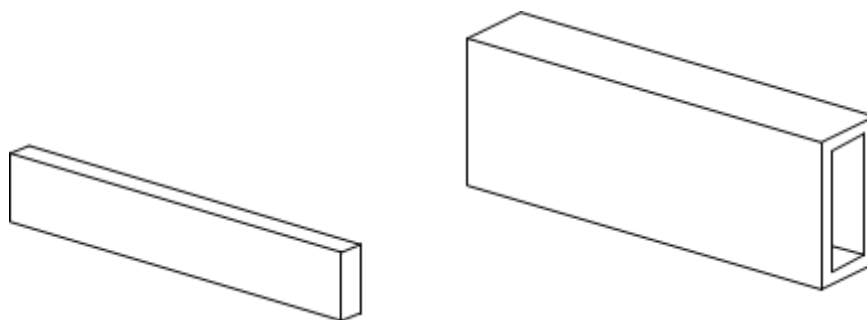


Figura 40-Avental inferior constituído por duas estruturas, uma delas com secção em O

Estas duas peças estariam ambas ligadas aos montantes e pequenos cilindros de compensação seriam colocados entre elas. Uma outra estrutura possível para este avental seria uma peça com secção em U envolvendo uma peça idêntica à anterior.

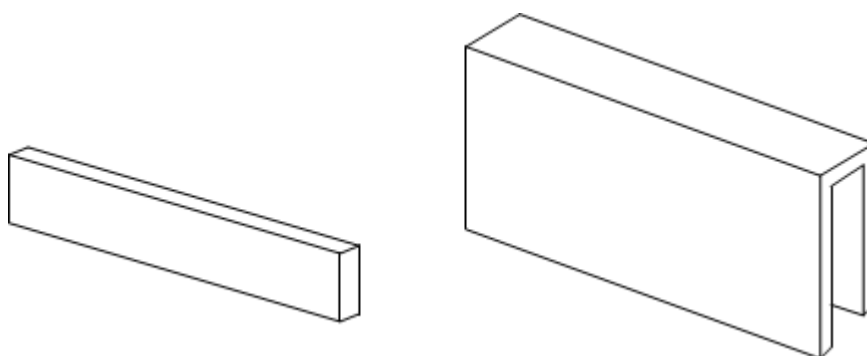


Figura 41-Avental inferior constituído por duas estruturas, uma delas com secção em U

Aqui, o processo seria o mesmo, ambas as estruturas estariam ligadas aos montantes, onde entre elas seriam colocados os cilindros de compensação. O inverso desta solução também seria válido, onde a peça a ser compensada seria a peça interior e não a peça exterior.

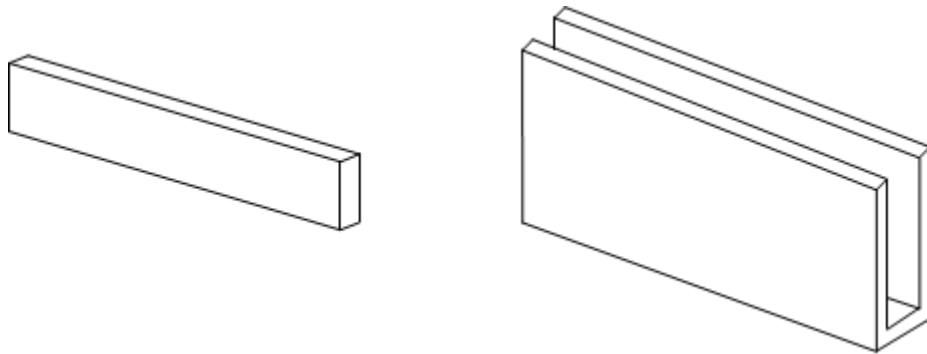


Figura 42-Avental inferior constituído por duas estruturas, uma delas com secção em U

Estas soluções permitem cilindros de compensação mais pequenos e melhor distribuídos ao longo do avental. Têm também como vantagem as tensões exercidas às duas peças estarem bem distribuídas, o que origina tensões mais baixas.

Um dos requisitos propostos consistia na fácil montagem e a manutenção de todo este sistema, isto é, na possibilidade de colocar e remover, com acesso rápido e fácil, algum destes cilindros sem implicar o remover de outros. Um outro requisito importante constava na possibilidade de identificar rapidamente, numa situação de incorrecto funcionamento por parte de algum destes cilindros, qual o cilindro disfuncional.

Por estes motivos e também pelo motivo que a produção em série de alguma das estruturas anteriormente sugeridas para o avental requeriam alguma técnica, custos e tempo, isto devido à forma como estas secções teriam que ser obtidas. Onde a melhor forma seria através da soldadora. Procurou-se materializar o avental com uma estrutura mais simples. Esta era constituída por três placas de aço ligadas em conjunto aos montantes. As três placas teriam uns rasgos ao longo do avental onde seriam colocados os cilindros. Estes estariam apoiados nas duas placas exteriores aplicando a sua força sobre a placa interior, na qual estaria colocada a matriz.

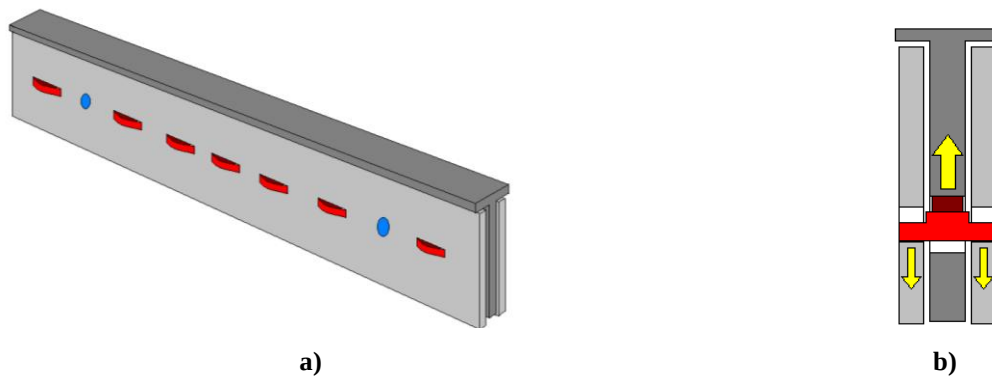


Figura 43-a) AVENTAL inferior constituído por três placas; b) Vista em corte (Funcionamento dos cilindros)

Os primeiros parâmetros a serem definidos foram as espessuras limite para cada uma das três placas. O seu comprimento e a altura seriam os predefinidos para cada uma das quinadoras. Assim pretendeu-se não ultrapassar os 100 mm de espessura para a placa interior e os 30 mm de espessura para as placas exteriores.

Características do aço usado

O material usado é o aço RSt 37-2 o qual possui as seguintes características:

- Modulo de elasticidade = 210 GPa
- Coeficiente de Poisson = 0,28
- Densidade = 7870 kg/m^3
- Tensão de cedência = 275 MPa

Tipo de malha usada no software COSMOS

A malha usada pelo método dos elementos finitos era constituída por elementos tetraédricos de 4 nós com um espaçamento de 40mm entre si e com uma tolerância de 2mm.

Desta forma inicia-se o estudo para o avental inferior de uma quinadora QHD20040/60. Foram inseridos quatro grandes rasgos às três placas do avental inferior, solução esta encontrada pelo estudo analítico. As duas almofadas hidráulicas entre montantes teriam 9 cilindros cada, com um diâmetro interior de 80 mm. As outras duas almofadas

hidráulicas, colocadas fora dos montantes, teriam 8 cilindros cada, com igual diâmetro interior.

Realizando um estudo para as inúmeras possibilidades de comprimento e local da peça a quinar sob a máxima força exercida pelos aventais, apercebemo-nos que as situações de carga que produzem maiores tensões são a quinagem de uma peça com o comprimento e localização entre montantes e a quinagem de uma peça que ocupe todo o avental.

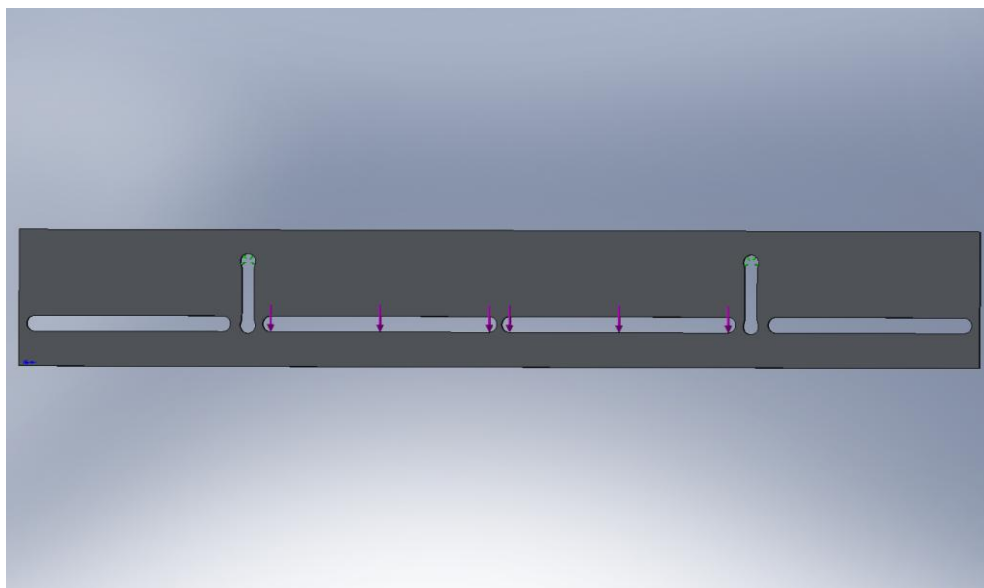


Figura 44-Avental inferior com quatro rasgos para os cilindros de compensação

Para estas situações e alterando diversos parâmetros das almofadas hidráulicas, tais como a sua posição e geometria, as placas exteriores revelam-se demasiado frágeis não aguentando as forças nelas exercidas e dando-se a ruptura.

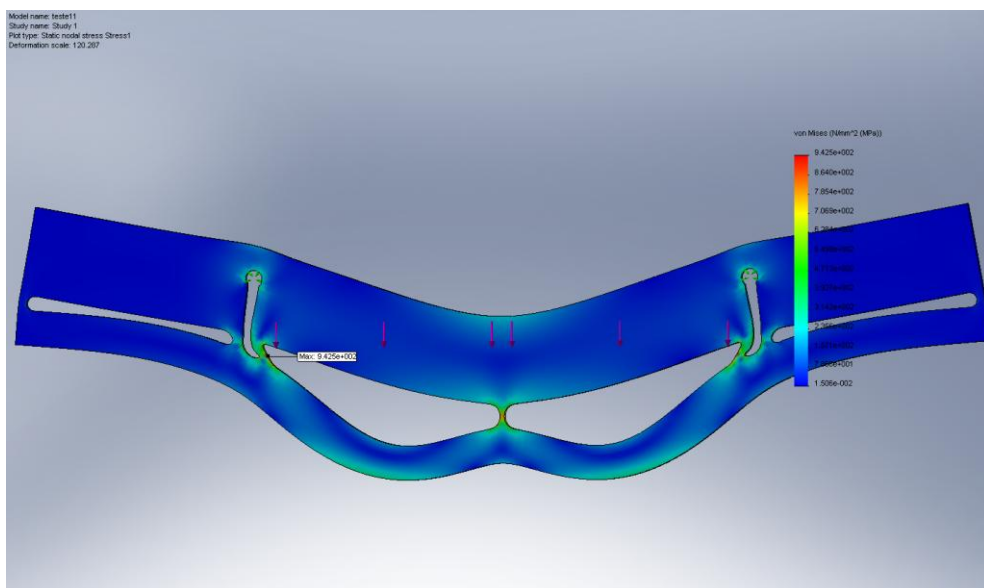


Figura 45-Tensões máximas no avental para o pior estado de carga

Como se pode ver pela figura as tensões geradas entre o apoio e o rasgo da primeira almofada hidráulica entre montantes são demasiado elevadas chegando a atingir os 942 MPa. O aço usado para os aventais tem uma tensão limite de cedência de 275 MPa.

Procurando diminuir o nível de tensões que aparece na zona de apoio dos cilindros, alterou-se o número de rasgos criados nas placas, passando cada cilindro a ter o seu próprio rasgo.

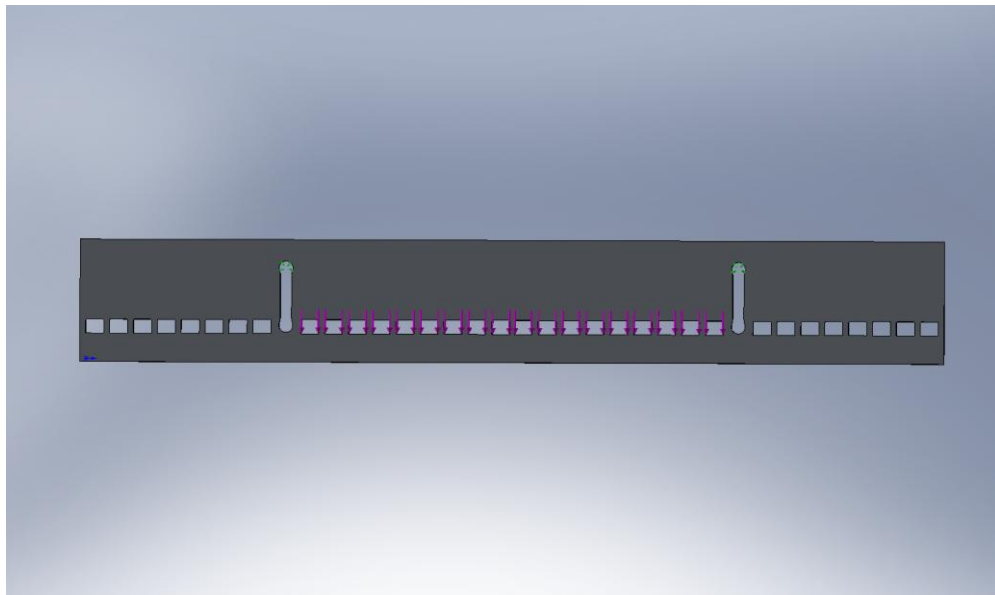


Figura 46-Avental inferior com um rasgo para cada cilindro de compensação

Assim foram criados 18 rasgos entre montantes, procurou-se o melhor posicionamento a dar e aplicou-se o pior estado de carga.

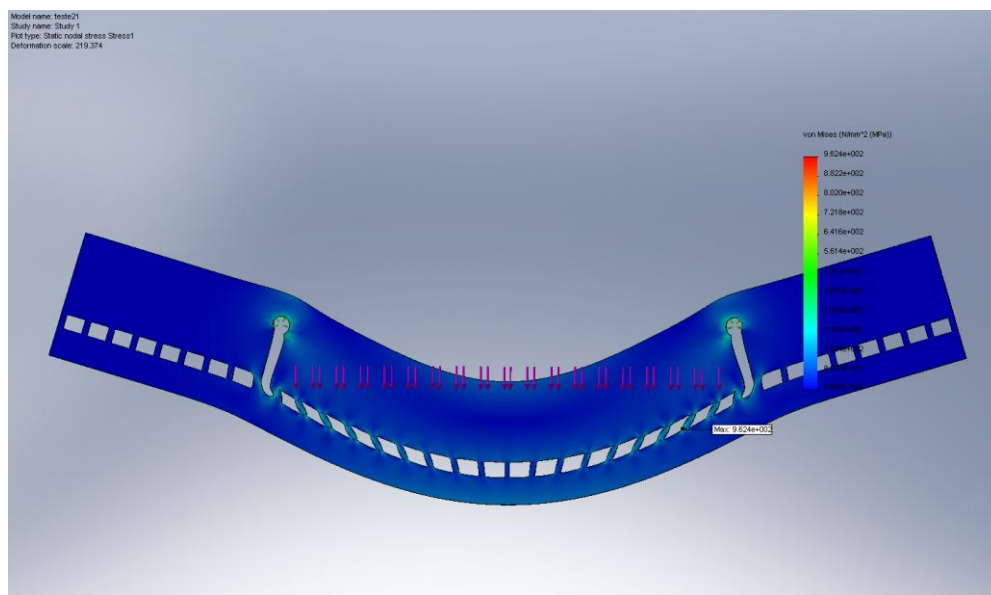


Figura 47-Tensões máximas no avental para o pior estado de carga

Mais uma vez as tensões máximas presentes nesta estrutura rondavam os 960MPa, embora nesta situação se encontrassem entre os primeiros rasgos junto aos apoios.

Por questões de fabrico, com o intuito de o simplificar e facilitar, reduzir o número de rasgos realizados no avental seria uma vantagem. Assim a próxima geometria usada teria 6 rasgos entre montantes, ou seja, em cada rasgo estariam apoiados 3 cilindros hidráulicos. Fora dos montantes, em cada bigorna, haveria mais dois rasgos com 4 cilindros hidráulicos cada.

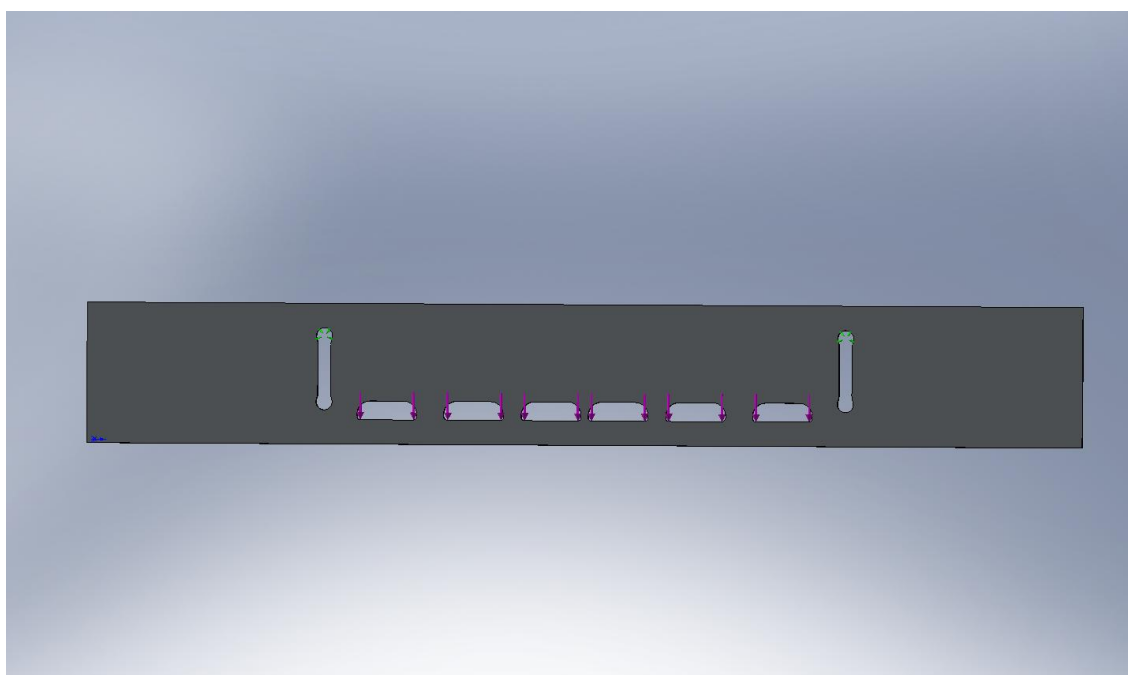


Figura 48-Avental inferior com um rasgo para cada três cilindros de compensação entre montantes

Mais uma vez é usado o estado de carga que produz as maiores tensões à estrutura.

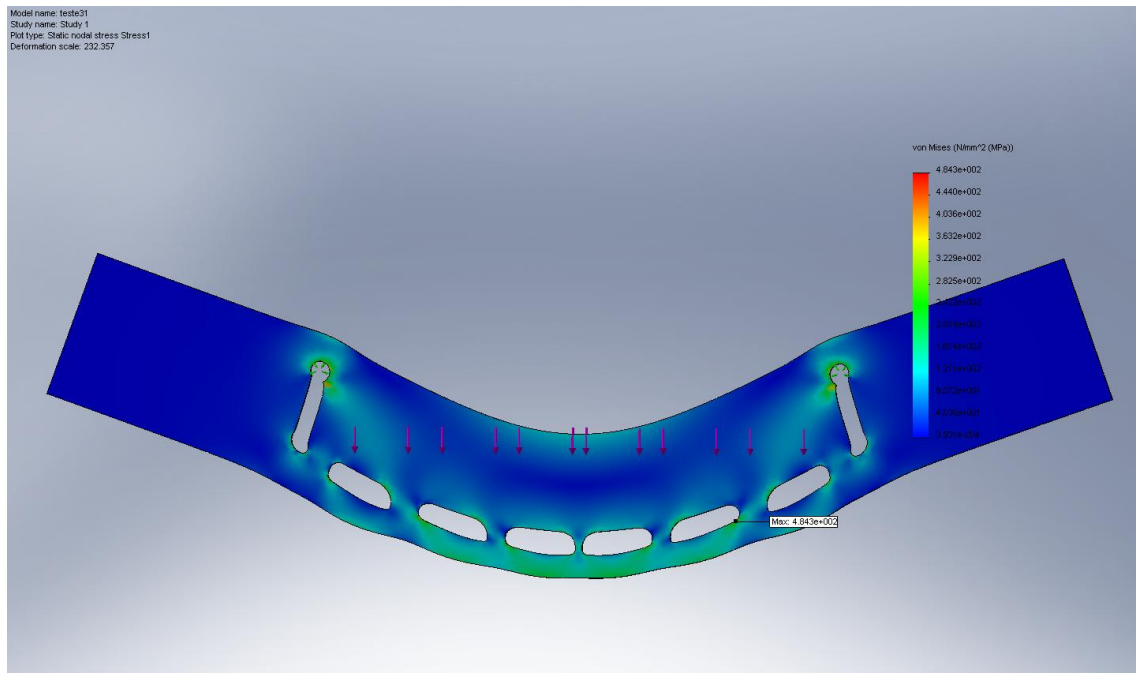


Figura 49-Tensões máximas no avental para o pior estado de carga

E mais uma vez a tensão máxima de 484MPa encontra-se bastante acima da tensão do limite elástico do aço de 275MPa, embora tenha diminuído para metade do caso anterior. A concentração excessiva de tensões encontra-se entre os primeiros dois rasgos. Quer se desloque um ou mais que um dos rasgos para a direita, ou para a esquerda, conferindo mais material e resistência entre si, esta concentração excessiva de tensões situa-se sempre entre os vários intervalos dos rasgos, ou entre o apoio e o primeiro rasgo, nunca desaparecendo. Não sendo possível diminuir o comprimento de cada rasgo, tentou-se modificar a geometria deste. Como as zonas de elevadas tensões, eram os extremos dos rasgos, tentou-se-lhes conferir uma geometria que as suavizasse. Assim obteve-se a seguinte geometria para o avental.

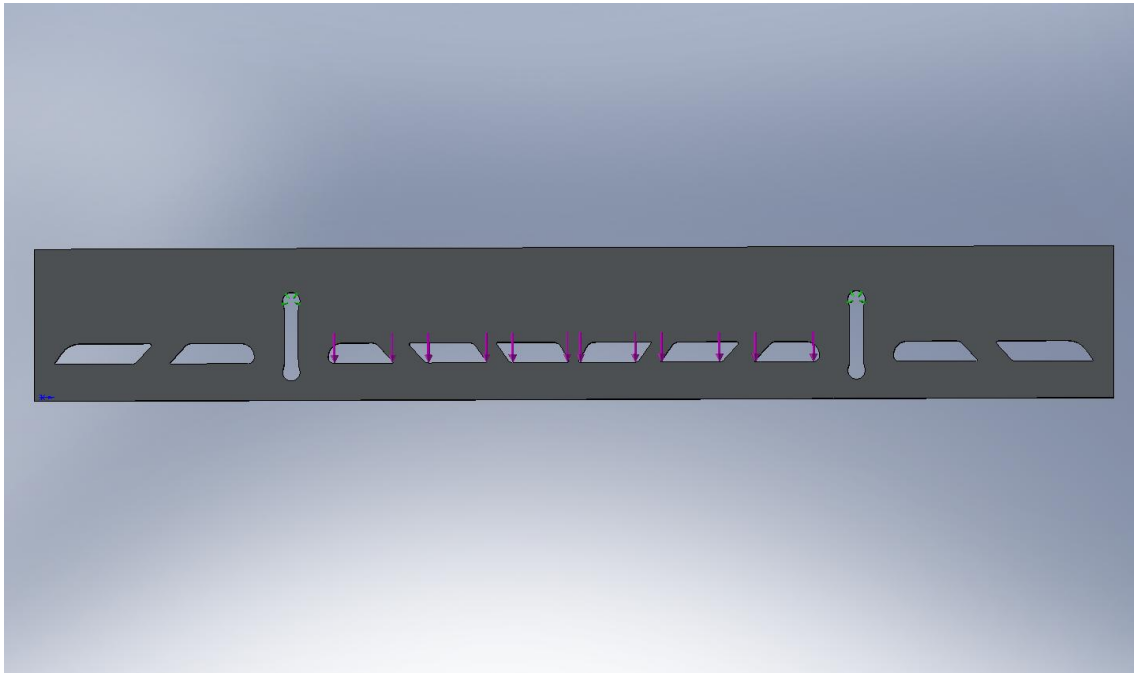


Figura 50-Avental inferior com um rasgo para cada três cilindros de compensação entre montantes

Onde a tensão máxima encontrada foi de 266MPa, no primeiro rasgo junto ao apoio. Apesar dos grandes progressos na diminuição das tensões elevadas estas ainda não se encontram em valores aceitáveis.

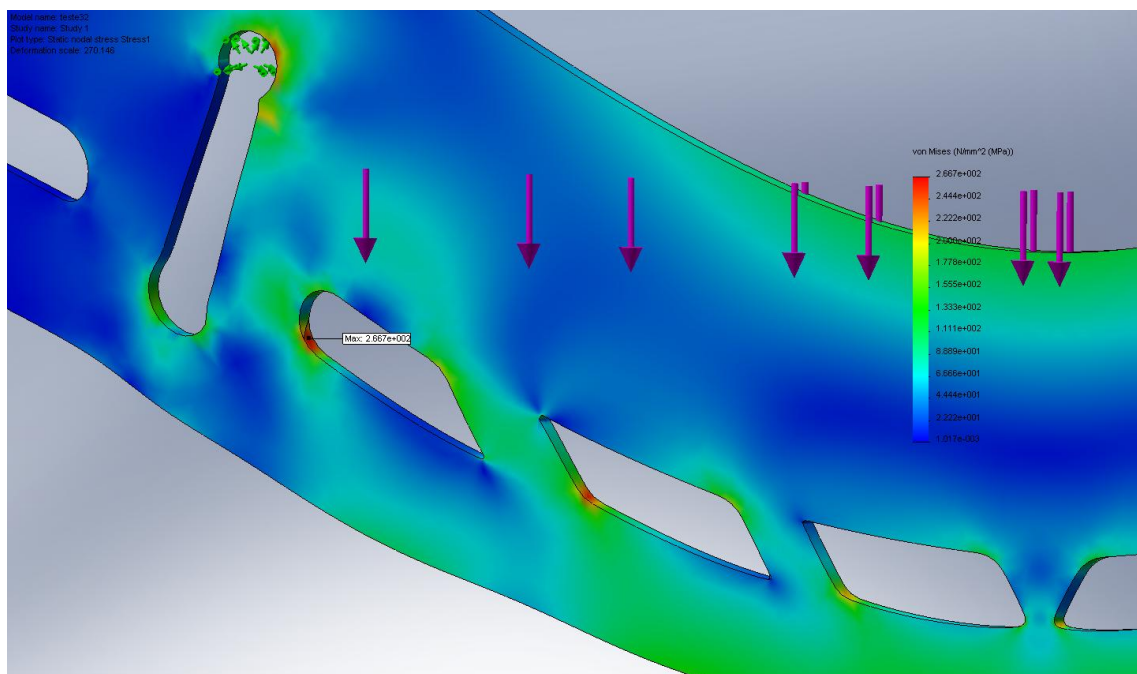


Figura 51-Tensões máximas no avental para o pior estado de carga

Após algumas modificações na geometria dos rasgos, que pouco diminuíram as tensões máximas, tentou-se eliminar o material existente entre o apoio e o primeiro rasgo, conseguindo assim, ganhar espaço para afastar mais os rasgos uns dos outros.

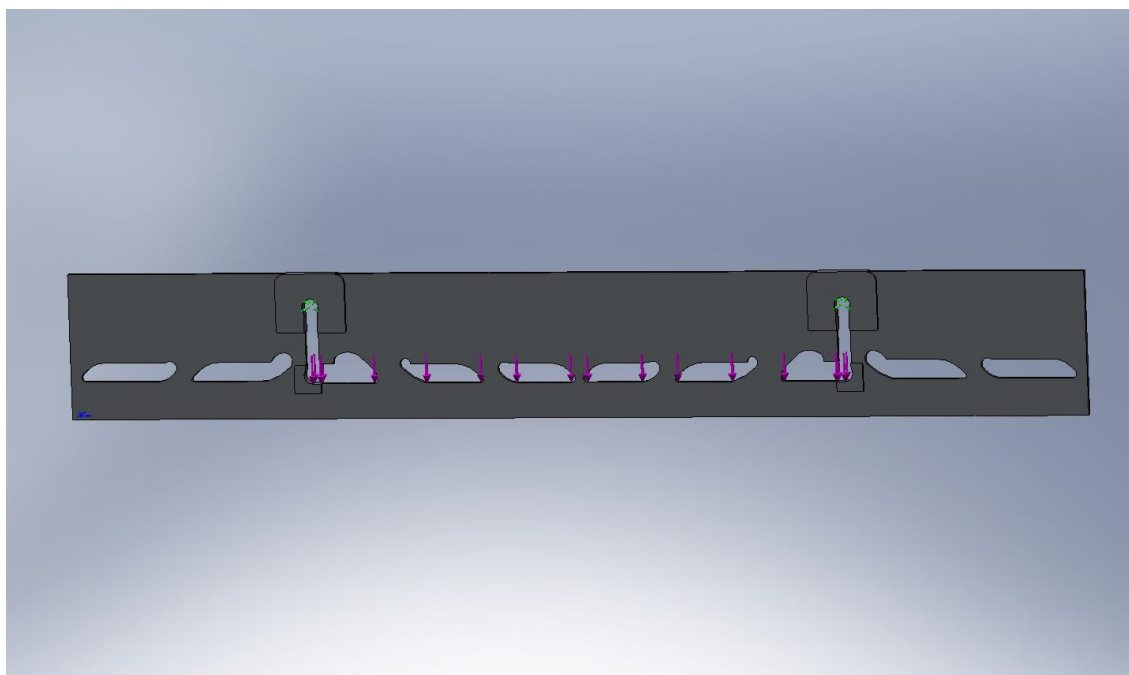


Figura 52-Avental inferior com um rasgo para cada três cilindros de compensação entre montantes

Esta solução requeria um reforço nos apoios, senão ultrapassariam o limite das tensões do aço. O reforço aqui dado aos apoios não seria o definitivo, a sua forma e espessura mereceram um posterior estudo.

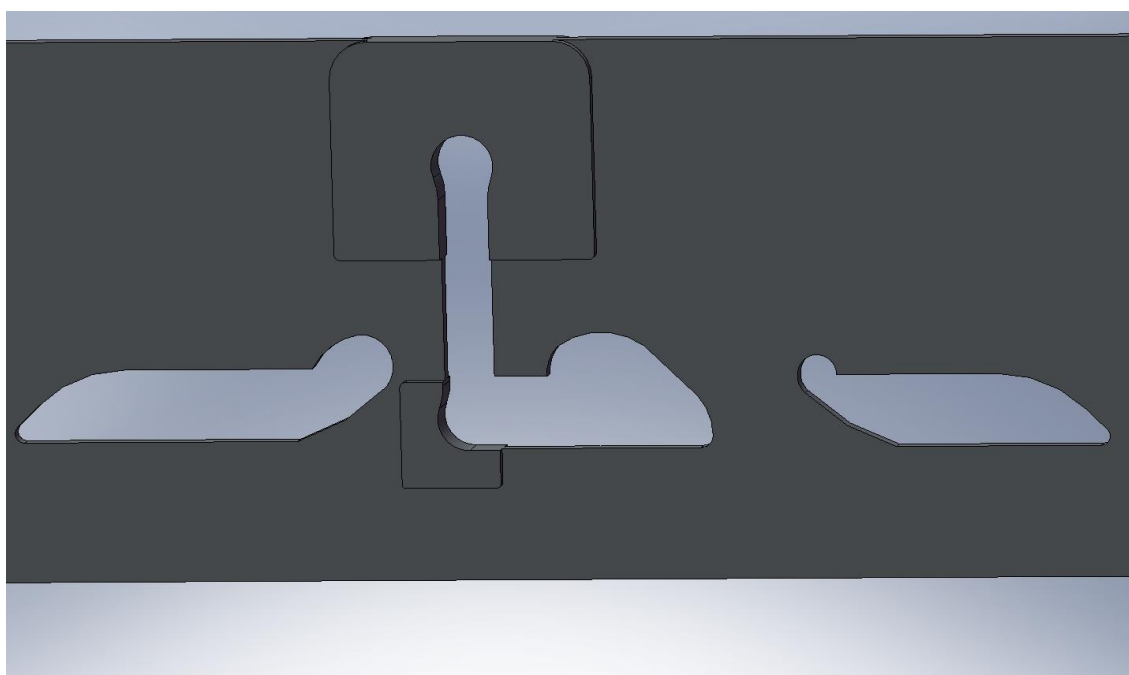


Figura 53-Avental inferior com o rasgo dos cilindros de compensação unido ao apoio

Verificou-se então que nas simulações o pior estado de carga usado até aqui, onde os cilindros hidráulicos actuados seriam os situados entre montantes, não era o que conferia maiores tensões a esta estrutura. Essa situação ocorre quando todos eles estavam em funcionamento, e obviamente na sua máxima pressão.

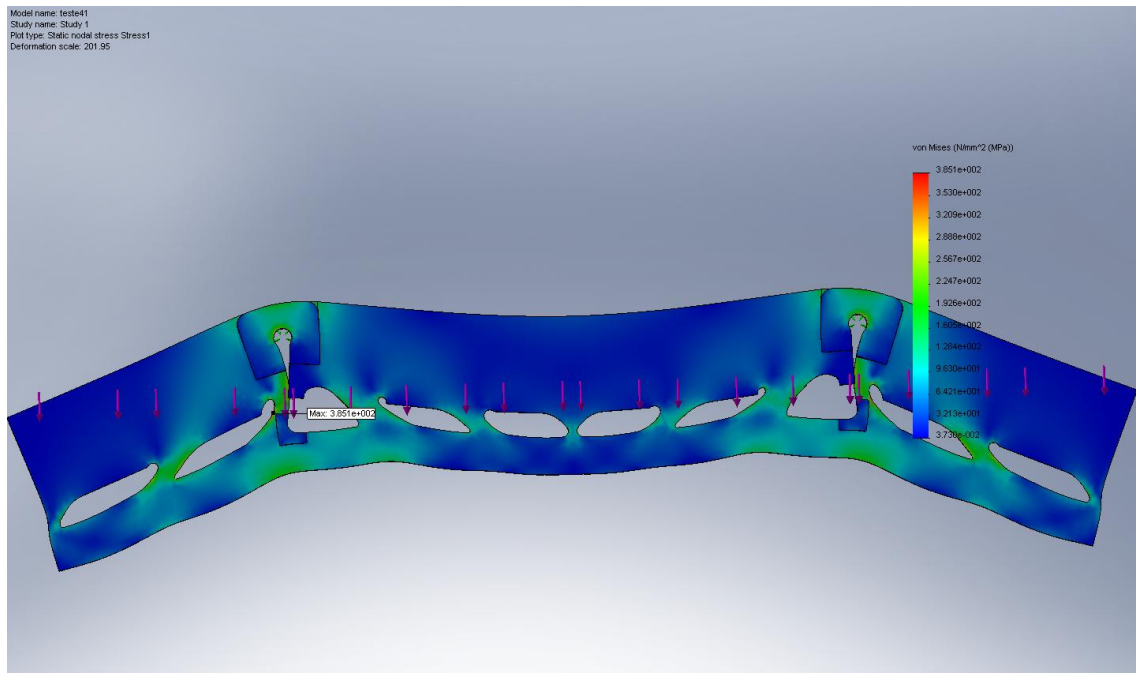


Figura 54-Tensões máximas no avental para o pior estado de carga

Esta solução tinha piorado em relação à anteriormente usada, tendo neste caso a tensão máxima de 365MPa e estando localizada no primeiro rasgo fora dos montantes.

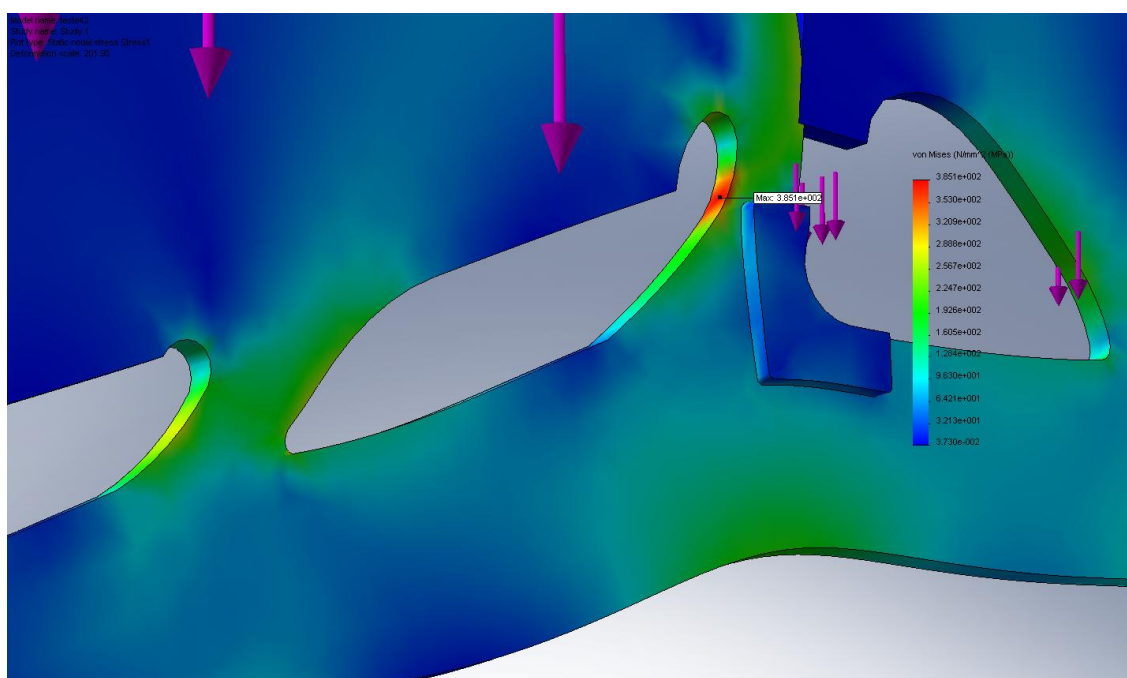


Figura 55-Local da tensão máxima no avental

Tentou-se então diminuir o número de rasgos existentes entre montantes colocando agora 4 cilindros por rasgo. Diminuiu-se assim de 6 para 4 os rasgos presentes entre montantes, tendo neste momento todos o mesmo comprimento e número de cilindros. Também aqui é necessário o uso de um reforço para os apoios, e o estado de carga que maiores tensões transmite à estrutura, é aquele cujo todos os cilindros se encontram na sua máxima pressão.

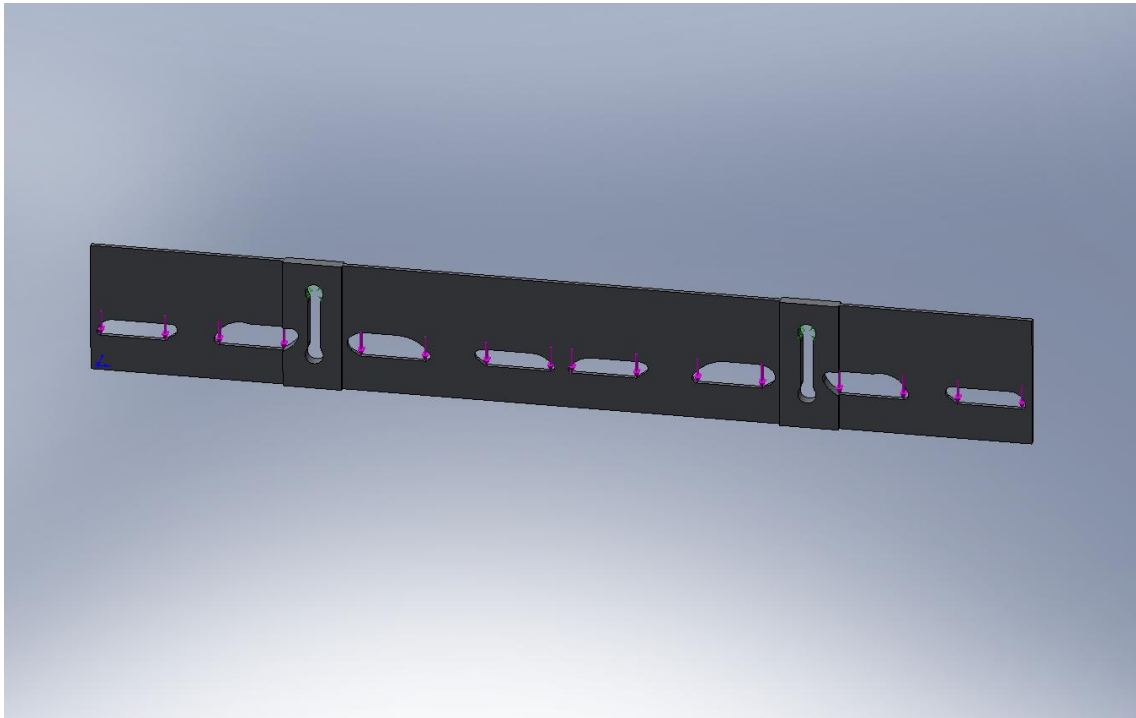


Figura 56-Avental inferior com um rasgo para cada quatro cilindros de compensação

A tensão máxima obtida foi de 252MPa situada no primeiro rasgo junto ao apoio.

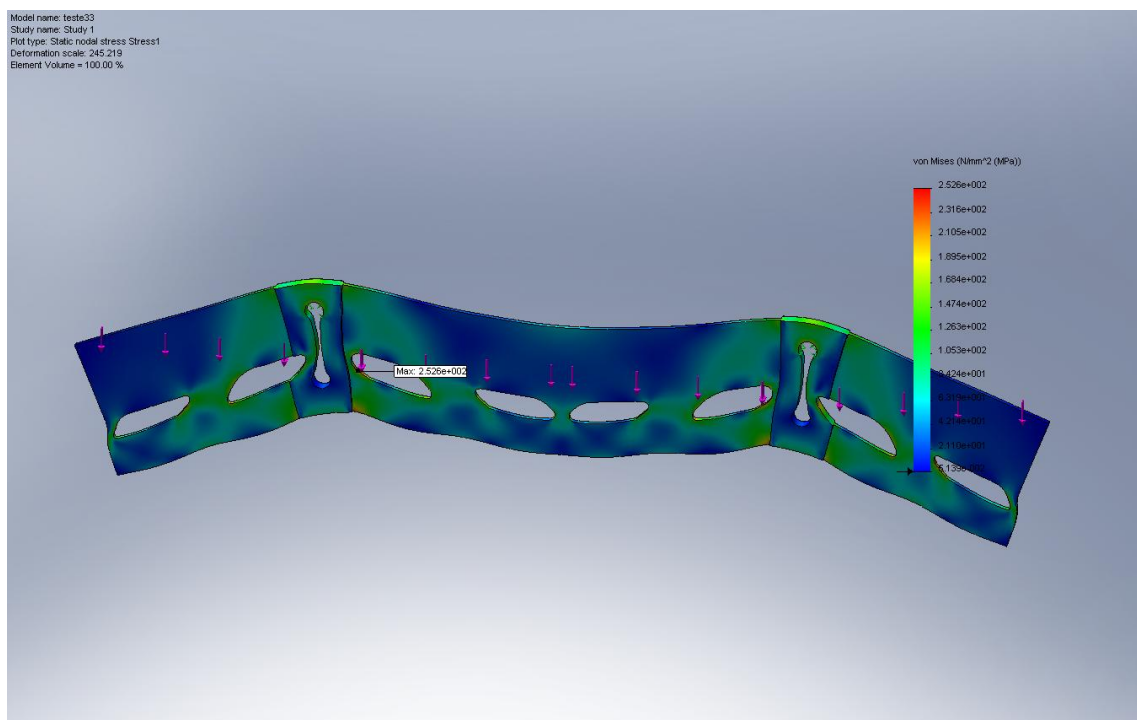


Figura 57-Tensões máximas no avental para o pior estado de carga

É obvio que o aumento da espessura desta estrutura tornaria a sua rigidez bastante maior e este problema das tensões elevadas estaria resolvido. Mas um dos grandes objectivos

deste sistema consistia em criar uma estrutura suficientemente resistente e que não ultrapassasse os 30mm de espessura.

Neste momento do estudo tentou-se mudar o diâmetro dos cilindros. Pretendia-se diminuir o número de cilindros aumentando o seu diâmetro. Realizaram-se vários testes, também eles com resultados não satisfatórios, onde as tensões máximas não desciam dos 250MPa. Para além disto estávamos a afastar-nos cada vez mais do modelo analítico, que já continha várias simplificações. A compensação gerada no avental inferior tinha como objectivo que este se deformasse paralelamente ao avental superior, o que pelo estudo analítico tinha sido garantido para um avental completamente preenchido pelas almofadas hidráulicas. Aqui, a melhor estrutura obtida para as placas exteriores coloca os cilindros muito concentrados em diferentes pontos do avental. Isto no nosso modelo analítico, consistia em forças concentradas e não distribuídas ao longo do avental. O que acarretaria maiores pressões para a obtenção das mesmas deformações e também alguns problemas para copiar certas deformações, devido às grandes descontinuidades existentes entre cada almofada hidráulica.

De seguida mostra-se um exemplo das deformações dos dois aventais quando é quinquada uma peça de 3,15 m, colocada entre montantes, sob uma força de 100ton/m (as deformações ilustradas correspondem somente à zona entre montantes).

Verifica-se que embora a compensação dada ao avental fixo não seja a melhor, devendo ter menos pressão nas almofadas hidráulicas centrais e ligeiramente mais pressão nas almofadas hidráulicas dos extremos, esta nunca obterá uma forma idêntica à deformação do avental superior, isto devido às forças concentradas do sistema de compensação.

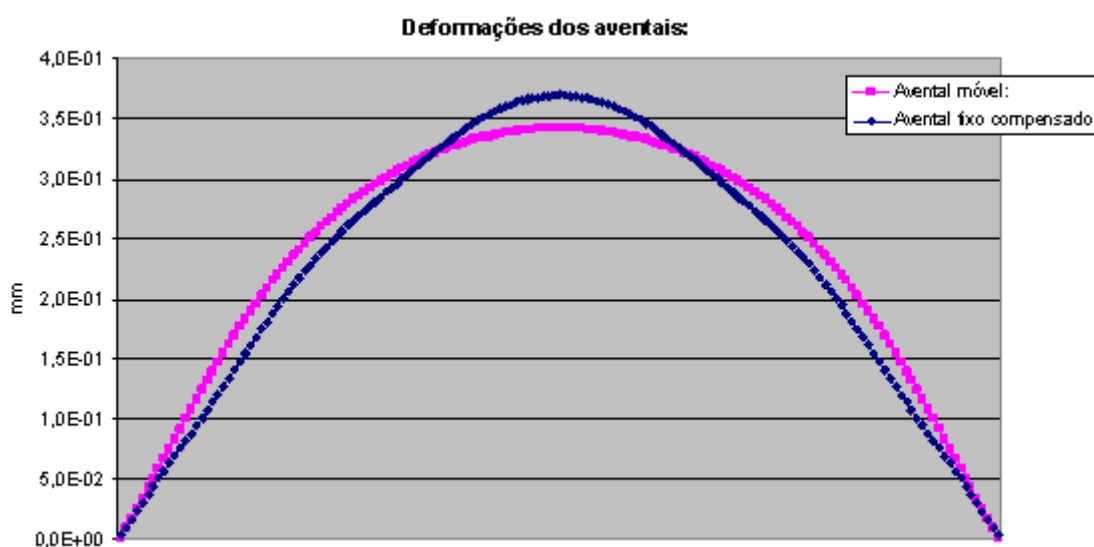


Figura 58-Deformação do avental móvel e do avental fixo compensado

Para resolver este problema os cilindros hidráulicos de compensação teriam que estar melhor distribuídos ao longo do avental.

Aborda-se então o problema com uma outra forma a dar aos rasgos, e com cilindros maiores. Agora, os rasgos seriam circulares, equidistantes e em o menor número possível, sendo neles colocados cilindros com o maior diâmetro permissível. Após algum estudo, foi possível dimensionar um cilindro com um diâmetro interior de 130mm e que necessitaria de um rasgo no avental de 200mm de diâmetro. Eram assim necessários 7 cilindros de compensação entre montantes e 3 em cada bigorna.

Materialização deste modelo

Mostra-se de seguida um desenho 3D sem componentes interiores e simplificado, demonstrando como o cilindro poderia ser materializado.

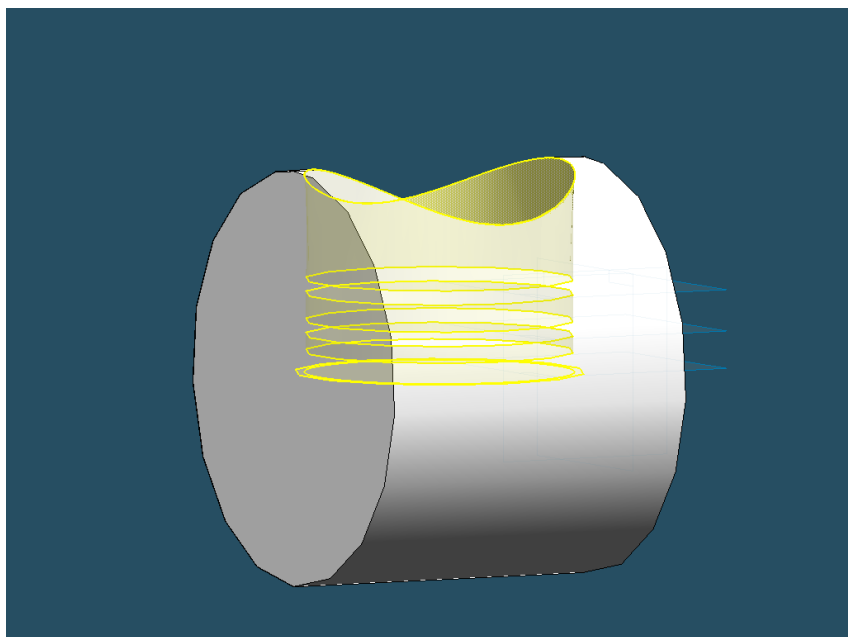


Figura 59-Cilindro de compensação simplificado

Os rasgos nas placas exteriores que recebem estes cilindros teriam a forma de um ovo. Permitindo assim remover cilindros para casos de eventual manutenção.

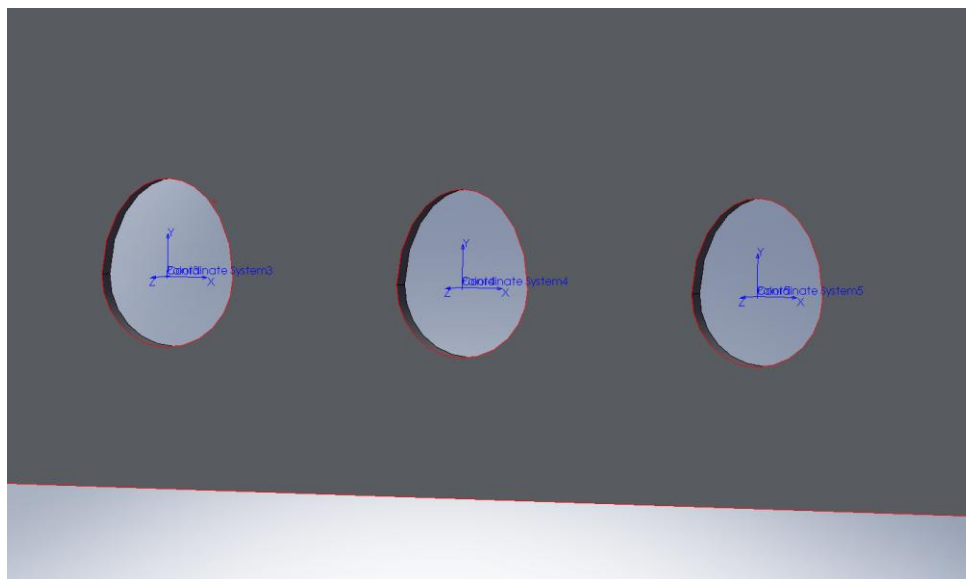


Figura 60-Placa exterior com os rasgos para a colocação dos cilindros de compensação

O método de corte destes rasgos seria por oxicorte onde posteriormente o semicírculo do rasgo seria rectificado, isto por ser esta a superfície de contacto com o cilindro e daí necessitar de maior precisão de acabamento. Também a placa interior é cortada por oxicorte adquirindo os seus rasgos uma geometria que facilita a rectificação da superfície superior do rasgo que entra em contacto com o pistão dos cilindros.

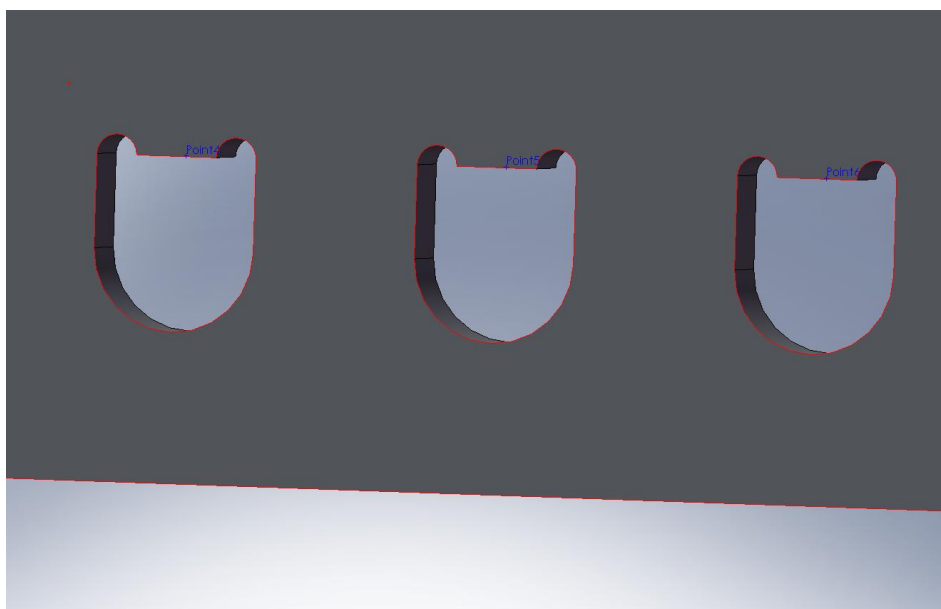


Figura 61-Placa interior com os rasgos para a colocação dos cilindros de compensação

Igualmente espaçados entre si, esta disposição de sete cilindros entre montantes e três em cada bigorna, permitiu diminuir as tensões máximas para as placas exteriores com a ajuda de uma alteração nos apoios.

Alteração dos apoios

Comparando o método analítico com o método numérico, constatou-se pequenas diferenças na forma das deformações obtidas. Mas é sobretudo nas deformações mais pronunciadas, obtidas pelo método numérico, que reside o maior erro. Um exemplo disto é uma quinagem entre montantes com uma força de 100ton/m exercida pelos aventais na peça, onde a deformação do avental superior e inferior na zona da peça se pode observar nas figuras seguintes. Verifica-se que a deformação máxima, pelo método numérico, é de 0,342mm, para o avental superior, cerca de 3 vezes mais que os 0,111mm obtidos pelo método analítico. Já no caso do avental inferior passa-se o contrário, a deformação máxima pelo método numérico é de -0,589mm e do método analítico é de -0,865mm, com uma diferença de 1,5 vezes maior. Ou seja, a deformação do avental superior pelo método numérico, deforma-se mais que o método analítico, já o avental inferior pelo método numérico, deforma-se menos que no método analítico. Seria de esperar que o método numérico se deformasse sempre mais, devido à sua menor rigidez para ambos os casos. Isto sucede, porque no método numérico a ligação dos aventais aos montantes é diferente. No avental superior as ligações podem ser representadas por duas rótulas, já no avental inferior estas ligações são duplas para serem mais rígidas e minimizar as deformações.

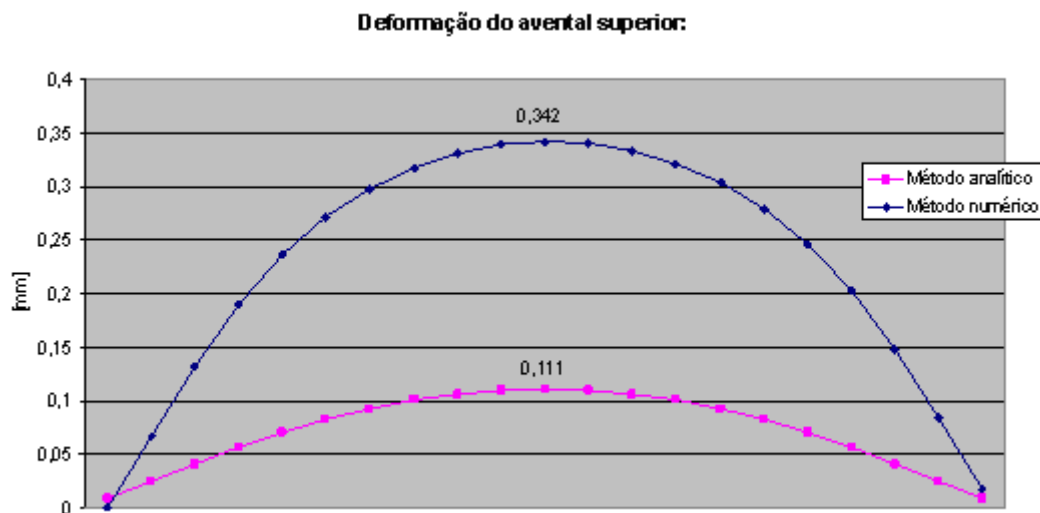


Figura 62 Deformação do avental superior pelo estudo analítico e pelo estudo numérico

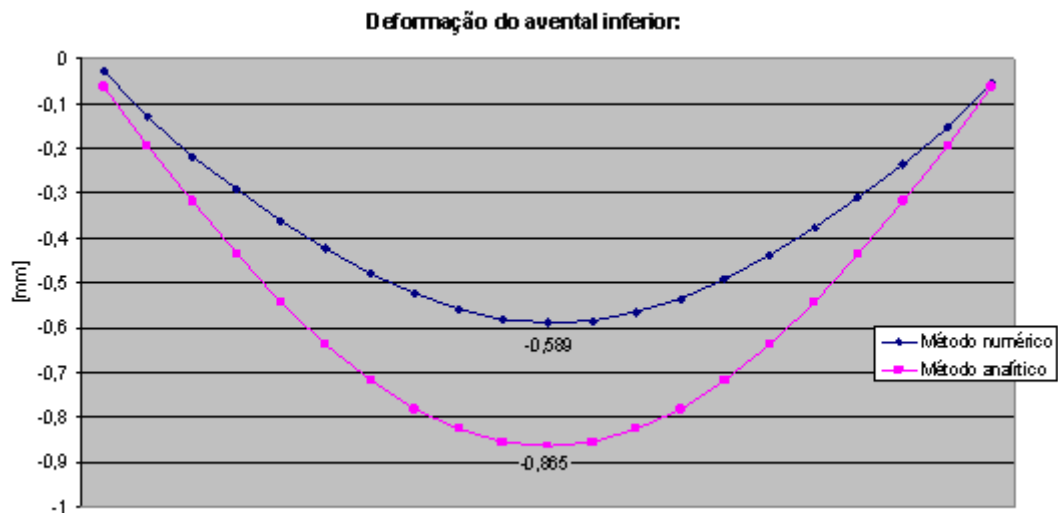


Figura 63-Deformação do avental inferior pelo estudo analítico e pelo estudo numérico

O facto destas deformações, pelo método dos elementos finitos serem mais pronunciadas e de forma diferente para o avental superior e inferior, implica maiores pressões nos cilindros das almofadas hidráulicas para garantir a compensação. Assim surge novamente o problema da pressão insuficiente nos cilindros de compensação.

Por forma a representar melhor o modelo analítico e conseguir obter, com a mesma pressão nos cilindros, uma melhor compensação, procurou-se modificar a ligação do avental aos montantes. Aplicando um funcionamento de duas rótulas a estas duas ligações procurou-se diminuir as tensões nas placas exteriores bem como melhorar a compensação criada, aproximando o modelo numérico do analítico, uma vez que analiticamente se representou uma viga simplesmente apoiada.

Assim apresenta-se de seguida como eram feitas estas ligações aos montantes e quais as mudanças necessárias para que funcionassem como uma rótula.

Através de duas peças com a forma de um semicilindro, dá-se a ligação do montante ao avental possibilitando este ter uma ligeira liberdade. Para que o apoio funcionasse como uma rótula os eixos destes semicilindros, segundo o qual eles se poderiam movimentar, teriam de ser os mesmos. Assim as superfícies que se poderiam movimentar entre si teriam que ser concêntricas. Estas superfícies necessitariam de grande precisão e para isso teriam que ser mandriladas. Daí o ser necessário criar uma segunda peça (peça 1), ligada ao avental, com um raio exterior pequeno capaz de ser mandrilado no avental sem que o restante da geometria

deste rasgo fosse alterado. Esta mesma peça teria um raio interior necessário para que as superfícies de deslizamento fossem concêntricas. Assim a peça 2 ao entrar em contacto com a peça 1 poderia deslizar como uma rótula. Esta forma de materialização prende-se pelo facto de não ser possível maquinar o enorme raio interior da peça 1 no avental.

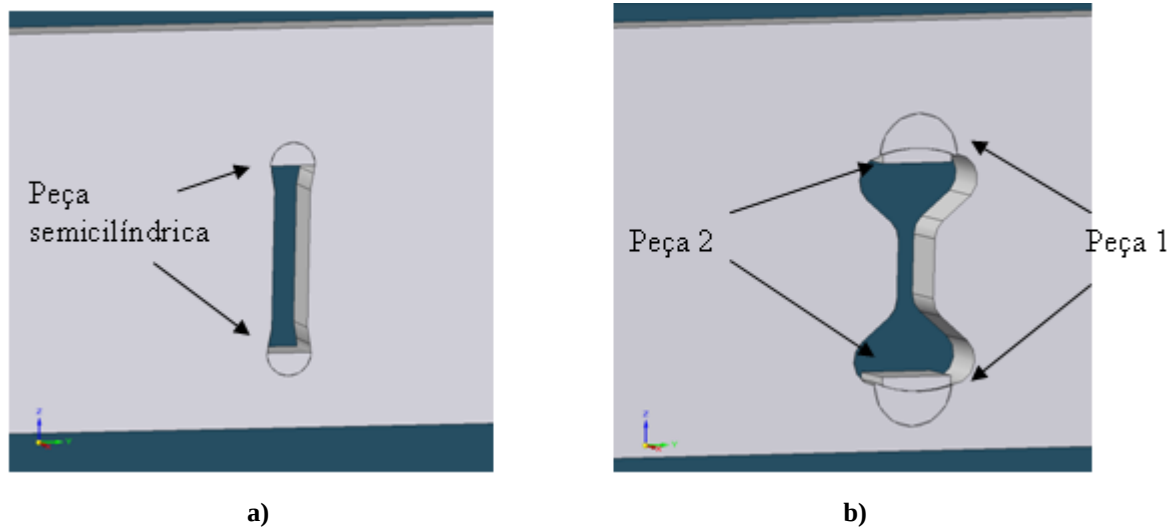


Figura 64-Modificação dos apoios para um funcionamento em rótula: a) Apoio normal; b) Apoio em rótula

De seguida mostra-se a deformação entre montantes do avental inferior, com os apoios normais e com os apoios modificados, quando é quinada uma peça nas mesmas condições do exemplo anterior. Pode-se constatar que a deformação aumenta bastante quando introduzimos os novos apoios, o que permite concluir que o avental com os apoios modificados, quando actuado pelos cilindros de compensação, terá uma deformação bastante maior para a mesma pressão nos cilindros. Desta forma é possível efectuar uma mesma compensação reduzindo a pressão nas almofadas hidráulicas.

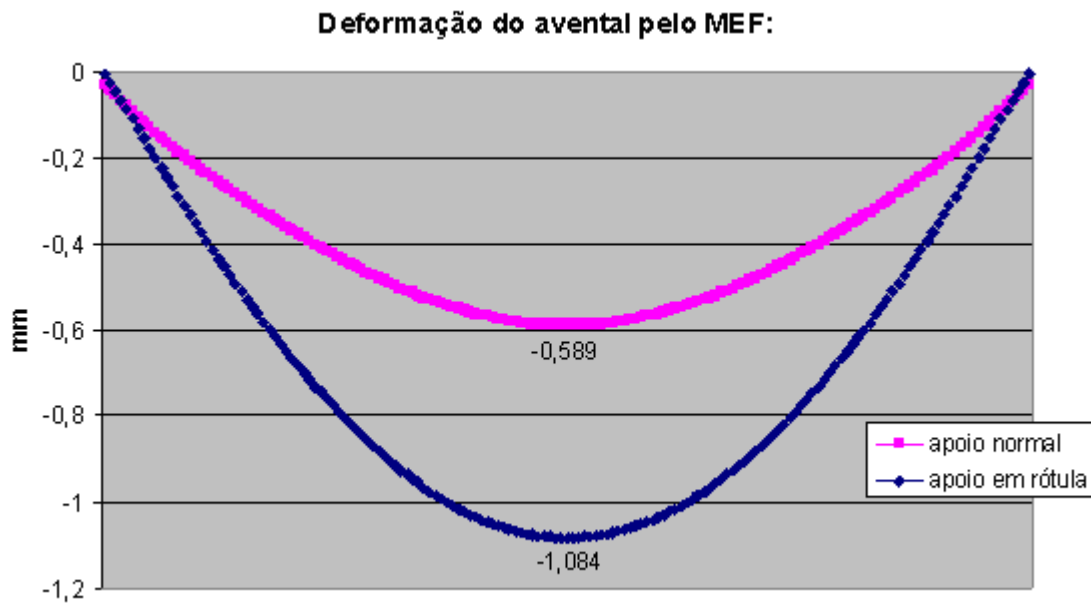


Figura 65-Deformação do avental inferior com apoios normais e com apoios em rótula

Uma outra vantagem destes apoios é que permite que este avental inferior copie com bastante mais precisão a deformação do avental superior, principalmente nas zonas junto dos apoios e fora destes.

Outro parâmetro de importante influência na compensação do avental e nas tensões das placas exteriores é a posição dos cilindros hidráulicos relativamente aos apoios. Após um estudo sobre esta influência, no qual se imobilizou os cilindros e se fez movimentar verticalmente os apoios, verificou-se:

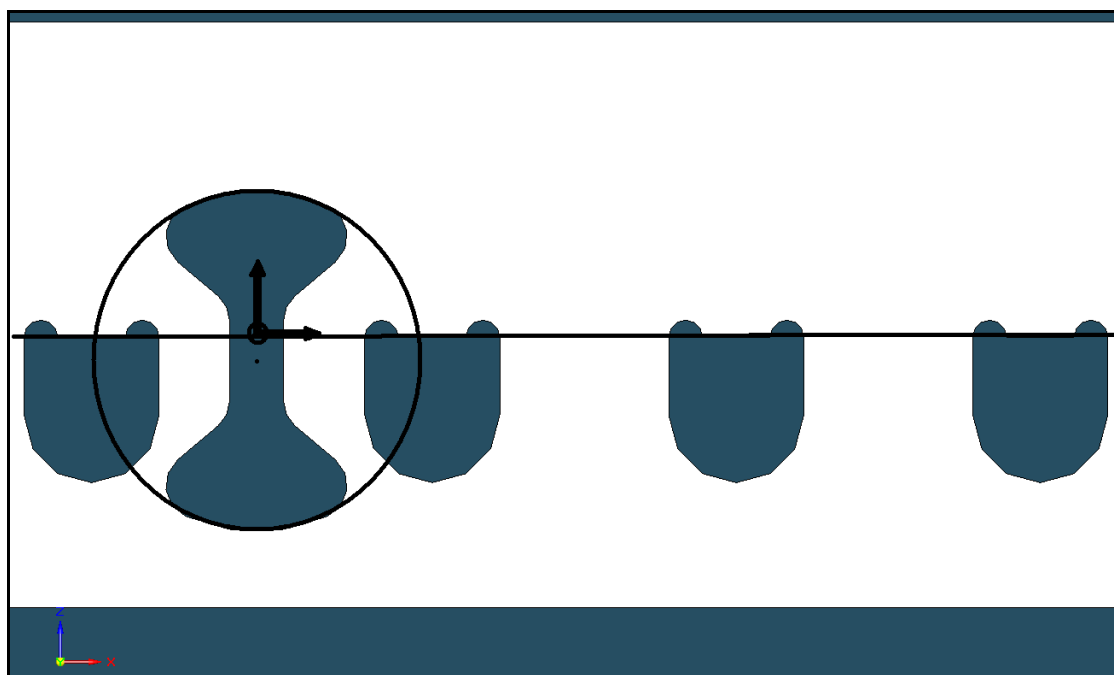


Figura 66-Vista frontal da placa interior do avental

-Para a placa interior (avental), a qual sofria compensação e entrava em contacto com a peça a quinar, colocou-se um referencial num plano fixo sobre o qual se dá o contacto dos pistões com esta placa. Representado este plano na figura, por uma linha, e o eixo segundo o qual o apoio gira, por um ponto, obteve-se os seguintes resultados:

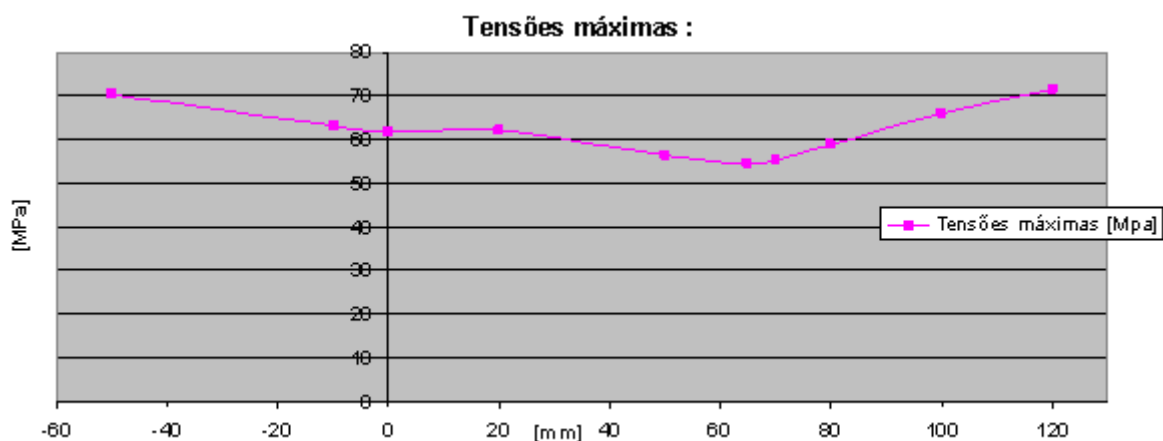


Figura 67-Variação das tensões máximas com o deslocamento dos apoios, na placa interior

Observa-se um ponto mínimo das tensões máximas, para a placa interior, quando o centro dos apoios se encontra aproximadamente a 60mm de distância do plano de referência.

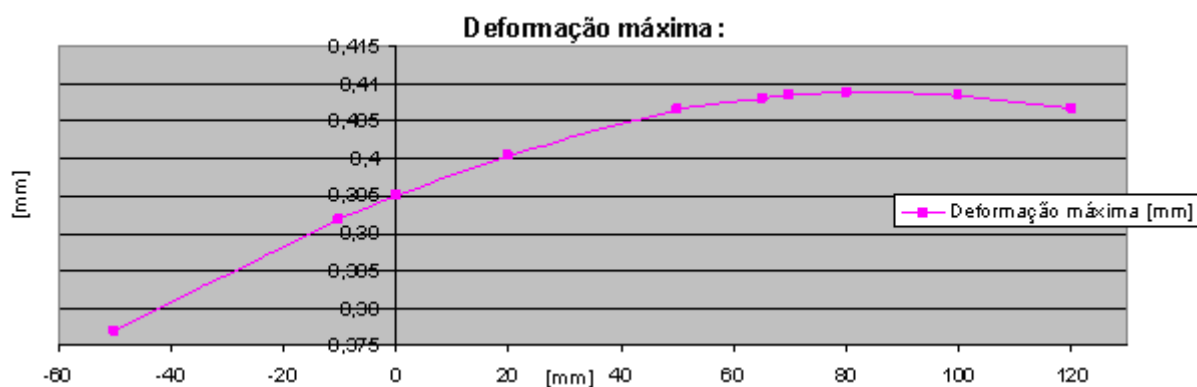


Figura 68-Variação dos deslocamentos máximos com o deslocamento dos apoios, na placa interior

Também a deformação máxima tem um pico para posições em que o centro dos apoios se coloca 80mm acima do plano de referência.

Desta forma podemos concluir que para a placa interior o centro dos apoios deve-se encontrar entre os 60mm e os 80mm acima do plano de referência, obtendo-se assim a

máxima deformação e mínima tensão para a mesma pressão aplicada aos cilindros de compensação.

-Para as placas exteriores (estas com um reforço nos apoios de 15mm de espessura para ambos os lados) usou-se o mesmo plano de referência, representado na figura por uma linha, e da mesma forma, mantendo os cilindros fixos e movendo os apoios verticalmente, obteve-se os seguintes resultados:

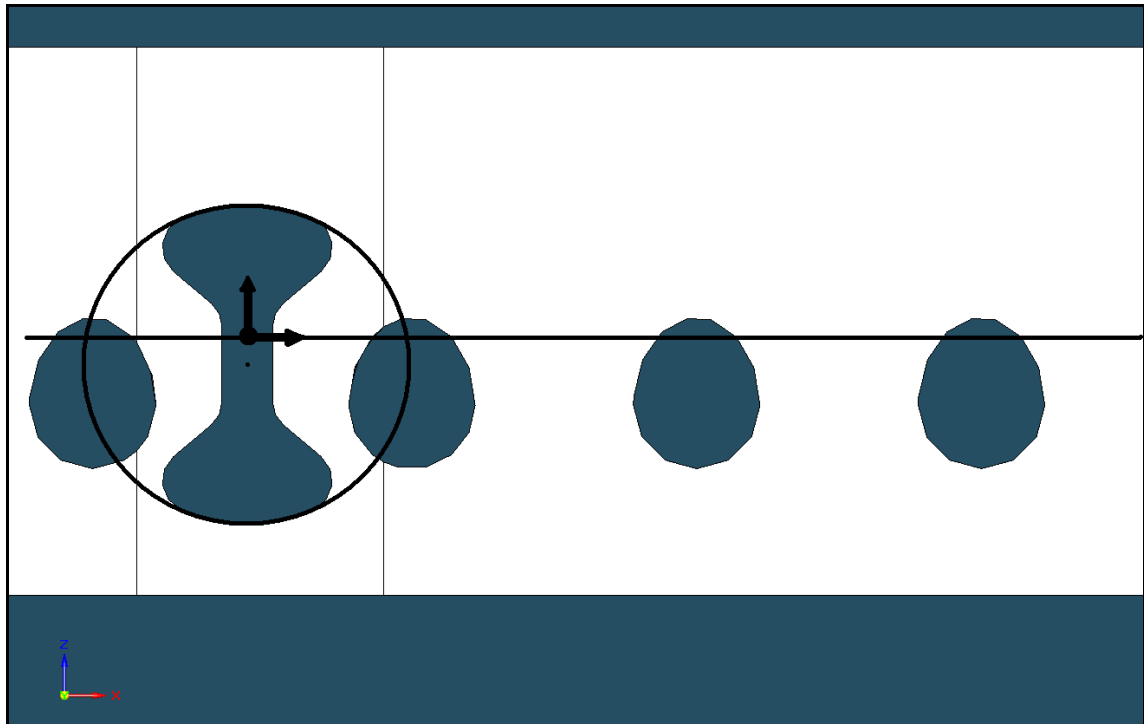


Figura 69-Vista frontal da placa exterior do avental

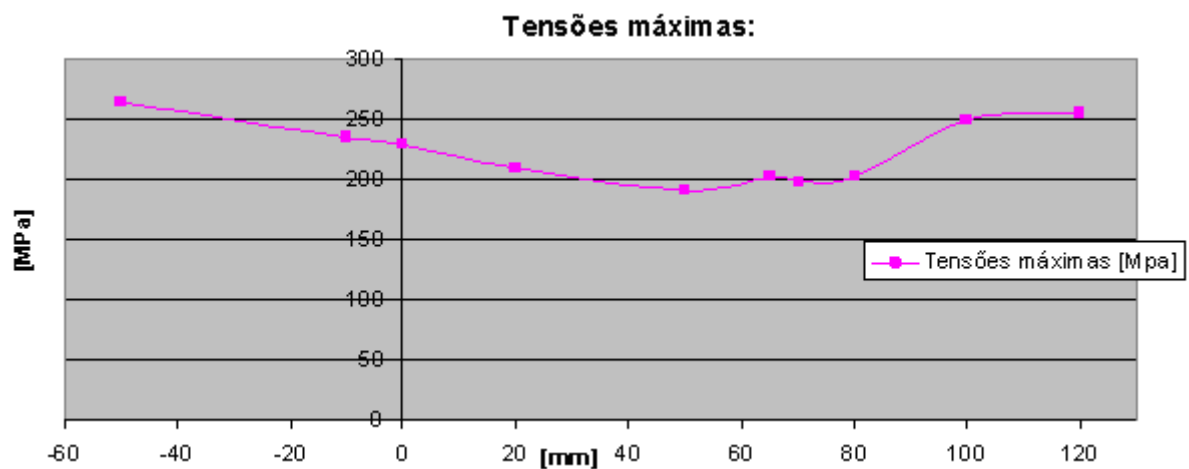


Figura 70-Variação das tensões máximas com o deslocamento dos apoios, na placa exterior

Observa-se que à medida que os apoios se vão deslocando verticalmente as tensões máximas vão diminuindo, oscilando numa zona mínima e aumentando posteriormente.

O intervalo dos valores mínimos da tensão encontra-se entre os 40mm e os 80mm.

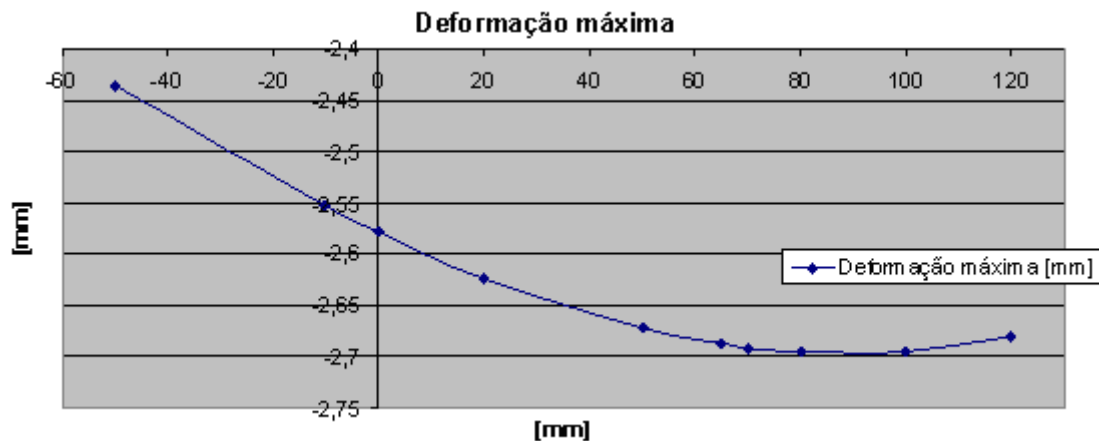


Figura 71-Variação dos deslocamentos máximos com o deslocamento dos apoios, na placa exterior

Com menos relevância a deformação das placas exteriores obtém também um máximo na zona dos 80mm de distância dos apoios ao plano de referência, com uma deformação máxima próxima dos 2,7mm.

Os dois aspectos com maior interesse seriam obter o mínimo de tensões para as placas exteriores, uma vez estas estarem com pouca margem de segurança, e obter o máximo de deformação de compensação da placa interior (avental) com a mesma pressão nos cilindros. Desta forma o valor dado à distância do apoio ao plano de referência foi de 50mm, e assim obteve-se o mínimo de tensões possível, com um valor máximo de 190,6MPa, para uma grande deformação na compensação.

Sabendo então qual o melhor posicionamento relativo entre os apoios e os cilindros de compensação, era necessário saber qual o seu melhor posicionamento no avental. Fez-se então um estudo, usando o referencial anterior que se encontrava a 400mm acima da base do avental, deslocando verticalmente os apoios e os cilindros de compensação, em conjunto, ao longo do avental. Obtiveram-se as seguintes tensões máximas:

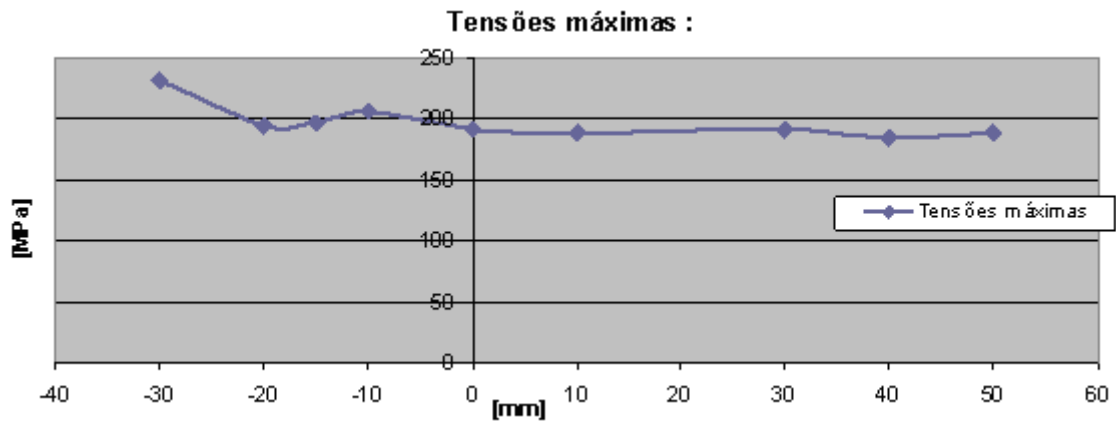


Figura 72- Variação das tensões máximas com o deslocamento dos apoios e dos cilindros de compensação

Observa-se um oscilar da tensão máxima à medida que se foi deslocando os apoios e os cilindros, obtendo-se um pico mínimo aos 40mm com o valor de 183,9MPa.

Este deslocamento dos apoios e cilindros de 40mm provocou um diminuir ligeiro da deformação máxima da placa interior de 0,4065mm para 0,401mm.

Assim alcançou-se a melhor solução, que coloca o centro dos apoios a 455mm da base do avental e o centro dos cilindros a 340mm da mesma, com uma tensão máxima de 183,9MPa para uma situação em que era usado um reforço nos apoios de 15mm de espessura para cada lado do avental. O retirar deste reforço coloca o avental com uma tensão máxima de 304,8MPa na zona dos apoios das placas exteriores. Isto ultrapassaria a tensão limite de cedência do aço. O colocar dum reforço de 20mm de espessura num dos lados do avental reduz a tensão máxima para 244,2MPa. Como a tensão de cedência do aço usado é de 275Mpa o limite de segurança seria muito pequeno.

Modelo Final

Uma das formas mais simples e económicas de alimentação dos cilindros hidráulicos de compensação seria pelo circuito que alimenta os cilindros principais da quinadora. Como consequência, a pressão máxima obtida nos cilindros de compensação seria aquela que estava a ser usada nos cilindros principais durante o trabalho de quinagem. Após um estudo sobre a viabilidade deste processo concluiu-se que para quinagens de peças pequenas, que exigiam pequenas forças de quinagem e portanto pressão baixa nos cilindros principais, o sistema de compensação necessitava duma pressão mais alta. Também se concluiu que para a mesma peça a ser quinada, na mesma zona de quinagem, a pressão necessária no sistema de

compensação é proporcional à pressão dos cilindros principais. Haveria assim o problema da pressão baixa no sistema de compensação para algumas quinagens.

Ao longo do desenvolvimento deste sistema foram colocadas várias alternativas para resolver a insuficiência de pressão nos cilindros de compensação. Esta insuficiência tinha como consequência uma incorreta compensação deste sistema, não atingindo os valores de paralelismo desejados, nem os obtidos pelo estudo analítico. Uma das soluções colocava cilindros de duplo efeito ao longo do avental. Estes tinham como vantagem aplicar a sua força em dois sentidos, ascendente e descendente, à placa interior. Conseguia-se assim melhorar os resultados da precisão de compensação. Outra solução e mais simples consistia em ter uma bomba independente a alimentar os cilindros de compensação. Esta solução embora mais cara apresentava bons resultados. Uma outra solução consistia num controlo independente de cada cilindros. Também esta solução apresentava melhores resultados. Contudo o conjugar destas soluções revelava resultados extraordinários, garantindo o sistema uma precisão no erro de paralelismo de $1\mu\text{m}$ ou até menos.

Assim atingido o objectivo de uma precisão para além do necessario era fundamental tornar o sistema o mais simples e económico possível cumprindo a precisão de $0,05\text{mm}$ de erro de paralelismo.

Desta forma, simplificando as soluções anteriormente referidas mas garantindo a precisão desejada obteve-se o seguinte modelo:

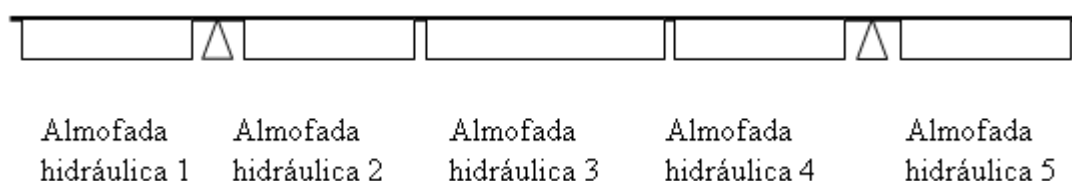


Figura 73-Disposição das almofadas hidráulicas ao longo do avental

Duas almofada hidráulica nas bigornas com 3 cilindros cada e três almofadas hidráulicas entre montantes, a almofada central com 3 cilindros e as outras duas com 2 cilindros cada. Era então necessario um controlo independente de 5 almofadas hidraulicas. Ao circuito hidráulico adicionou-se um elemento extra para resolver o problema das pressões.

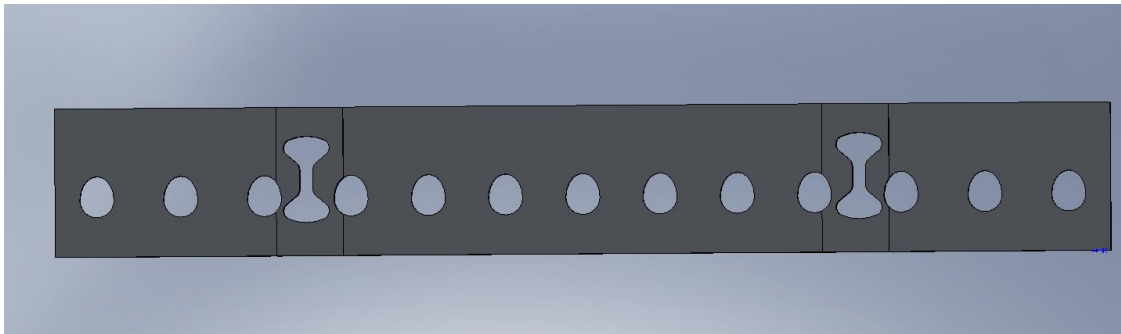


Figura 74-Placa exterior final

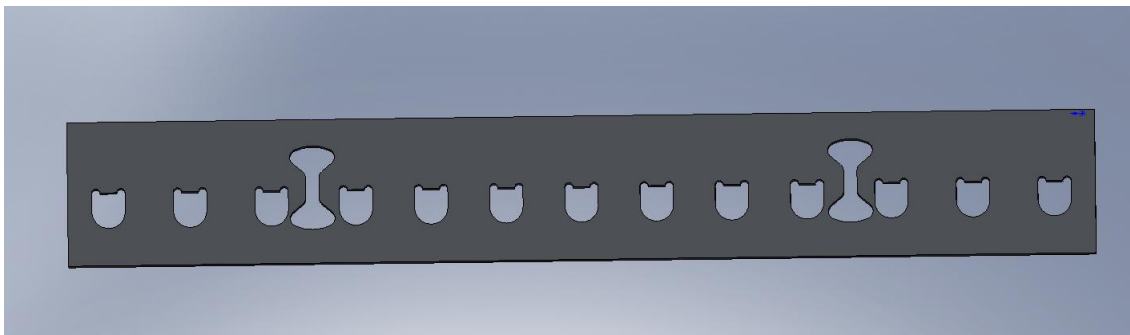


Figura 75-Placa interior final

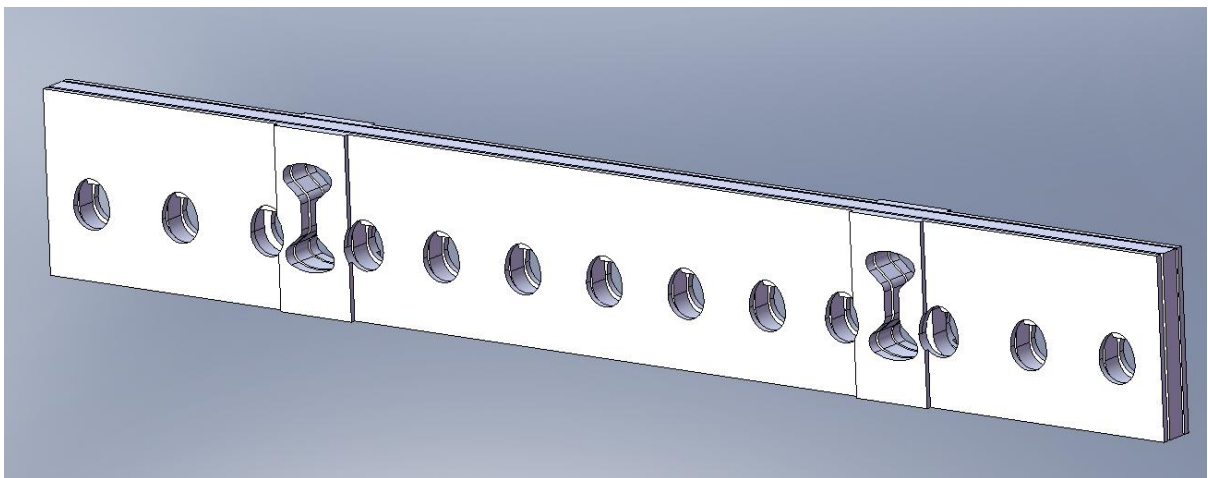


Figura 76-Modelo final

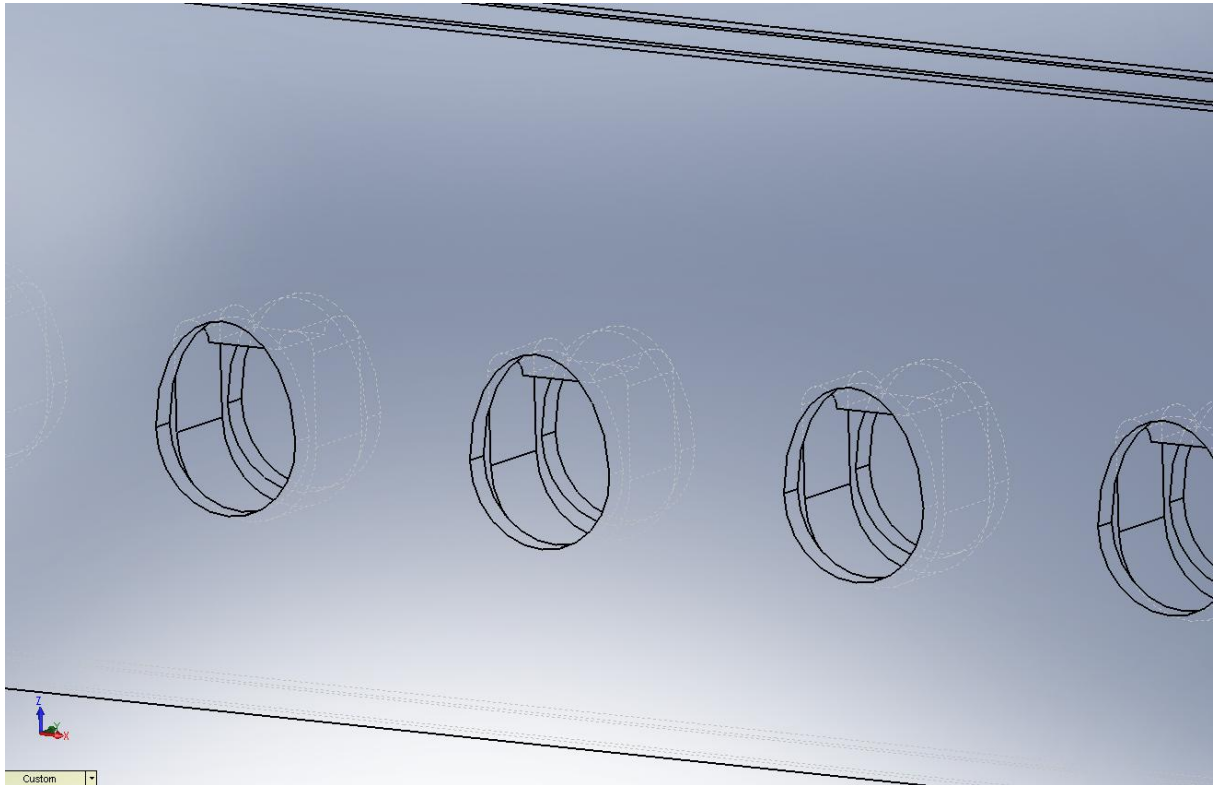


Figura 77-Rasgos aplicados às três placas

Circuito Hidráulico

Uma vez que a estrutura estava dimensionada para aguentar 30MPa de pressão em cada cilindro de compensação, e que para quinagens de pequenas peças a pressão nestes cilindros tinha que ser mais alta que a obtida pelos cilindros principais, adicionou-se um multiplicador de pressão (representado na figura pelo actuador 0A1), que não é mais do que um cilindro com diferentes áreas para os dois lados do seu êmbolo. Assim este multiplicador de pressão tinha como função duplicar a pressão de entrada. Esta, antes, teria de passar por uma válvula redutora de pressão de comando directo (representada por 0V1) não permitindo a pressão ultrapassar os 15MPa. Assim garantia-se a pressão limite de 30MPa à saída do multiplicador de pressão. Para situações de quinagem em que a pressão no circuito baixa-se dos 15MPa, situações de baixa pressão, à saída do multiplicador teríamos sempre o dobro desta pressão. O que pelo estudo feito é pressão suficiente para garantir uma correcta compensação de quinagem. Cada almofada hidráulica teria uma válvula redutora de pressão de três orifícios (válvula 0V3, 0V4, 0V5, 0V6 e 0V7) permitindo através dum sinal eléctrico limitar a pressão ou reduzi-la libertando-a para o exterior do circuito. Se o volume de óleo no circuito das almofadas diminuir, é restituído através da válvula de retenção (representada por 0V2).

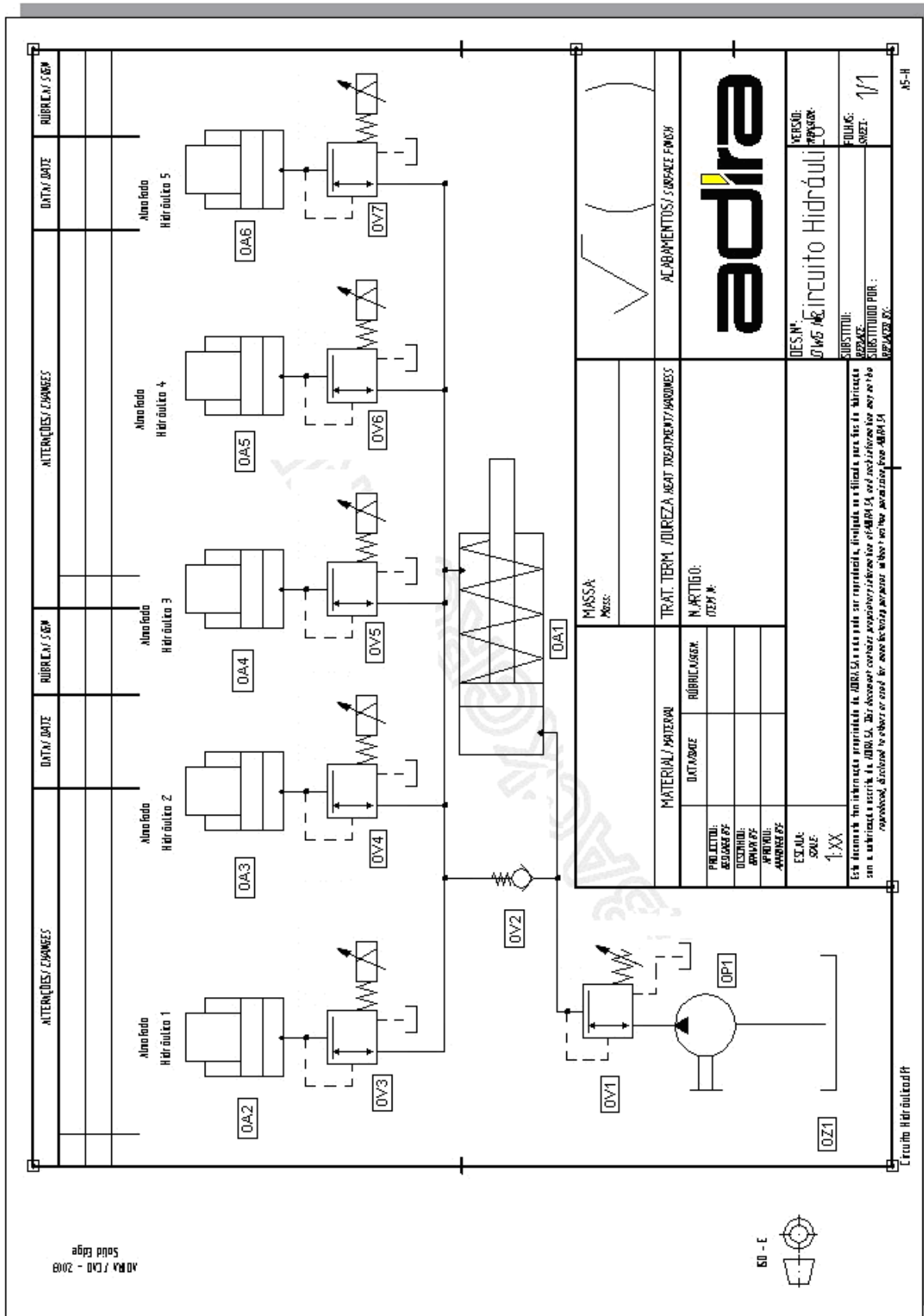


Figura 78-Circuito hidráulico

Método de controlo

Todo este sistema, para o seu correcto funcionamento, requer uma informação exacta do erro de quinagem produzido na peça. Assim, este sistema torna-se ineficiente sem esta informação. Uma das formas possíveis para se determinar o erro de quinagem e assim compensá-lo seria através de um método analítico, tal como o efectuado neste projecto. Desta forma seria possível somente com dois parâmetros obtermos a deformação de todo o avental. Sabendo a relação de pressões entre os cilindros principais e o comprimento da peça é possível calcular a posição exacta desta ao longo da quinadora e assim determinar analiticamente as deformações dos seus aventais. Uma forma simples de obter estes parâmetros seria através dum sensor de pressão em cada cilindro principal, sendo o comprimento da peça introduzido no sistema pelo operador.

Este método carece de um bom cálculo analítico que represente correctamente a deformação dos aventais. Mas sendo em malha aberta qualquer desvio no modelo traduz-se num erro que nunca será corrigido.

Um outro método de controlo consiste em medir, através de uns sensores laser, as deformações directamente na peça. Aqui procura-se medir a deformação em três pontos distintos e assim, em malha fechada, conseguir uma permanente compensação. Este processo embora mais complicado permite um constante ajuste das pressões de compensação.

Capítulo 4 – Resultados

Obtido o modelo final foram testados vários casos de carga simulando as várias possibilidades de quinagem. São aqui apresentados alguns desses casos.

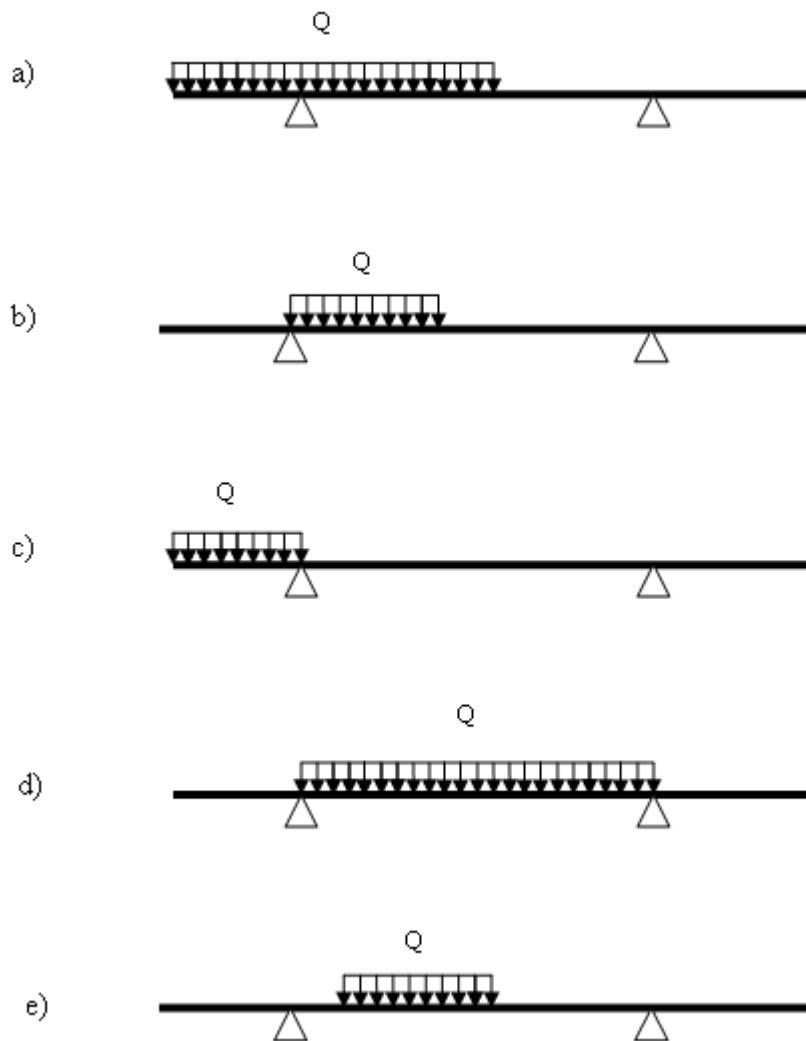


Figura 79-Casos de carga estudados: a) Caso 1; b) Caso 2; c) Caso 3; d) Caso 4; e) Caso 5

Caso de carga 1 – A peça é colocado do início até meio do avental.

Caso de carga 2 – A peça tem um metro de comprimento e é colocada no início do primeiro montante.

Caso de carga 3 – A peça é colocado do início do avental até ao primeiro montante.

Resultados

Caso de carga 4 – A peça é colocado entre os montantes.

Caso de carga 5 – A peça tem um metro de comprimento e é colocada a dois metros do início do avental.

Usando para todas estas simulações a força máxima permitida pela quinadora, os resultados obtidos pelo software COSMOS foram:

Caso 1:

Deformação dos dois aventais na zona da peça:

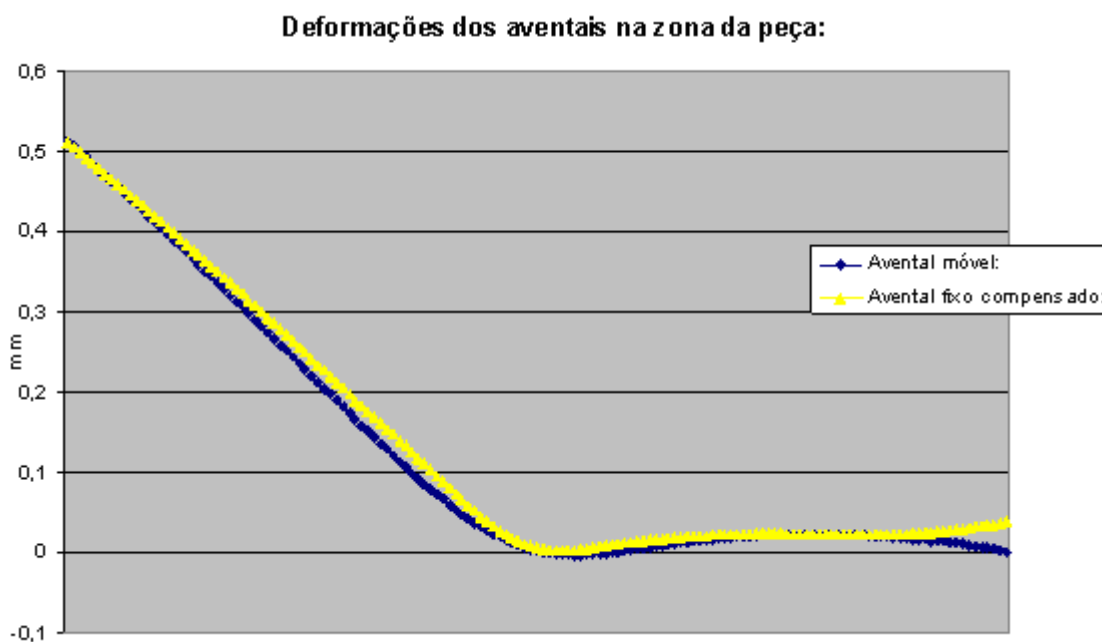


Figura 80-Deformação dos aventais para o caso 1

Esta compensação tem como valores de pressão nas almofadas hidráulicas:

Tabela 12 – Pressão nas almofadas hidráulicas do caso 1

	Almofada hidráulica 1	Almofada hidráulica 2	Almofada hidráulica 3	Almofada hidráulica 4	Almofada hidráulica 5
Pressão[MPa]:	23,4	30	6	0	0

Desvio de paralelismo entre os dois aventais na zona da peça:

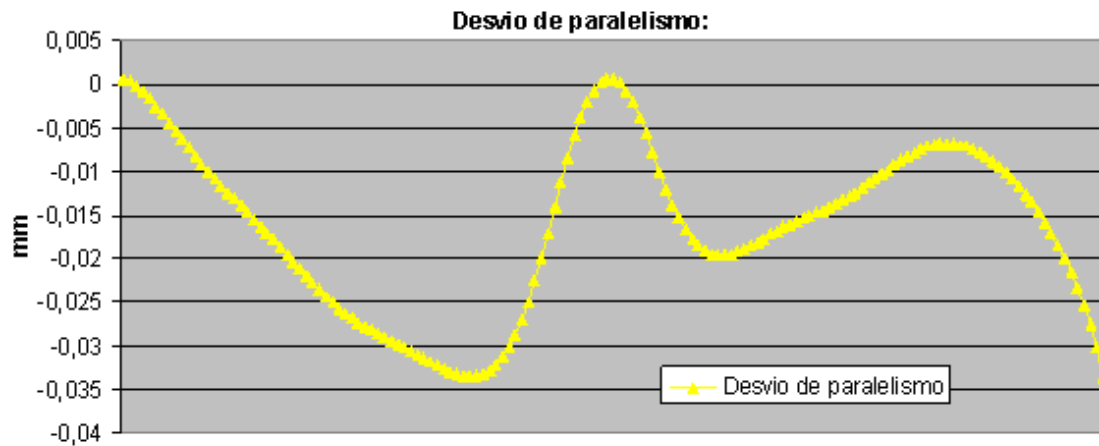


Figura 81-Desvios de paralelismo para o caso 1

Tabela 13 – Desvio de paralelismo do caso 1

	Valor máximo	Valor mínimo	Amplitude
Desvio de paralelismo [mm]:	0,001	0,033	0,034

Caso 2:

Deformação dos dois aventais na zona da peça:

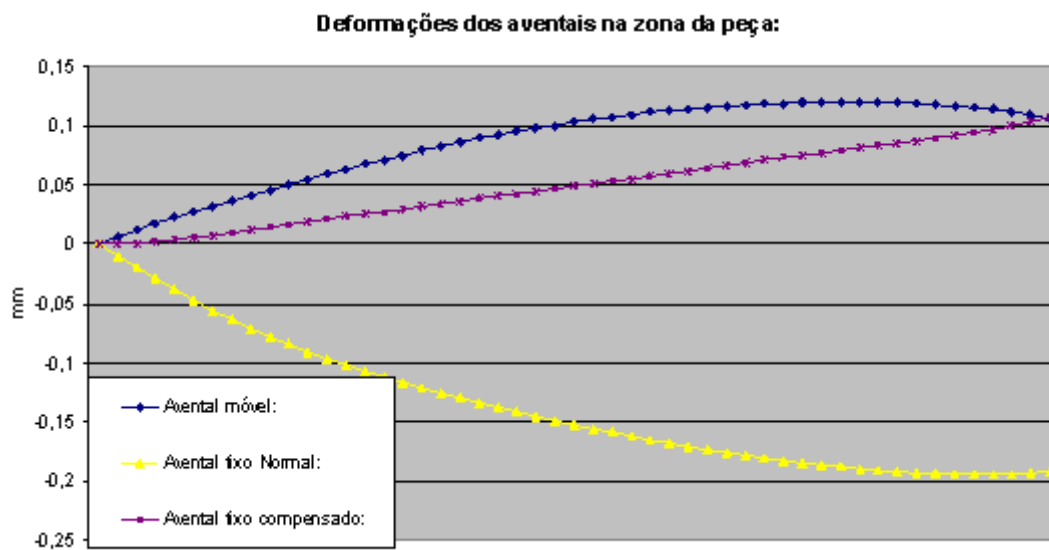


Figura 82- Deformação dos aventais para o caso 2

Esta compensação tem como valores de pressão nas almofadas hidráulicas:

Tabela 14 – Pressão nas almofadas hidráulicas do caso 2

	Almofada hidráulica 1	Almofada hidráulica 2	Almofada hidráulica 3	Almofada hidráulica 4	Almofada hidráulica 5
Pressão[MPa]:	0	30	5,1	0	0

Desvio de paralelismo entre os dois aventais na zona da peça:

Resultados

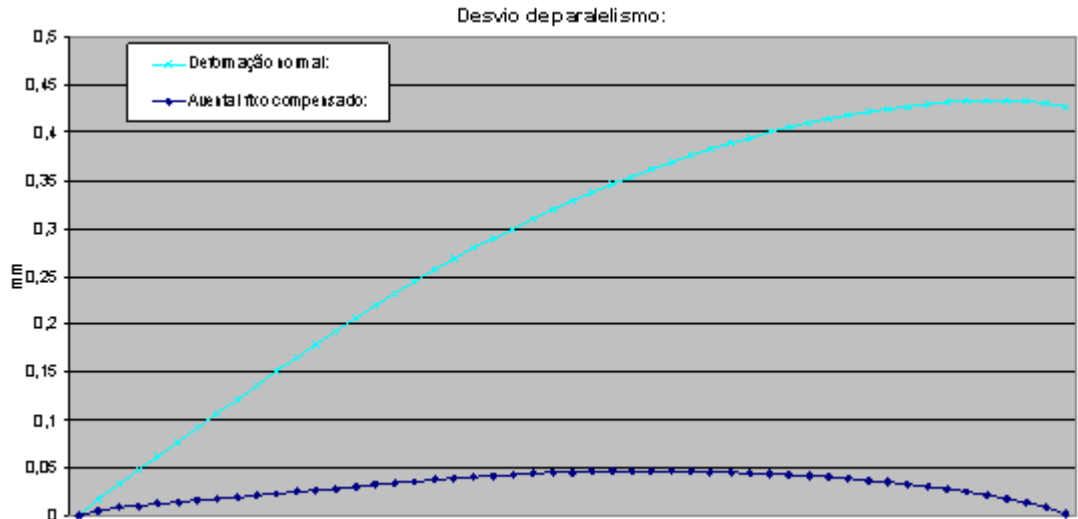


Figura 83- Desvios de paralelismo para o caso 2

Tabela 15 – Desvio de paralelismo do caso 2

	Valor máximo	Valor mínimo	Amplitude
Desvio de paralelismo [mm]:	0,048	0,000	0,048

Caso 3:

Deformação dos dois aventais na zona da peça:

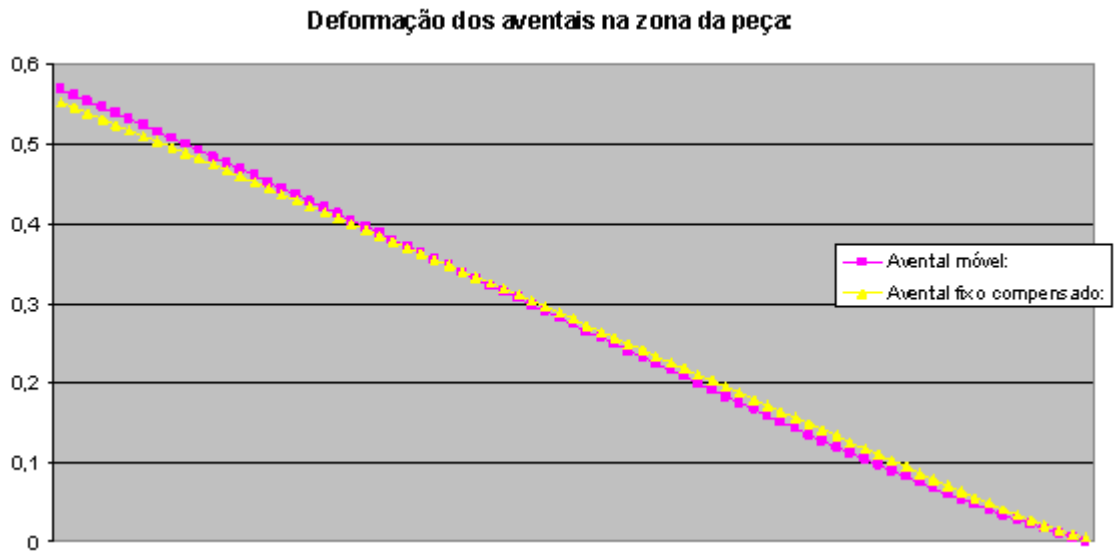


Figura 84- Deformação dos aventais para o caso 3

Esta compensação tem como valores de pressão nas almofadas hidráulicas:

Tabela 16 – Pressão nas almofadas hidráulicas do caso 3

	Almofada hidráulica 1	Almofada hidráulica 2	Almofada hidráulica 3	Almofada hidráulica 4	Almofada hidráulica 5
Pressão[MPa]:	16,5	0	0	0	16,5

Desvio de paralelismo entre os dois aventais na zona da peça:



Figura 85- Desvios de paralelismo para o caso 3

Tabela 17 – Desvio de paralelismo do caso 3

	Valor máximo	Valor mínimo	Amplitude
Desvio de paralelismo [mm]:	0,005	0,014	0,019

Caso 4:

Deformação dos dois aventais na zona da peça:

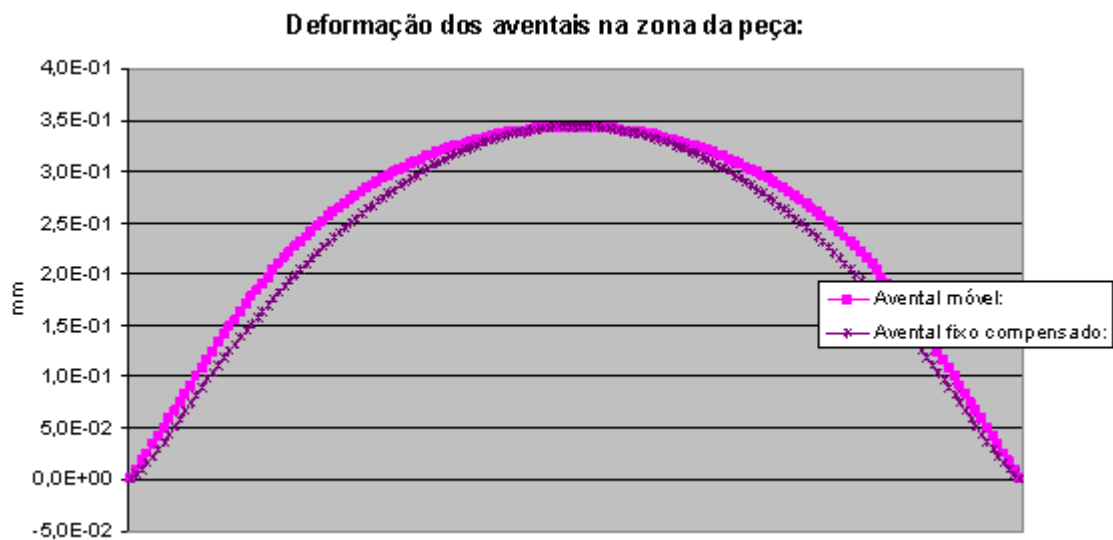


Figura 86- Deformação dos aventais para o caso 4

Esta compensação tem como valores de pressão nas almofadas hidráulicas:

Tabela 18 – Pressão nas almofadas hidráulicas do caso 4

	Almofada hidráulica 1	Almofada hidráulica 2	Almofada hidráulica 3	Almofada hidráulica 4	Almofada hidráulica 5
Pressão[MPa]:	0	30	27,8	30	0

Desvio de paralelismo entre os dois aventais na zona da peça:

Resultados

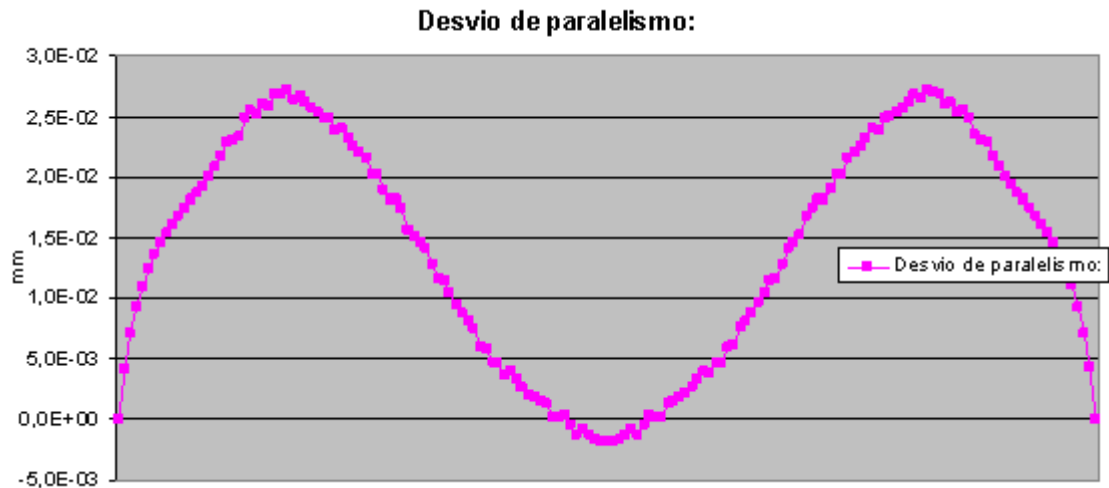


Figura 87-Desvios de paralelismo para o caso 4

Tabela 19 – Desvio de paralelismo do caso 4

	Valor máximo	Valor mínimo	Amplitude
Desvio de paralelismo [mm]:	0,027	0,002	0,029

Caso 5:

Deformação dos dois aventais na zona da peça:

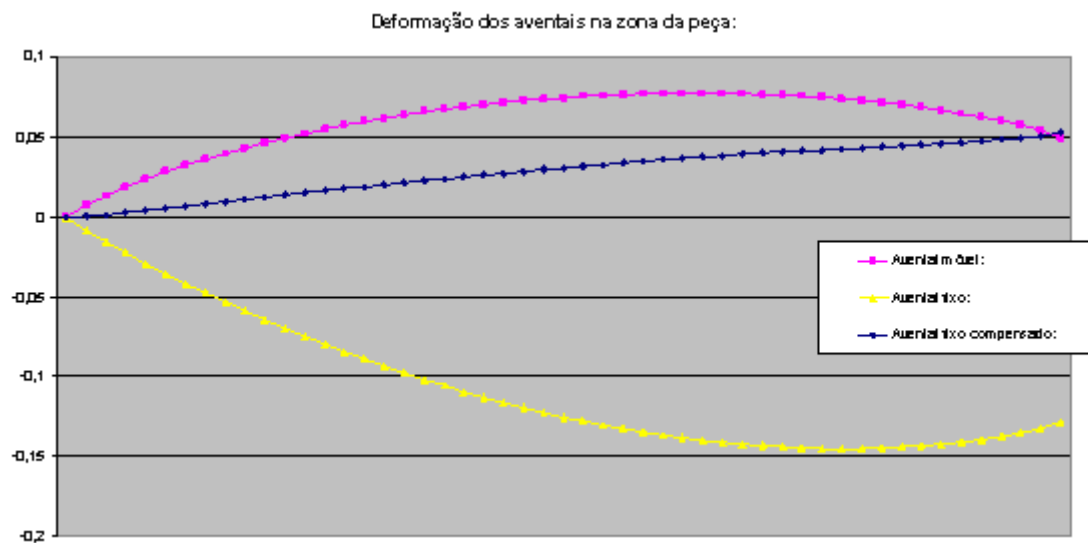


Figura 88- Deformação dos aventais para o caso 5

Esta compensação tem como valores de pressão nas almofadas hidráulicas:

Tabela 20 – Pressão nas almofadas hidráulicas do caso 5

	Almofada hidráulica 1	Almofada hidráulica 2	Almofada hidráulica 3	Almofada hidráulica 4	Almofada hidráulica 5
Pressão[MPa]:	0	30	30	7,5	30

Desvio de paralelismo entre os dois aventais na zona da peça:

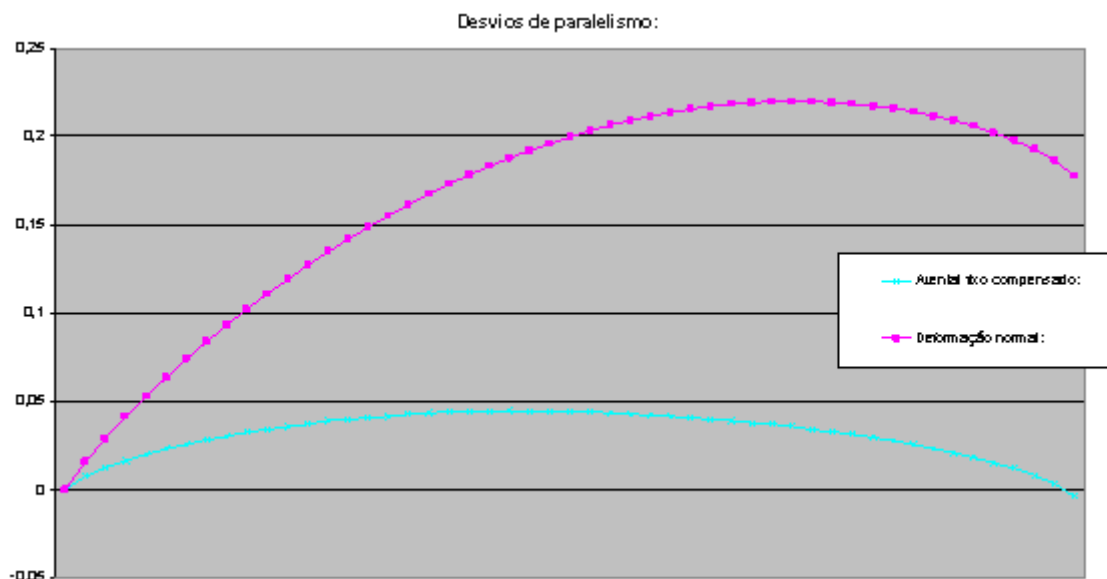


Figura 89-Desvios de paralelismo para o caso 5

Tabela 21 – Desvio de paralelismo do caso 5

	Valor máximo	Valor mínimo	Amplitude
Desvio de paralelismo [mm]:	0,044	0,004	0,048

Todo este sistema é susceptível de ser afinado e assim garantir precisões ainda mais altas, contudo foram aqui cumpridos os 0,05mm de erro no desvio de paralelismo comprovando que o sistema pelo método dos elementos finitos resulta.

Capítulo 5 – Conclusões e perspectivas para trabalhos futuros

Apesar do curto tempo para a realização deste projecto, foi possível desenvolver um sistema inovador que procurou conciliar a eficácia, simplicidade e baixo custo. Este sistema garante uma amplitude no erro do desvio de paralelismo entre os dois aventais de 0,05mm cumprindo assim os objectivos pretendidos; e demonstra que, com um pouco mais de complexidade poderiam ser obtidos resultados no desvio de paralelismo de 1 μ m ou até menos. Também o erro de rectitude existente na quinagem pode ser fortemente reduzido se o sistema for aplicado aos dois aventais. Embora estas últimas soluções sejam de alta precisão o aumento dos custos resultante não justifica a sua prática.

Toda a eficácia deste sistema está dependente do sistema de medida e controlo. Assim só é possível garantir grandes precisões de quinagem se os erros originados forem medidos com grande precisão.

Apesar do escasso tempo gasto neste sentido o trabalho realizado permitiu perceber que com o sistema bem afinado seria possível diminuir a espessura da placa interior de 100mm para 80mm.

Como perspectivas para trabalhos futuros, apontam-se:

- Desenvolver o sistema de medida do erro de quinagem.
- Melhorar estruturalmente este sistema, principalmente na zona dos apoios, diminuindo as tensões máximas.
- Afinar o sistema de forma a diminuir a espessura das suas placas.
- Desenvolver este sistema em malha fechada de forma a compensar o retorno elástico e melhorar a quinagem.
- Desenvolver este sistema para outros tamanhos de quinadoras.

Conclusões

Bibliografia

Artur Costa, 2008, “Desenvolvimento e validação de um sistema inovador de compensação de deformação numa quinadora”, FEUP.

Carlos M. Silva, Francisco Freitas, J. G. Mendes, 2005, “Tecnologia de Accionamentos Industriais”, DEMEGI- FEUP.

Carlos R. Gomes, 2005, “Mecânica das estruturas”, DEMEGI – FEUP.

Charles Massonnet, 1962, “Résistance des Matériaux”.

J. A. Bessa Pacheco, 1992, “Utilização de Quinadoras e Guilhotinas”, APTCP, Porto.

J. M. Burch, C. Forno, 1982, “High Resolution Moire Photography”.

Luís Faria e Raul Hess, 1996, “Obtenção de ângulo de quinagem constantes em quinadoras”, LEMAC-CDC.

Mannesmann Rexroth, ”Hydraulic valves for stationary applications”.

Raymond J. Roark e Warren C. Young, 1975, “Formulas for Stress and Strain”, McGraw-Hill.

RIFINDUS, 1974, “Un Attrezzo Nuovo per Lavorare Correttamente com la Pressa Piegatrice”, Estrato da revista Italiana “Lamiera”, No. 98.

TRUMPF A, 2006, “Technical information: Bending technology”, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG.

TRUMPF B, 2006, “Tool catalogue”, TRUMPF Maschinem Austria GesmbH & CO. KG.

Willa, 2005, “Press Brake Productivity Guide”, Willa.

Bibliografia

Sites da Internet consultados:

- <http://www.adira.pt/>
- <http://www.amada.com>
- <http://www.bystronic.com>
- <http://www.epo.org/>
- <http://www.google.com/patents>
- <http://www.inpi.pt/irj/portal/anonymous>
- <http://www.matweb.com>
- <http://www.ramada.pt>
- <http://www.thyssen.co.uk>
- <http://www.trumpf.com>

Patentes:

“Press brake with active lower table”; inventor Claude Gascoin; patente pertencente à empresa Amada Europe; 2000; nº US 6,401,512 B1.

“Compensation device for a press brake”; inventor Bruno J. Pelech; 2000; nº US 6,164,114.

“Apparatus and method for overcoming angular deviations in a workpiece”; inventor John Christian Tolkamp; 2004; nº US 6,725,702 B2.

“Deflection compensating assembly for a press brake”; inventor Raymond J. Graf; patente pertencente à Cincinnati Incorporated; 1986; nº US 4,580,434.

“Deflection compensating press brake”; inventor Donald Swenson; patente pertencente à Niagara Machines & Tool Works; 1972; nº US 3,702,558.

“Apparatus for bending sheet material”; inventor autor Cornelis H. Liet; 1987; nº US 4,672,835.

“Device for handling the upper moving table carrying the punch in a bending press”; inventor Antonio Manini; a patente pertence à Schiavi Macchine Industriali S.p.A.; 2007; nº US 7,162,908 B2.

“Method of making lambda beams”; inventor Joseph R. Driear; a patente pertence a Kelley Company Inc.; 1984; n° US 4,468,946.

“Deflection compensating assembly for fabricating machine tools”; inventores Francois Gabella, Raymond J. Graf e Carl W. Koors; a patente pertence à Cincinnati Incorporated; 1986; n° US 4,620,435.

“Variable pressure fluid actuated brake beam compensation”; inventor Walter Ernst; 1958; n° US 2,848,034.

“Press brake deflection compensation device”; inventor David L. Houston; 1990; n° US 4,898,015.

“Deflection compensating means for press brakes and the like”; inventores Eugene W. Pearson e Arthur L. Pedersen; patente pertence a Canron Corporation; 1984; n° US 4,426,873.

“Hydraulically operated press brake”; inventor Waldemar Krumholz; patente pertence à M+S Brugg AG; 1994; n° US 5,293,972.

Bibliografia

Anexo A: Desvios de rectitude**Comparação dos vários modelos de aventais considerados**

1-Avental normal (com dois apoios)

2-Avental com três apoios

3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica

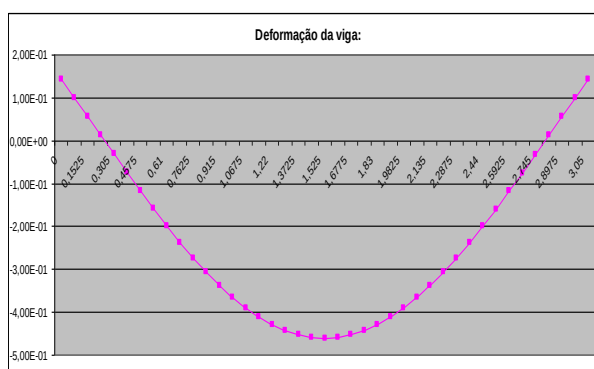
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas

5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas

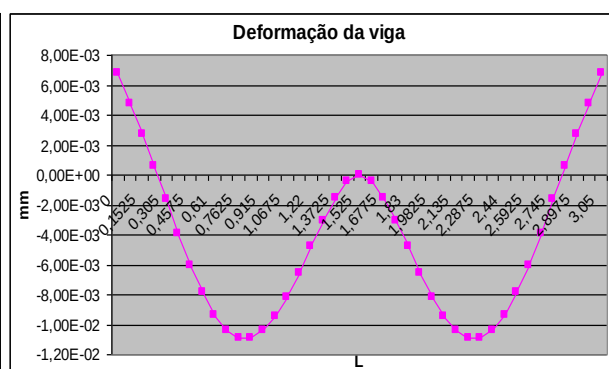
Dados do avental: altura de 0,7 metros e espessura de 0,1 metros.

Caso 1-Avental com 3,05 metros de comprimento ao longo do qual é exercido uma força de 1600kN.

	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas
Desvio máx. de rectitude (mm)	0,4603	0,0109	3,6E-15	4,8E-15	4,8E-15
Amplitude do desvio de rectitude (mm)	0,8013	0,0792	4,9E-15	8,9E-15	8,9E-15
Posição dos apoios (m)	R1=0,25 R2=2,8	R1=0,25 R2=1,525 R3=2,8	R1=0,25 R2=2,8 (sem ajuste de apoios)	R1=0,25 R2=2,8 (sem ajuste de apoios)	R1=0,25 R2=2,8 (sem ajuste de apoios)



a)

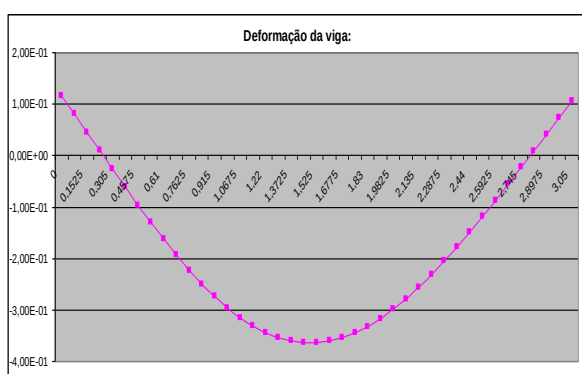


b)

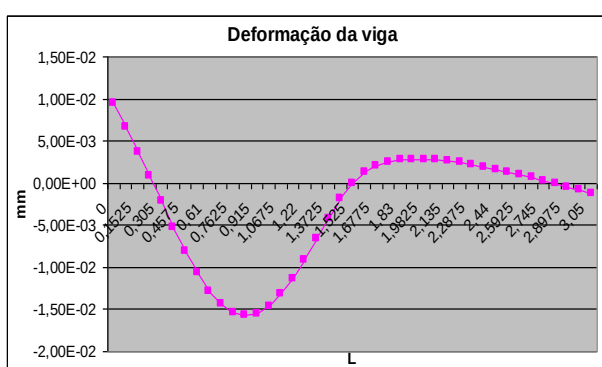
Figura 90-a) Deformação do avental normal; b) Deformação do avental com três apoios

Caso 2-Avental com 3,05m de comprimento com uma força de 1600kN descentrada compreendida entre $x = 0$ e $x = 2$ metros

	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
				Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça
Desvio máx. de rectitude (mm)	0,5549	0,02402	0,01576	0,00955	0,01903	0,00769	0,01903
Amplitude do desvio de rectitude (mm)	0,7159	0,03842	0,02806	0,01066	0,02522	0,01227	0,02522
Desvio máx. e amplitude na peça	0,5549 0,7159	0,02402 0,03842	0,01300 0,02530	0,00428 0,00595	0,00080 0,00091	0,00458 0,00801	0,00080 0,00091
Posição dos apoios (m)	R1=0,25 R2=2,8	R1=0,25 R2=1,525 R3=2,8	R1=0,25 R2=2,8	R1=0,25 R2=2,8		R1=0,25 R2=2,8	
Pressão nas almofadas(N/m)			Q1=632312	Q1=551355 Q2=760415 Q3=61833949		Q1=551355 Q2=760415 Q3=61833949	

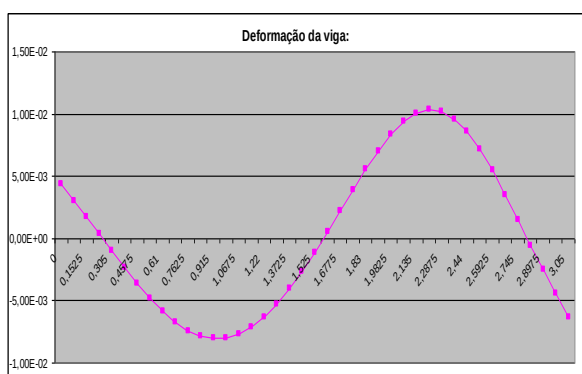


a)

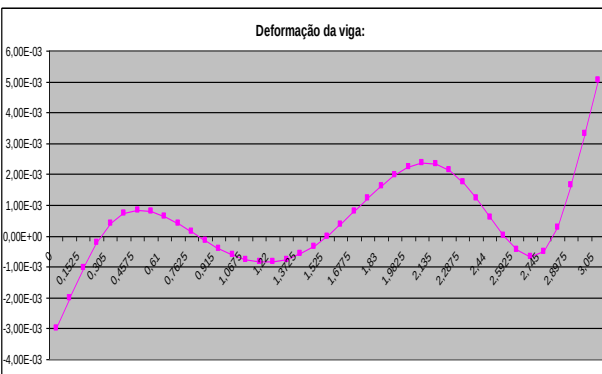


b)

Figura 91-a) Deformação do avental normal; b) Deformação do avental com três apoios



a)



b)

Figura 92-a) Deformação do avental com dois apoios e uma almofada hidráulica; b) Deformação do avental com dois apoios e três almofadas (sem ajuste à peça)

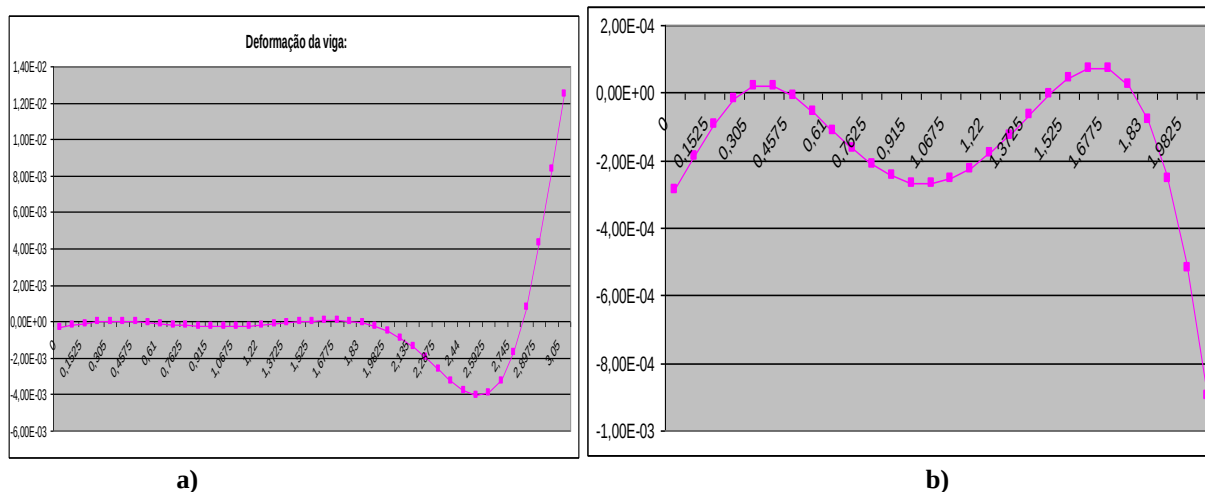
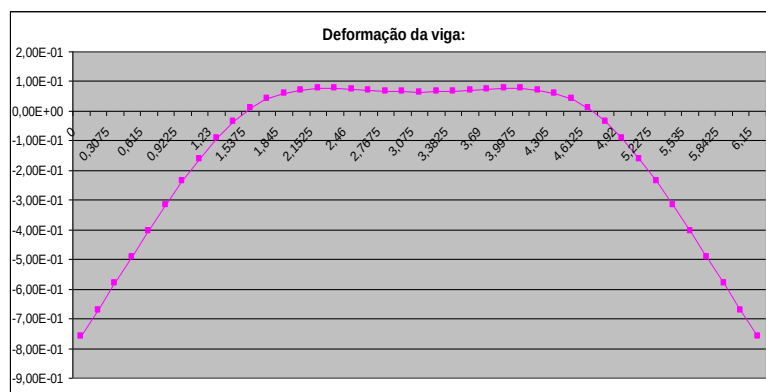


Figura 93-a) Deformação do avental com dois apoios e três almofadas; b) Deformação da peça descentrada (com ajuste à peça)

Caso 3-Avental com 6,15m de comprimento ao longo do qual é exercido uma força de 2100kN.

	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	5-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas
Desvio máx. de rectitude (mm)	0,7607	0,6685	3,11E-15	1,44E-15	1,44E-15
Amplitude do desvio de rectitude (mm)	0,8359	0,7075	4,2E-15	1,62E-15	1,62E-15
Posição dos apoios (m)	R1=1,5 R2=4,65	R1=1,5 R2=3,075 R3=4,65	R1=1,5 R2=4,65	R1=1,5 R2=4,5	R1=1,5 R2=4,5
Pressão nas almofadas(N/m)			Q1=341463	Q1=Q2=Q3=341463	Q1=Q2=Q3=341463



a)

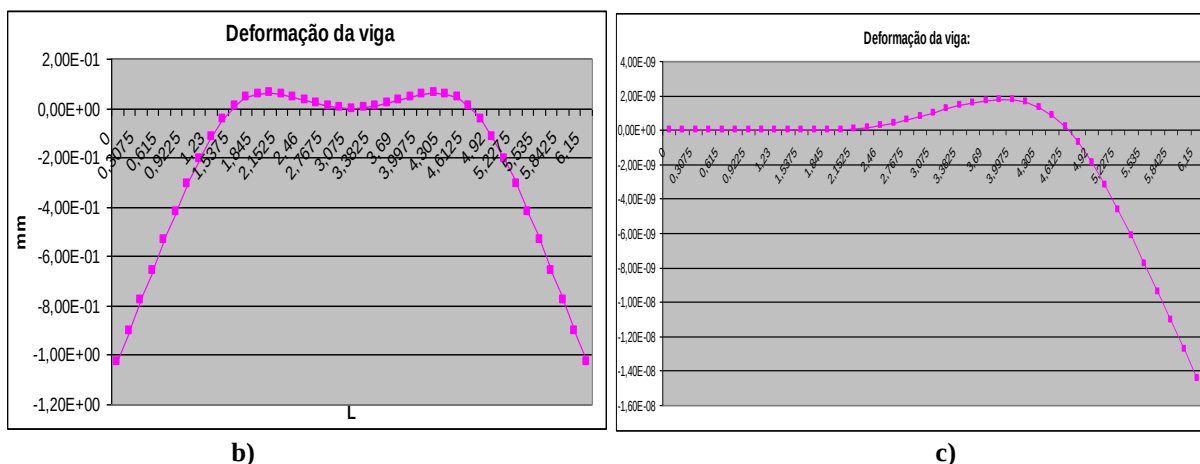
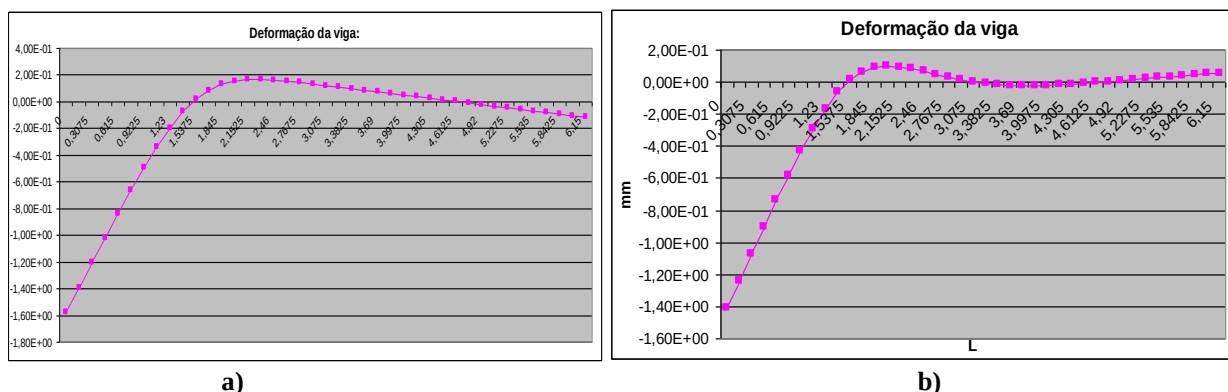
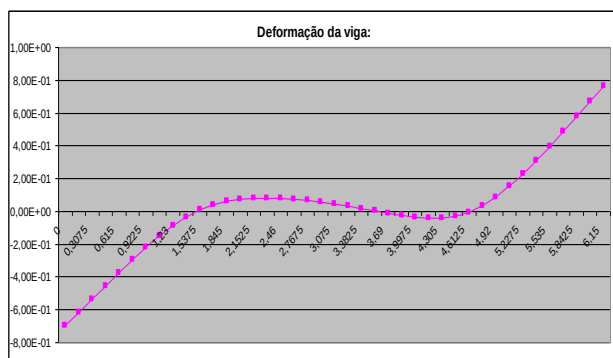


Figura 94-a) Deformação do avental normal; b) Deformação do avental com três apoios; c) Deformação do avental com três ou seis almofadas

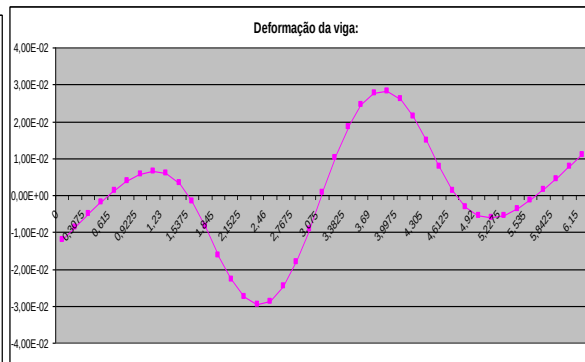
Caso 4-Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 0, x = 3$ metros.

	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
				Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça
Desvio máx. de rectitude (mm)	1,605	1,429	0,7788	0,0296	0,9846	0,0296	0,9846
Amplitude do desvio de rectitude (mm)	1,777	1,531	1,4878	0,0579	1,0739	0,0579	1,0739
Desvio máx. e amplitude na peça	1,605 1,777	1,429 1,531	0,7090 0,7903	0,0296 0,0362	0,00110 0,00212	0,0296 0,0362	0,00110 0,00212
Posição dos apoios (m)	R1=1,5 R2=4,65	R1=1,5 R2=3,075 R3=4,65	R1=1,5 R2=4,65				
Pressão nas almofadas(N/m)			Q1=402198	Q1=696800 Q2=590590 Q3=498062			

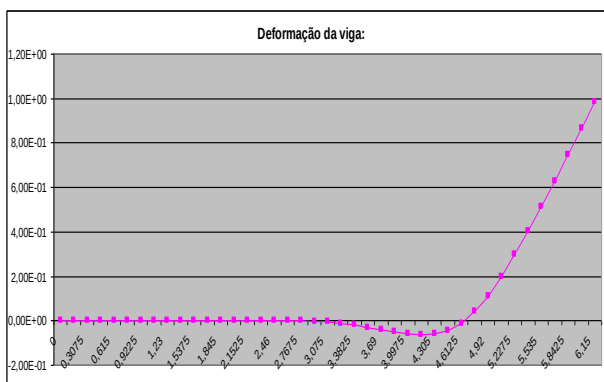




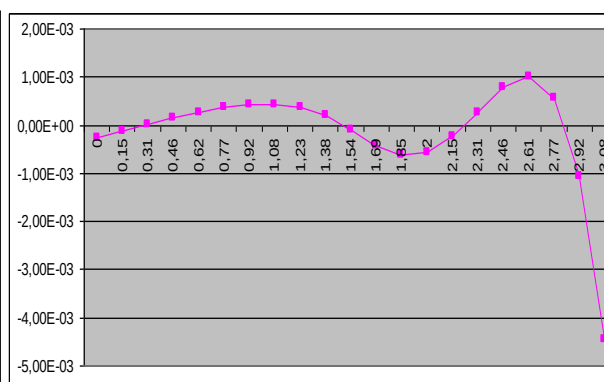
c)



d)



e)



f)

Figura 95-a) Deformação do avental norma; b) Deformação do avental com três apoios; c) Deformação do avental com dois apoios e uma almofada hidráulica; d) Deformação do avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas (sem ajuste à peça); e) Deformação do avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas (com ajuste à peça); f) Deformação da peça para um avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas

Caso 5-Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 1,5$ $x = 2,5$ metros.

	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
				Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça
Desvio máx. de rectitude (mm)	1,95	0,5043	1,95	0,1541	3,797	0,0688	3,024
Amplitude do desvio de rectitude (mm)	2,98	0,6413	2,98	0,1770	4,123	0,1200	3,272
Desvio máx. e amplitude na peça	0,95 1,05	0,145 0,145	0,95 1,05	0,040 0,063	0,004 0,004	0,0684 0,0684	0,0015 0,0020
Posição dos apoios (m)	R1=1,5 R2=4,65	R1=1,5 R2=3,075 R3=4,65	R1=1,5 R2=4,65				
Pressão nas almofadas(N/m)			Q1=0	Q1=696800 Q2=590590 Q3=498062		Q1=-178119 Q2=433049 Q3=95297	

Anexo B: Desvios de rectitude

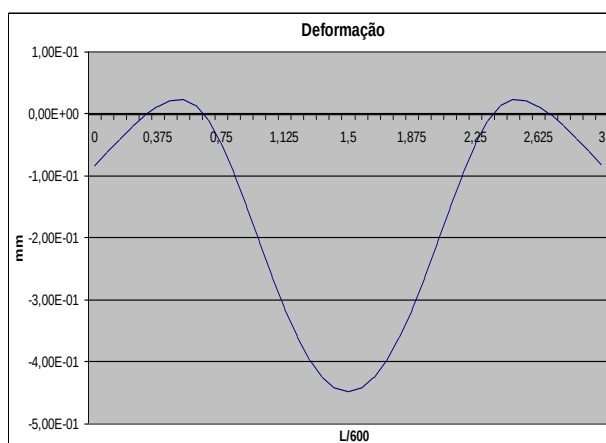
Comparativo dos vários modelos de aventais considerados

- 1-Avental normal (com dois apoios)
- 2-Avental com três apoios
- 3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica
- 4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas

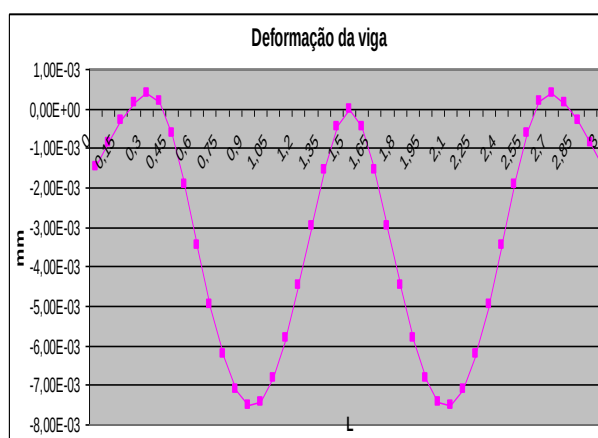
Dados do avental: altura de 0,7 metros e espessura de 0,1 metros.

Caso 1-Avental com 3 metros de comprimento ao longo do qual é exercido uma força de 100 toneladas por metro.

	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas
Desvio máx. de rectitude (mm)	0,0529	0,007514	3,8E-16	3,7E-16
Amplitude do desvio de rectitude (mm)	0,0557	0,007898	5,9E-16	4,6E-16
Posição dos apoios (m)	R1=0,65 R2=2,35	R1=0,4 R2=1,5 R3=2,6	R1=0,5 R2=2,5 (sem ajuste de apoios)	R1=0,5 R2=2,5 (sem ajuste de apoios)



a)

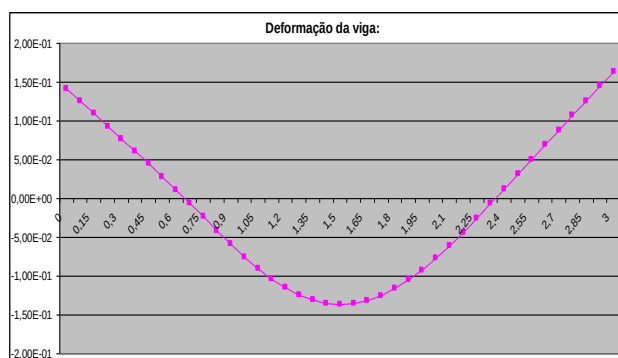


b)

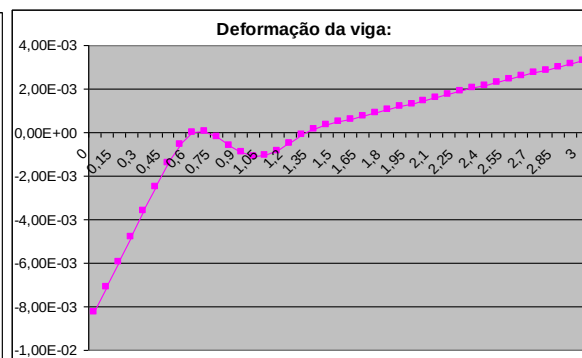
Figura 96-a) Deformação do avental normal; b) Deformação do avental com três apoios

Caso 2-Avental com 3 metros de comprimento com uma força de 100 toneladas por metro descentrada compreendida entre $x = 0,25$ e $x = 2$ metros.

	1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		
	Sem ajuste dos apoios	Com ajuste dos apoios	Sem ajuste dos apoios	Com ajuste dos apoios		Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	
							Def. no avental	Def. na peça
Desvio máx. de rectitude (mm)	0,1635	0,00826	0,0198	0,0049	0,02622	0,00294	0,0199	1,9E-4
Amplitude do desvio de rectitude (mm)	0,2995	0,01155	0,0360	0,0068	0,02786	0,00431	0,0213	2,8E-4
Posição dos apoios (m)	R1=0,65 R2=2,35	R1=0,6 R2=1,3	R1=0,4 R2=1,5 R3=2,6	R1=0,6 R2=1,5 R3=2,3	R1=0,5 R2=2,5	R1=0,5 R2=2,5	R1=0,5 R2=2,5	

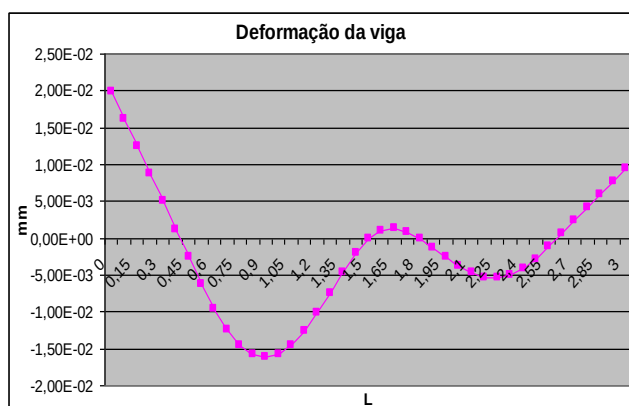


a)

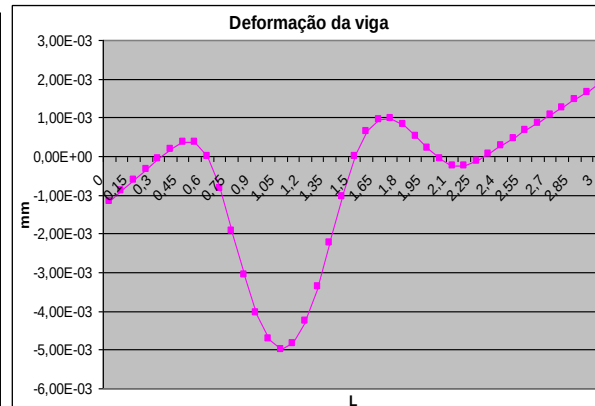


b)

Figura 97- a) Deformação do avental normal (sem ajuste dos apoios); b) Deformação do avental normal (com ajuste dos apoios)

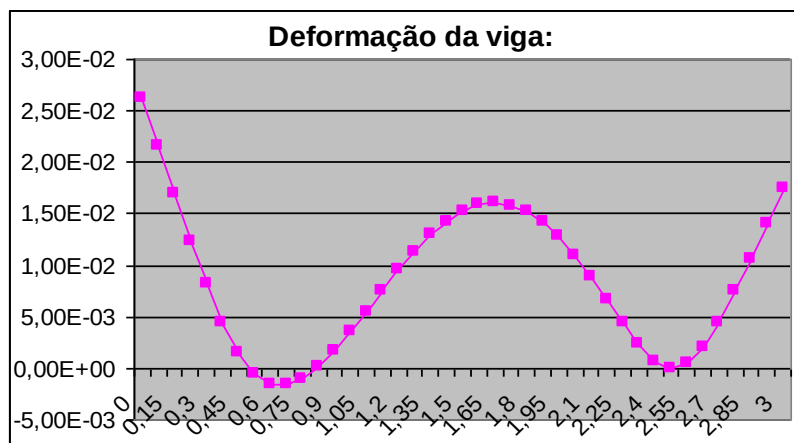


a)

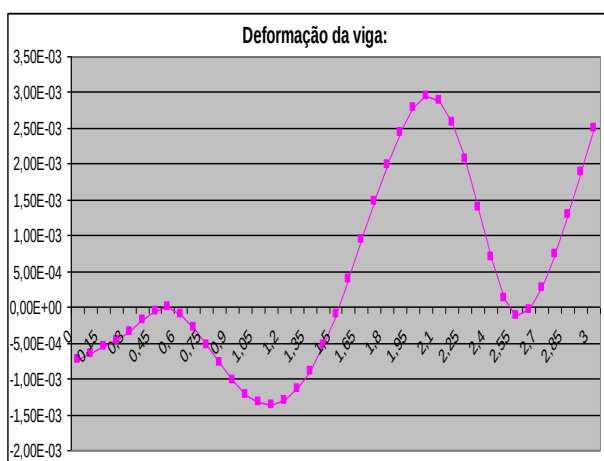


b)

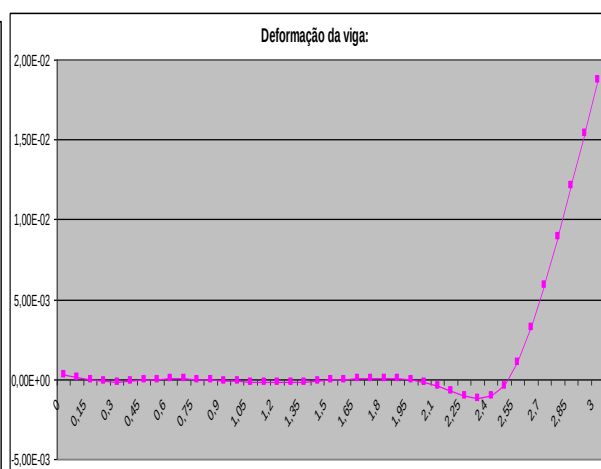
Figura 98- a) Deformação do avental com três apoios(sem ajuste dos apoios); b) Deformação do avental com três apoios(com ajuste dos apoios)



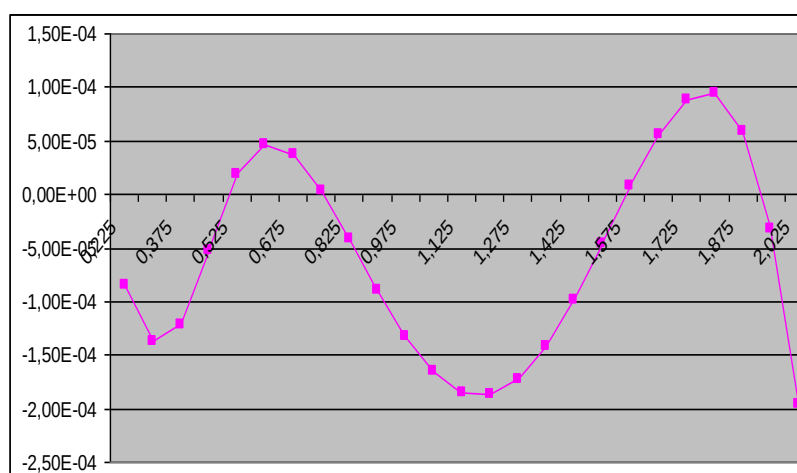
a)



b)



c)

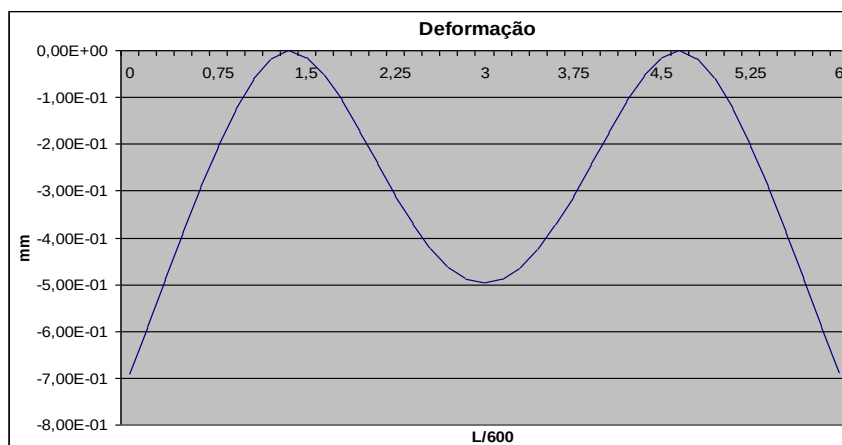


d)

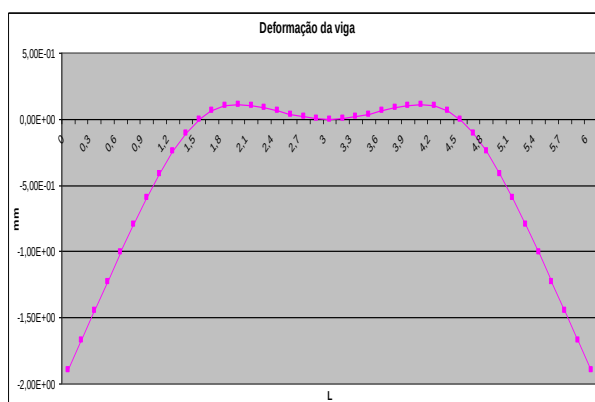
Figura 99- a) Deformação do avental com dois apoios e uma almofada hidráulica; b) Deformação do avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas (sem ajuste à peça); c) Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas (com ajuste à peça); d) Deformação da peça descentrada

Caso 3-Avental com 6 metros de comprimento ao longo do qual é exercido uma força de 100 toneladas por metro.

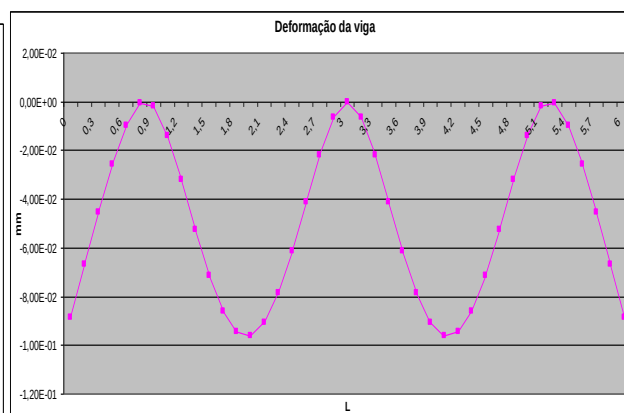
	1-Avental normal	2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas
		Sem ajuste dos apoios	Com ajuste dos apoios		
Desvio máx. de rectitude (mm)	0,6915	1,894	0,09627	3,8E-15	5,54E-15
Amplitude do desvio de rectitude (mm)	0,6915	2,005	0,09627	6,1E-16	5,54E-15
Posição dos apoios (m)	R1=1,35 R2=4,65	R1=1,5 R2=3 R3=4,5	R1=0,85 R2=3 R3=5,15	R1=1,5 R2=4,5 (sem ajuste de apoios)	R1=1,5 R2=4,5 (sem ajuste de apoios)



a)



b)

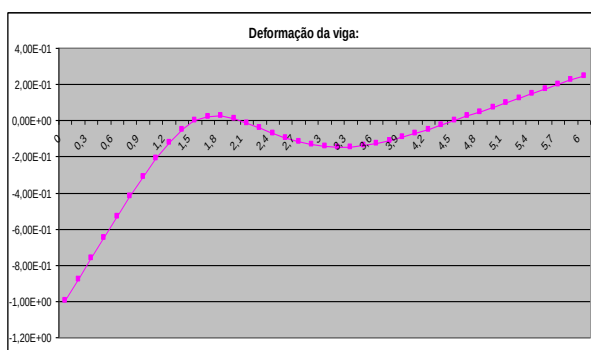


c)

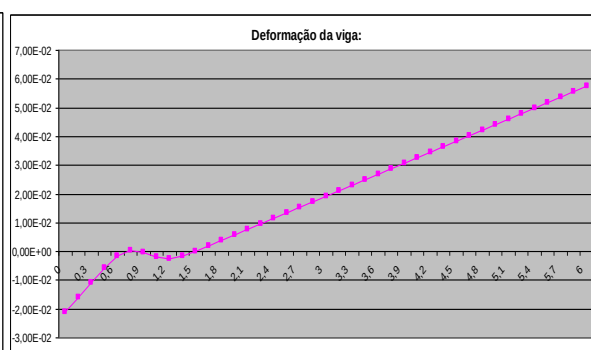
Figura 100- a) Deformação do avental normal; b) Deformação do avental com três apoios (sem ajuste dos apoios); c) Deformação do avental com três apoios (com ajuste dos apoios)

Caso 4-Avental com 6 metros de comprimento com uma força de 100 toneladas por metro descentrada compreendida entre $x = 0,25$ e $x = 3$ metros.

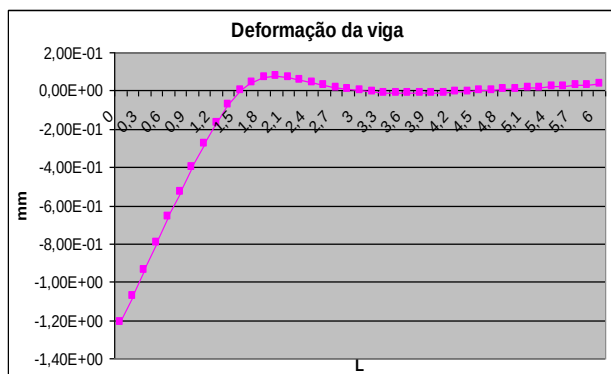
	1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		
	Sem ajuste dos apoios	Com ajuste dos apoios	Sem ajuste dos apoios	Com ajuste dos apoios		Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	
							Def. no avental	Def. na peça
Desvio máx. de rectitude (mm)	1,0	0,05755	1,210	0,02567	0,6256	0,03302	0,7941	0,005
Amplitude do desvio de rectitude (mm)	1,249	0,07855	1,284	0,04477	1,2512	0,06152	0,831	0,014
Posição dos apoios (m)	R1=1,5 R2=4,5	R1=0,7 R2=1,5	R1=1,5 R2=3 R3=4,5	R1=0,25 R2=1,5 R3=2,65	R1=1,5 R2=4,5	R1=1,5 R2=4,5	R1=1,5 R2=4,5	



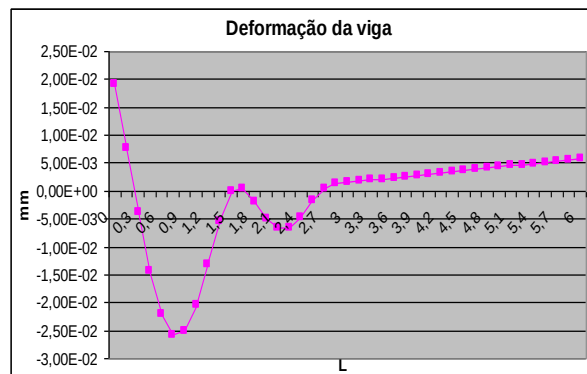
a)



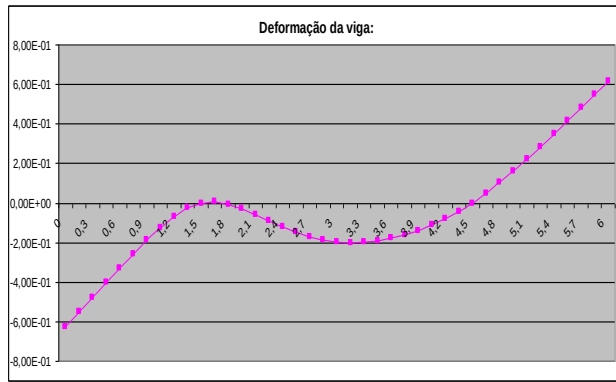
b)



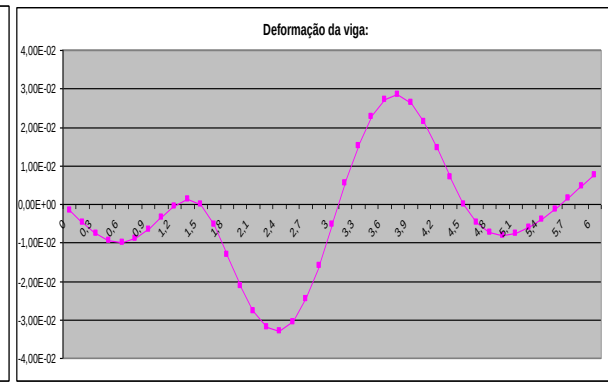
c)



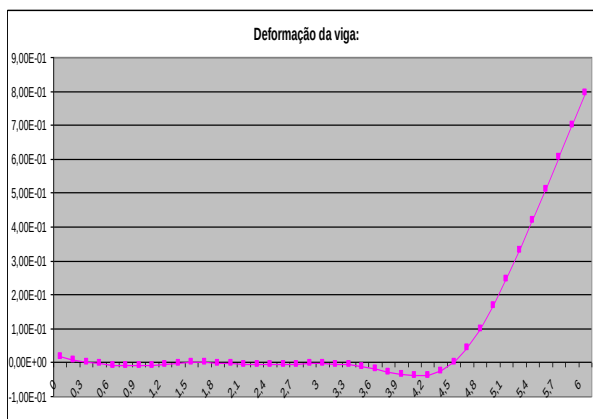
d)



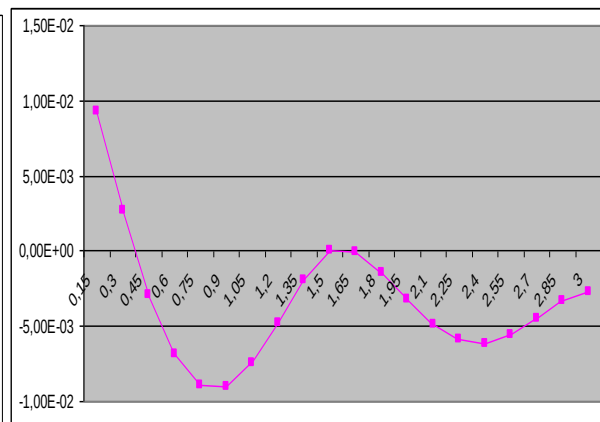
e)



f)



g)



h)

Figura 101- a) Deformação do avental normal sem ajuste dos apoios; b) Deformação do avental normal com ajuste dos apoios; c) Deformação do avental com três apoios (sem ajuste dos apoios); d) Deformação do avental com três apoios (com ajuste dos apoios); e) Deformação do avental com dois apoios e uma almofada hidráulica; f) Deformação do avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas (sem ajuste à peça); g) Deformação do avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas (com ajuste à peça); h) Deformação da peça para um avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas

Anexo C: Desvios de rectitude**(Dados do avental: altura de 0,7 metros e espessura de 0,1 metros.)****Caso 1-**Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 0$, $x = 3$ metros.

1	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
				Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça
Desvio máx. no avental (mm)	1,605	1,429	0,7788	0,0296	0,9846	0,0296	0,9846
Amplitude do desvio no avental (mm)	1,777	1,531	1,4878	0,0579	1,0739	0,0579	1,0739
Desvio máx. e amplitude na peça	1,605 1,777	1,429 1,531	0,7090 0,7903	0,0296 0,0362	0,00110 0,00212	0,0296 0,0362	0,00110 0,00212
Posição dos apoios (m)	R1=1,5 R2=4,65	R1=1,5 R2=3,075 R3=4,65	R1=1,5 R2=4,65				
Pressão nas almofadas(N/m)			Q1=402198	Q1=696800 Q2=590590 Q3=498062			

Caso 2-Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 1,5$, $x = 2,5$ metros.

2	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
				Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça
Desvio máx. no avental (mm)	1,95	0,5043	1,95	0,1541	3,797	0,0688	3,024
Amplitude do desvio no avental (mm)	2,98	0,6413	2,98	0,1770	4,123	0,1200	3,272
Desvio máx. e amplitude na peça	0,95 1,05	0,145 0,145	0,95 1,05	0,040 0,063	0,004 0,004	0,0684 0,0684	0,0015 0,0020
Posição dos apoios (m)	R1=1,5 R2=4,65	R1=1,5 R2=3,075 R3=4,65	R1=1,5 R2=4,65				
Pressão nas almofadas(N/m)			Q1=0	Q1=696800 Q2=590590 Q3=498062		Q1=-178119 Q2=433049 Q3=95297	

Caso 3- Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 0$, $x = 1,5$ metros.

3	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
				Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça
Desvio máx. no avental (mm)	5,609	3,284	2,707	2,3E-14	2,3E-14	2,3E-14	2,3E-14
Amplitude do desvio no avental (mm)	7,279	3,608	3,543	2,3E-14	2,3E-14	2,3E-14	2,3E-14
Desvio máx. e amplitude na peça	5,609	3,284	0,836	1,9E-14	1,9E-14	1,9E-14	1,9E-14
	5,609	3,284	0,836	1,9E-14	1,9E-14	1,9E-14	1,9E-14
Posição dos apoios (m)	R1=1,5 R2=4,65	R1=1,5 R2=3,075 R3=4,65	R1=1,5 R2=4,65				
Pressão nas almofadas(N/m)			Q1=2142672	Q1=1400000 Q2=0 Q3=0		Q1=1400000 Q2=0 Q3=0	

Caso 4- Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 1,5$, $x = 4,65$ metros

4	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
				Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça
Desvio máx. no avental (mm)	2,170	0,1356	2,170	2,5E-14	2,5E-14	2,5E-14	2,5E-14
Amplitude do desvio no avental (mm)	3,590	0,1726	3,590	4,1E-14	4,1E-14	4,1E-14	4,1E-14
Desvio máx. e amplitude na peça	1,420	0,1726	1,420	6,0E-15	6,0E-15	6,0E-15	6,0E-15
	1,420	0,1726	1,420	6,0E-15	6,0E-15	6,0E-15	6,0E-15
Posição dos apoios (m)	R1=1,5 R2=4,65	R1=1,5 R2=3,075 R3=4,65	R1=1,5 R2=4,65				
Pressão nas almofadas(N/m)			Q1=0	Q1=0 Q2=666667 Q3=0		Q1=0 Q2=666667 Q3=0	

Caso 7-Avental com 3,05m_de comprimento com uma força de 1600kN descentrada compreendida entre $x = 0$ e $x = 0,25$ metros.

7	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
				Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça
Desvio máx. no avental (mm)	0,1389	0,03618	0,1389	2,13E-11	8,18E-11	2,13E-11	8,18E-11
Amplitude do desvio no avental (mm)	0,2149	0,06328	0,2149	2,75E-11	8,5E-11	2,75E-11	8,5E-11
Desvio máx. e amplitude na peça	0,0760 0,0800	0,03618 0,03750	0,0760 0,0800	2,13E-11 2,20E-11	9,25E-13 1,5E-12	2,13E-11 2,20E-11	9,25E-13 1,5E-12
Posição dos apoios (m)	R1=0,25 R2=2,8	R1=0,25 R2=1,525 R3=2,8	R1=0,25 R2=2,8	R1=0,25 R2=2,8		R1=0,25 R2=2,8	
Pressão nas almofadas(N/m)			Q1=0	Q1=6400000 Q2=0 Q3=0		Q1=6400000 Q2=0 Q3=0	

Caso 8-Avental com 3,05m_de comprimento com uma força de 1600kN descentrada compreendida entre $x = 0,25$ e $x = 2,8$ metros.

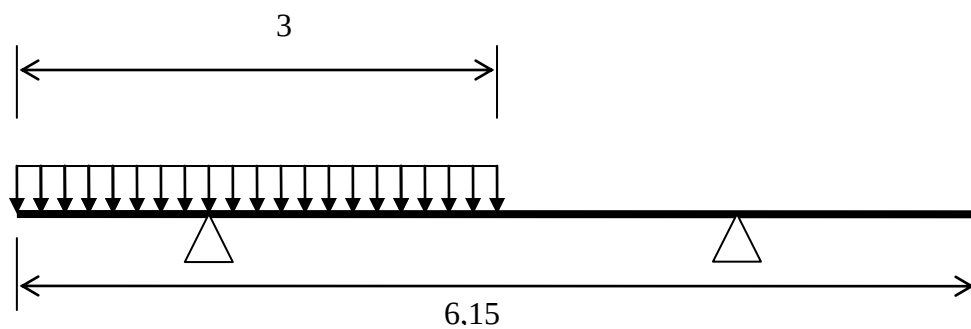
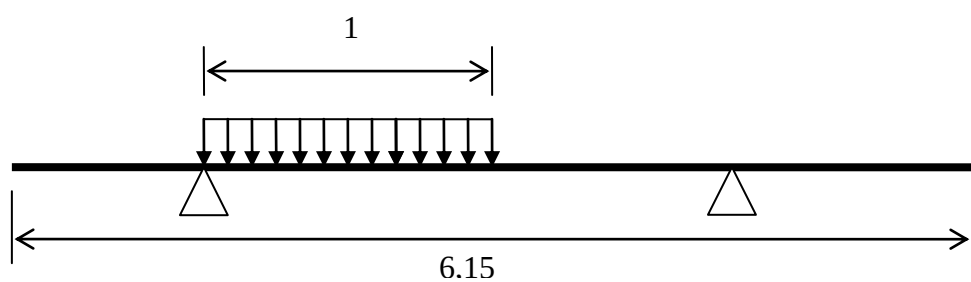
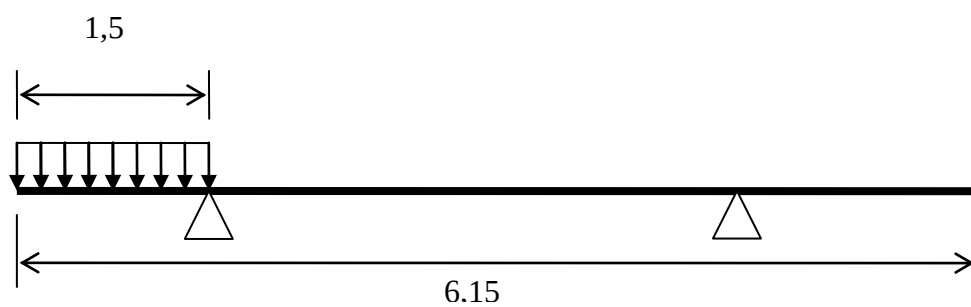
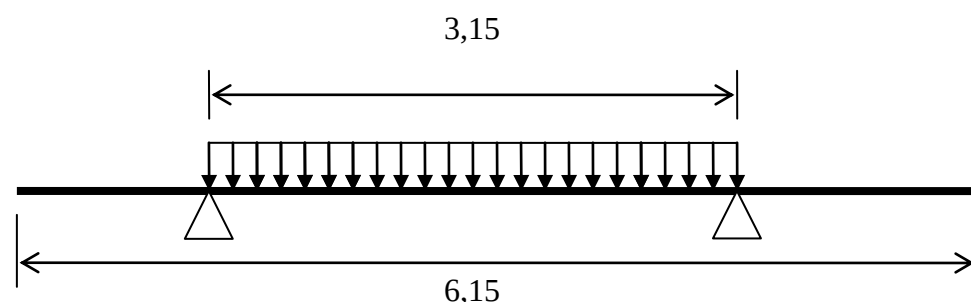
8	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
				Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça
Desvio máx. no avental (mm)	0,5755	0,01492	0,002324	4,44E-12	2,57E-12	4,44E-12	2,57E-12
Amplitude do desvio no avental (mm)	0,7565	0,02622	0,003214	7,53E-12	4,1E-12	7,53E-12	4,1E-12
Desvio máx. e amplitude na peça	0,5755 0,5755	0,01492 0,01492	0,00128 0,00217	2,32E-12 3,20E-12	1,60E-12 1,62E-12	2,32E-12 3,20E-12	1,60E-12 1,62E-12
Posição dos apoios (m)	R1=0,25 R2=2,8	R1=0,25 R2=1,525 R3=2,8	R1=0,25 R2=2,8	R1=0,25 R2=2,8		R1=0,25 R2=2,8	
Pressão nas almofadas(N/m)			Q1=659257	Q1=0 Q2=627451 Q3=0		Q1=0 Q2=627451 Q3=0	

Caso 5-Avental com 3,05m de comprimento com uma força de 1600kN descentrada compreendida entre $x = 0$ e $x = 2$ metros.

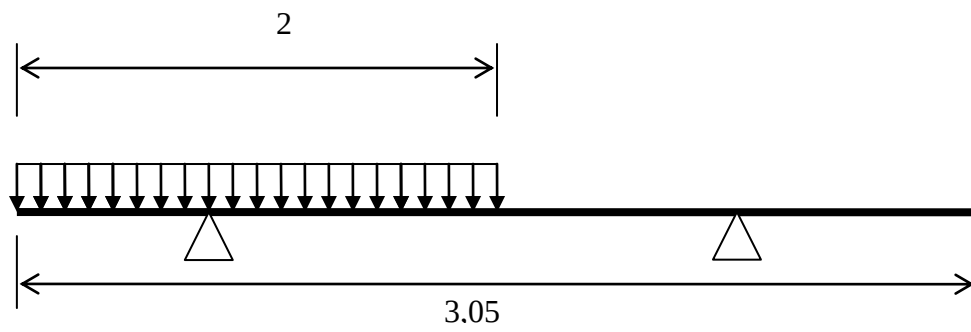
5	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
				Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça
Desvio máx. no avental (mm)	0,5549	0,02402	0,01576	0,00955	0,01903	0,007696	0,01903
Amplitude do desvio no avental (mm)	0,7159	0,03842	0,02806	0,01122	0,02522	0,012276	0,02522
Desvio máx. e amplitude na peça	0,5549 0,7159	0,02402 0,03842	0,01300 0,02530	0,00428 0,00595	0,00080 0,00091	0,00458 0,00801	0,00080 0,00091
Posição dos apoios (m)	R1=0,25 R2=2,8	R1=0,25 R2=1,525 R3=2,8	R1=0,25 R2=2,8	R1=0,25 R2=2,8		R1=0,25 R2=2,8	
Pressão nas almofadas(N/m)			Q1=632312	Q1=551355 Q2=760415 Q3=61833949		Q1=551355 Q2=760415 Q3=61833949	

Caso 6-Avental com 3,05m de comprimento com uma força de 1600kN descentrada compreendida entre $x = 0,25$ e $x = 1,5$ metros.

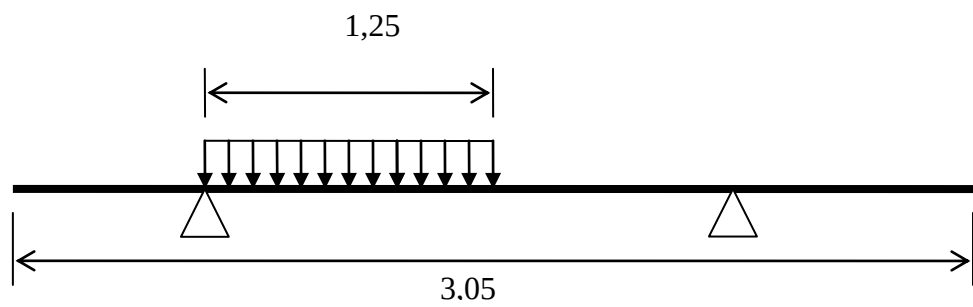
6	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
				Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça
Desvio máx. no avental (mm)	0,5731	0,0515	0,03695	0,0300	0,08726	0,01547	0,07223
Amplitude do desvio no avental (mm)	0,7751	0,086	0,07390	0,0404	0,13336	0,03037	0,10873
Desvio máx. e amplitude na peça	0,5731 0,5731	0,0515 0,0515	0,03695 0,03695	0,0104 0,0204	0,0034 0,0035	0,00680 0,00990	0,00101 0,00150
Posição dos apoios (m)	R1=0,25 R2=2,8	R1=0,25 R2=1,525 R3=2,8	R1=0,25 R2=2,8	R1=0,25 R2=2,8		R1=0,25 R2=2,8	
Pressão nas almofadas(N/m)			Q1=651706	Q1=0 Q2=1095280 Q3=20770622		Q1=-1486968 Q2=994892 Q3=17765338	

Caso 1**Caso 2****Caso 3****Caso 4**

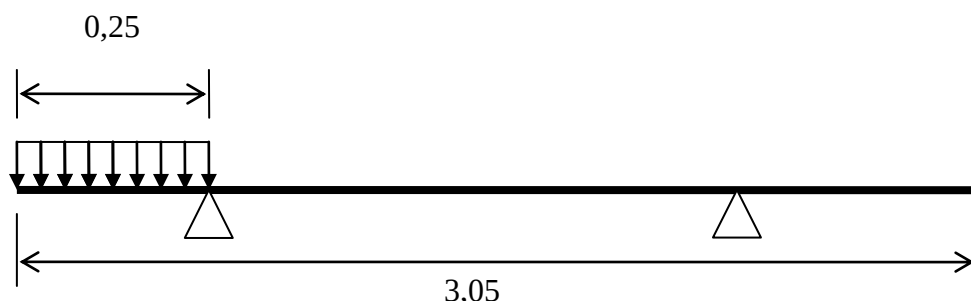
Caso 5



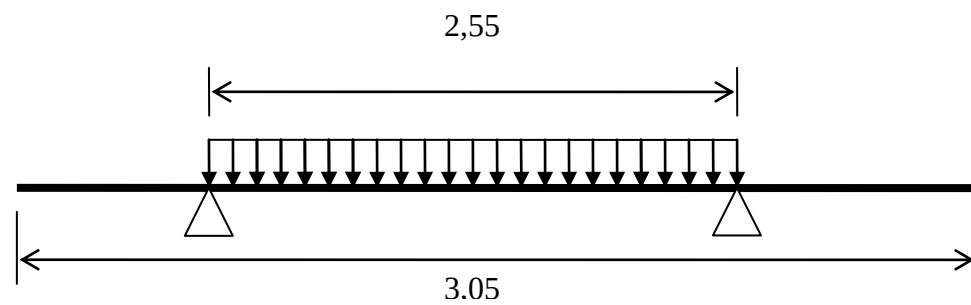
Caso 6



Caso 7



Caso 8



Caso 9-Avental com 3,05m_de comprimento com uma força de 1600kN descentrada compreendida entre $x = 0,5$ e $x = 1,5$ metros.

9	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
				Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça
Desvio máx. no avental (mm)	—	—	—	0,0107	0,0474	0,0177	0,0365
Amplitude do desvio no avental (mm)	—	—	—	0,0117	0,0474	0,0181	0,0365
Desvio máx. e amplitude na peça	—	—	—	0,0113 0,0221	0,0018 0,0021	0,0079 0,0122	0,00556 0,00899
Posição dos apoios (m)	R1=0,25 R2=2,8	R1=0,25 R2=1,525 R3=2,8	R1=0,25 R2=2,8	R1=0,25 R2=2,8		R1=0,25 R2=2,8	
Pressão nas almofadas(N/m)	—	—	—	Q1=0 Q2=1031919 Q3=12194592		Q1=-6386420 Q2=757183 Q3=7196859	

Caso 10-Avental com 3,05m_de comprimento com uma força de 1600kN descentrada compreendida entre $x = 0,05$ e $x = 0,2$ metros.

10	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
				Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça
Desvio máx. no avental (mm)	—	—	—	6,3E-6	5,45E-4	7,9E-5	5,41E-4
Amplitude do desvio no avental (mm)	—	—	—	6,3E-6	5,45E-4	7,9E-5	5,41E-4
Desvio máx. e amplitude na peça	—	—	—	1,0E-4 1,4E-4	0,00185 0,00218	1,12E-4 1,43E-4	0,0015 0,0018
Posição dos apoios (m)	R1=0,25 R2=2,8	R1=0,25 R2=1,525 R3=2,8	R1=0,25 R2=2,8	R1=0,25 R2=2,8		R1=0,25 R2=2,8	
Pressão nas almofadas(N/m)	—	—	—	Q1=6114570 Q2=0 Q3=522416		Q1=6364664 Q2=-1261 Q3=-20784	

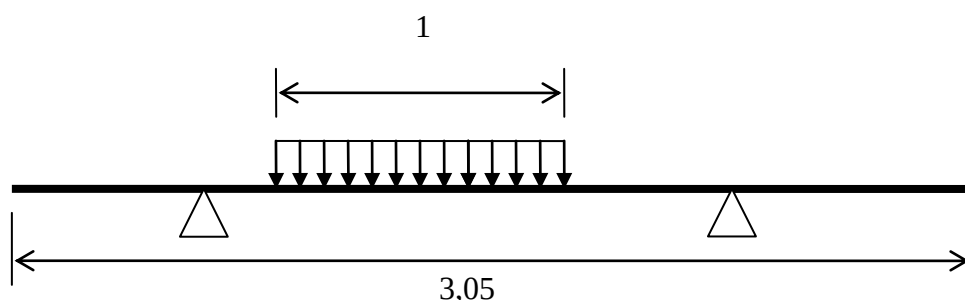
Caso 11-Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 2,0$ e $x = 3,0$ metros.

11	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
				Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça
Desvio máx. no avental (mm)	—	—	—	0,127	1,78	0,127	1,78
Amplitude do desvio no avental (mm)	—	—	—	0,155	1,88	0,155	1,88
Desvio máx. e amplitude na peça	—	—	—	0,0736 0,0461	0,00400 0,00101	0,0736 0,0461	0,0040 0,0010
Posição dos apoios (m)	R1=1,5 R2=4,65	R1=1,5 R2=3,075 R3=4,65	R1=1,5 R2=4,65	R1=1,5 R2=4,65		R1=1,5 R2=4,65	
Pressão nas almofadas(N/m)	—	—	—	Q1=10901 Q2=1374474 Q3=958122		Q1=-154061 Q2=1261670 Q3=880626	

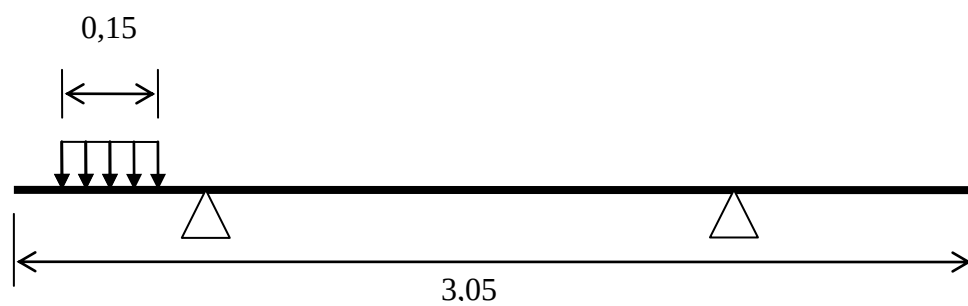
Caso 12-Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 0,05$ e $x = 1,0$ metros.

12	1-Avental normal	2-Avental com três apoios	3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
				Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça	Sem ajuste à peça	Com ajuste à peça
Desvio máx. no avental (mm)	—	—	—	0,0109	0,192	0,0109	0,192
Amplitude do desvio no avental (mm)	—	—	—	0,0177	0,262	0,0177	0,262
Desvio máx. e amplitude na peça	—	—	—	0,0109 0,0146	0,0297 0,0554	0,0109 0,0146	0,0297 0,0554
Posição dos apoios (m)	R1=1,5 R2=4,65	R1=1,5 R2=3,075 R3=4,65	R1=1,5 R2=4,65	R1=1,5 R2=4,65		R1=1,5 R2=4,65	
Pressão nas almofadas(N/m)	—	—	—	Q1=1868341 Q2=34172 Q3=10998		Q1=1868341 Q2=34172 Q3=10998	

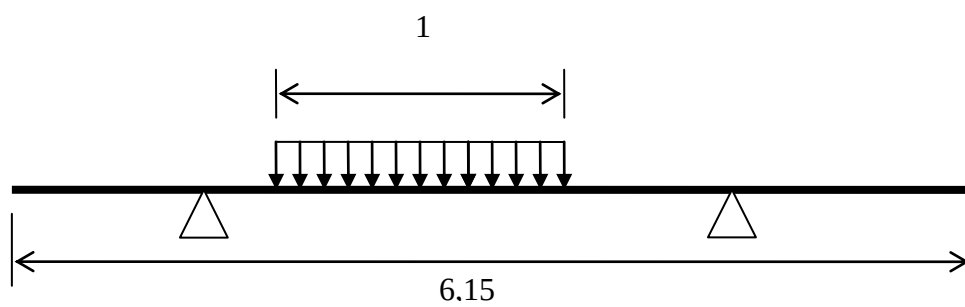
Caso 9



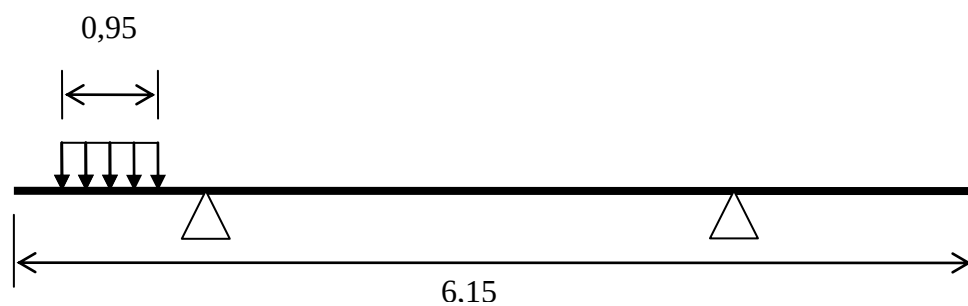
Caso 10



Caso 11



Caso 12



Anexo D: Desvios de paralelismo (altura de 0,7 metros e espessura de 0,1 metros)

Caso 1-Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 0, x = 3$ metros.

1		1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	3,209	—	3,033	—	1,511	2,982	0,0591	1,8511	0,0591	1,8511
	Peça	3,553	—	3,301	—	2,975	3,203	0,1159	1,9666	0,1159	1,9666
2-Avental com três apoios	Avental	—	—	2,86	—	1,489	2,955	0,058	1,766	0,058	1,766
	Peça	—	—	3,06	—	2,975	3,224	0,115	1,871	0,115	1,871
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	—	—	—	—	1,511	2,982	0,319	1,851	0,059	1,851
	Peça	—	—	—	—	2,975	3,203	0,322	1,966	0,115	1,966
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	1,463	0,026	0,187	0,0039	0,059	0,0039
	Peça	—	—	—	—	1,633	0,050	0,189	0,0068	0,072	0,0068
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	0,0591	1,8488	0,0591	1,8488
	Peça	—	—	—	—	—	—	0,1159	1,9641	0,1159	1,9641
	Avental	—	—	—	—	—	—	0,0591	1,8488	0,0591	1,8488
	Peça	—	—	—	—	—	—	0,0724	0,0068	0,0724	0,0068

Caso 2-Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 1,5, x = 2,5$ metros.

2		1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	3,899	—	2,45	—	3,899	3,899	0,3050	7,1677	0,1353	5,9207
	Peça	5,958	—	3,54	—	5,958	5,958	0,3624	7,7674	0,2405	6,4008
2-Avental com três apoios	Avental	—	—	1,01	—	2,454	2,454	0,341	8,297	0,147	6,848
	Peça	—	—	1,29	—	3,548	3,548	0,404	9,029	0,247	7,441
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	—	—	—	—	1,094	1,094	0,1140	0,0063	0,147	0,0041
	Peça	—	—	—	—	1,284	1,284	0,1768	0,0124	0,169	0,0076
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	3,899	3,899	0,304	7,1677	0,135	5,919
	Peça	—	—	—	—	5,958	5,958	0,362	7,7675	0,240	6,399
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	1,988	1,988	0,092	0,0054	0,135	0,0035
	Peça	—	—	—	—	2,290	2,290	0,149	0,0107	0,155	0,0065
	Avental	—	—	—	—	—	—	0,304	7,1677	0,135	5,917
	Peça	—	—	—	—	—	—	0,362	7,7675	0,240	6,397
	Avental	—	—	—	—	—	—	0,092	0,0054	0,135	0,0035
	Peça	—	—	—	—	—	—	0,149	0,0107	0,155	0,0065

Caso 3-Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 0, x = 1,5$ metros.

3		1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	11,21 14,55	—	8,89 10,72	—	4,186 7,084	7,344 7,645	<u>5,8E-6</u> 1,2E-5	<u>3,8E-6</u> 2E-5	<u>6,9E-6</u> 1,3E-5	<u>0,0312</u> 0,0353
	Peça	11,21 11,42	—	8,89 9,03	—	2,897 2,996	0,300 0,560	<u>9,2E-6</u> 6,5E-6	<u>2,2E-7</u> 4,3E-7	<u>6,9E-6</u> 7,0E-6	<u>7,5E-8</u> 1,5E-7
2-Avental com três apoios	Avental	—	—	6,57 7,21	—	3,84 7,08	7,223 7,521	<u>0,0250</u> 0,0452	<u>11,67</u> 13,21	<u>0,0250</u> 0,0452	<u>0,235</u> 0,355
	Peça	—	—	6,57 6,65	—	3,23 3,31	0,160 0,298	<u>0,008</u> 0,016	<u>2,9E-5</u> 3,0E-5	<u>0,008</u> 0,016	<u>5,7E-6</u> 6,0E-6
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	—	—	—	—	7,344 7,645	7,344 7,645	<u>2,228</u> 2,326	<u>11,95</u> 13,49	<u>3,6E-6</u> 6,7E-6	<u>11,95</u> 13,49
	Peça	—	—	—	—	0,300 0,560	0,300 0,560	<u>0,503</u> 0,602	<u>2,7E-5</u> 5,0E-5	<u>3,6E-6</u> 3,7E-6	<u>2,4E-5</u> 2,5E-5
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000
	Peça	—	—	—	—	—	—	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000

Caso 4-Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 1,5, x = 4,65$ metros.

		1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	4,339 7,186	—	2,305 3,729	—	4,339 7,186	4,339 7,186	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000
	Peça	2,847 3,183	—	1,423 1,602	—	2,847 3,183	2,847 3,183	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000
2-Avental com três apoios	Avental	—	—	0,271 0,345	—	2,30 3,72	2,30 3,72	<u>0,0656</u> 0,0705	<u>0,0956</u> 0,1173	<u>0,0218</u> 0,0395	<u>0,359</u> 0,369
	Peça	—	—	0,074 0,095	—	1,42 1,60	1,42 1,60	<u>0,0656</u> 0,0705	<u>0,0262</u> 0,0479	<u>0,0218</u> 0,0395	<u>0,010</u> 0,020
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	—	—	—	—	4,339 7,186	4,339 7,186	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000
	Peça	—	—	—	—	2,847 3,183	2,847 3,183	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000
	Peça	—	—	—	—	—	—	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000

Caso 5-Avental com 3,05m de comprimento com uma força de 1600kN descentrada compreendida entre $x = 0, x = 2$ metros.

5		1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	1,10 1,46	—	0,55 0,74	—	0,030 0,056	0,035 0,057	<u>0,0197</u> 0,0239	<u>0,0368</u> 0,0484	<u>0,0197</u> 0,0239	<u>0,0368</u> 0,0484
	Peça	1,10 1,46	—	0,55 0,74	—	0,027 0,053	0,033 0,053	<u>0,0066</u> 0,0109	<u>0,0017</u> 0,0026	<u>0,0066</u> 0,0109	<u>0,0017</u> 0,0026
2-Avental com três apoios	Avental	—	—	0,048 0,076	—	0,031 0,055	0,028 0,056	<u>0,0229</u> 0,0359	<u>0,0479</u> 0,0704	<u>0,0154</u> 0,0245	<u>0,0310</u> 0,0447
	Peça	—	—	0,048 0,056	—	0,031 0,055	0,028 0,056	<u>0,0129</u> 0,0243	<u>0,0108</u> 0,0188	<u>0,0154</u> 0,0197	<u>0,0083</u> 0,0134
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	—	—	—	—	0,030 0,056	0,035 0,057	<u>0,0212</u> 0,0259	<u>0,0369</u> 0,0485	<u>0,0212</u> 0,0259	<u>0,0369</u> 0,0485
	Peça	—	—	—	—	0,027 0,053	0,033 0,053	<u>0,0069</u> 0,0116	<u>0,0018</u> 0,0026	<u>0,0069</u> 0,0116	<u>0,0018</u> 0,0026
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	<u>0,0197</u> 0,0239	<u>0,0368</u> 0,0484	<u>0,0197</u> 0,0239	<u>0,0368</u> 0,0484
	Peça	—	—	—	—	—	—	<u>0,0066</u> 0,0109	<u>0,0017</u> 0,0026	<u>0,0066</u> 0,0109	<u>0,0017</u> 0,0026
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,0197</u> 0,0239	<u>0,0368</u> 0,0484
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,0066</u> 0,0109	<u>0,0017</u> 0,0026

Caso 6-Avental com 3,05m de comprimento com uma força de 1600kN descentrada compreendida entre $x = 0,25, x = 1,5$ metros.

6		1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	1,14 1,54	—	0,59 0,82	—	0,074 0,146	0,116 0,175	<u>0,0614</u> 0,0859	<u>0,172</u> 0,262	<u>0,0308</u> 0,0608	<u>0,143</u> 0,215
	Peça	1,14 1,18	—	0,59 0,61	—	0,074 0,078	0,060 0,098	<u>0,0244</u> 0,0402	<u>0,0035</u> 0,0057	<u>0,0134</u> 0,0196	<u>0,0014</u> 0,0024
2-Avental com três apoios	Avental	—	—	0,10 0,17	—	0,081 0,147	0,113 0,166	<u>0,0648</u> 0,0994	<u>0,232</u> 0,371	<u>0,0373</u> 0,0608	<u>0,1709</u> 0,2704
	Peça	—	—	0,10 0,14	—	0,081 0,093	0,070 0,115	<u>0,0345</u> 0,0606	<u>0,0076</u> 0,0121	<u>0,0160</u> 0,0225	<u>0,0030</u> 0,0051
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	—	—	—	—	0,116 0,175	0,1169 0,1757	<u>0,0631</u> 0,0886	<u>0,1796</u> 0,2746	<u>0,0308</u> 0,0608	<u>0,1433</u> 0,2155
	Peça	—	—	—	—	0,060 0,098	0,0609 0,0981	<u>0,0254</u> 0,0420	<u>0,0041</u> 0,0065	<u>0,0134</u> 0,0196	<u>0,0014</u> 0,0024
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	<u>0,0614</u> 0,0859	<u>0,1724</u> 0,2629	<u>0,0308</u> 0,0608	<u>0,1432</u> 0,2153
	Peça	—	—	—	—	—	—	<u>0,0244</u> 0,0402	<u>0,0035</u> 0,0057	<u>0,0134</u> 0,0196	<u>0,0014</u> 0,0024
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,0308</u> 0,0608	<u>0,1432</u> 0,2153
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,0134</u> 0,0196	<u>0,0014</u> 0,0024

Caso 7-Avental com 3,05m de comprimento com uma força de 1600kN descentrada compreendida entre $x = 0, x = 0,25$ metros.

7		1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e um almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	0,277 0,429	—	0,152 0,264	—	0,277 0,429	0,277 0,429	<u>3,0E-9</u> 4,4E-9	<u>0,0003</u> 0,0007	<u>3,0E-9</u> 4,4E-9	<u>0,0003</u> 0,0007
	Peça	0,152 0,182	—	0,112 0,133	—	0,152 0,182	0,152 0,182	<u>1,8E-9</u> 2,1E-9	<u>1,1E-8</u> 1,7E-8	<u>1,8E-9</u> 2,1E-9	<u>1,1E-8</u> 1,7E-8
2-Avental com três apoios	Avental	—	—	0,072 0,126	—	0,152 0,264	0,152 0,264	<u>0,0015</u> 0,0028	<u>0,0083</u> 0,0083	<u>0,0015</u> 0,0028	<u>0,0317</u> 0,0592
	Peça	—	—	0,054 0,071	—	0,112 0,133	0,112 0,133	<u>0,0015</u> 0,0016	<u>1,0E-6</u> 1,3E-6	<u>0,0015</u> 0,0016	<u>4,7E-8</u> 7,2E-8
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	—	—	—	—	0,277 0,429	0,277 0,429	<u>3,7E-9</u> 6,1E-9	<u>4,5E-9</u> 8,3E-9	<u>3,7E-9</u> 6,1E-9	<u>4,5E-9</u> 8,3E-9
	Peça	—	—	—	—	0,152 0,182	0,152 0,182	<u>0,0000</u> 0,0000	<u>0,0000</u> 0,0000	<u>0,0000</u> 0,0000	<u>0,0000</u> 0,0000
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	<u>1,7E-8</u> 2,6E-8	<u>1,7E-8</u> 2,6E-8	<u>3,9E-9</u> 6,5E-9	<u>1,3E-8</u> 1,8E-8
	Peça	—	—	—	—	—	—	<u>9,3E-9</u> 1,1E-8	<u>9,3E-9</u> 1,1E-8	<u>4,0E-9</u> 4,6E-9	<u>0,0000</u> 0,0000
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>3,9E-9</u> 6,5E-9	<u>1,3E-8</u> 1,8E-8
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>4,0E-9</u> 4,6E-9	<u>0,0000</u> 0,0000

Caso 8-Avental com 3,05m de comprimento com uma força de 1600kN descentrada compreendida entre $x = 0,25, x = 2,8$ metros.

8		1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	1,15 1,15	—	0,57 0,76	—	<u>0,004</u> 0,006	<u>0,004</u> 0,006	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000
	Peça	1,15 1,18	—	0,57 0,59	—	<u>0,002</u> 0,003	<u>0,002</u> 0,003	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000
2-Avental com três apoios	Avental	—	—	0,029 0,052	—	<u>0,011</u> 0,021	<u>0,011</u> 0,021	<u>0,011</u> 0,019	<u>0,011</u> 0,019	<u>0,0065</u> 0,0120	<u>0,0145</u> 0,0179
	Peça	—	—	0,029 0,029	—	<u>0,011</u> 0,021	<u>0,011</u> 0,021	<u>0,011</u> 0,019	<u>0,011</u> 0,019	<u>0,0054</u> 0,0098	<u>0,0033</u> 0,0060
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	—	—	—	—	<u>0,004</u> 0,006	<u>0,004</u> 0,006	<u>0,0024</u> 0,0035	<u>0,0024</u> 0,0035	<u>6,1E-8</u> 1,1E-7	<u>6,1E-8</u> 1,1E-7
	Peça	—	—	—	—	<u>0,002</u> 0,003	<u>0,002</u> 0,003	<u>0,0010</u> 0,0019	<u>0,0010</u> 0,0018	<u>6,1E-8</u> 7,2E-8	<u>6,1E-8</u> 7,2E-8
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000
	Peça	—	—	—	—	—	—	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,000</u> 0,000	<u>0,000</u> 0,000

Caso 9-Avental com 3,05m de comprimento com uma força de 1600kN descentrada compreendida entre $x = 0,5$, $x = 1,5$ metros.

9		1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e um almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2-Avental com três apoios	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	<u>0,069</u>	<u>0,18</u>	<u>0,036</u>	<u>0,17</u>
								0,095	0,27	0,071	0,26
	Peça	—	—	—	—	—	—	<u>0,025</u>	<u>0,002</u>	<u>0,016</u>	<u>0,0015</u>
								0,042	0,003	0,024	0,0026
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,036</u>	<u>0,17</u>
										0,071	0,26
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,016</u>	<u>0,0015</u>
										0,024	0,0026

Caso 10-Avental com 3,05m de comprimento com uma força de 1600kN descentrada compreendida entre $x = 0,05$, $x = 0,2$ metros.

10		1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2-Avental com três apoios	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	<u>0,001</u>	<u>0,089</u>	<u>0,0007</u>	<u>0,089</u>
								0,001	0,159	0,0009	0,159
	Peça	—	—	—	—	—	—	<u>0,001</u>	<u>6,9E-5</u>	<u>0,0007</u>	<u>6,9E-5</u>
								0,001	0,0001	0,0008	0,0001
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,0007</u>	<u>0,089</u>
										0,0009	0,159
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,0007</u>	<u>6,9E-5</u>
										0,0008	0,0001

Caso 11-Avental com 6,15m de comprimento com uma força de 2100kN descentrada compreendida entre $x = 2,0$ x $3,0$ metros.

11		1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2-Avental com três apoios	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	<u>0,255</u> 0,319	<u>4,19</u> 4,43	<u>0,143</u> 0,283	<u>4,19</u> 4,43
	Peça	—	—	—	—	—	—	<u>0,139</u> 0,203	<u>0,0026</u> 0,0052	<u>0,140</u> 0,144	<u>0,0026</u> 0,0052
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,143</u> 0,283	<u>4,19</u> 4,43
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,140</u> 0,144	<u>0,0026</u> 0,0052

Caso 12-Avental com 3,05m de comprimento com uma força de 1600kN descentrada compreendida entre $x = 0,05$, $x = 0,2$ metros.

12		1-Avental normal		2-Avental com três apoios		3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
Ajuste á peça		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2-Avental com três apoios	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3-Avental com dois apoios e uma almofada hidráulica	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4-Avental com dois apoios e três almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	<u>0,0214</u> 0,0372	<u>0,235</u> 0,636	<u>0,0214</u> 0,0372	<u>0,400</u> 0,636
	Peça	—	—	—	—	—	—	<u>0,0214</u> 0,0328	<u>0,0023</u> 0,0042	<u>0,0214</u> 0,0328	<u>0,0023</u> 0,0042
5-Avental com dois apoios e seis almofadas hidráulicas	Avental	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,0214</u> 0,0372	<u>0,570</u> 0,823
	Peça	—	—	—	—	—	—	—	—	<u>0,0214</u> 0,0328	<u>0,0023</u> 0,0042

Nota: (A negrito estão as amplitudes dos desvios e sem estar a negrito os desvios máximos)
(Dados do avental: altura de 0,7 metros e espessura de 0,1 metros)

Anexo E: Desvios de rectitude de uma QHD20040/60

(Dados do avental superior: altura de 1,93 metros e espessura de 0,07 metros)

Caso 1-Avental de uma QHD20040/60 com 6,2m de comprimento com 2100kN de força descentrada, compreendida de $x=0$, $x=3$ metros.

1 Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Peça	Def.max.	0,058	-	-	-	-	-	0,00288	4,7E-4	0,00288	4,7E-4
	Ampli.	0,065	-	-	-	-	-	0,00357	5,7E-4	0,00357	5,7E-4

Caso 2-Avental de uma QHD20040/60 com 6,2m de comprimento com 2100kN de força descentrada, compreendida de $x=1,5$, $x=2,5$ metros.

2 Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Peça	Def.max.	0,0099	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ampli.	0,0102	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Caso 3-Avental de uma QHD20040/60 com 6,2m de comprimento com 2100kN de força descentrada, compreendida de $x=0$, $x=1,5$ metros.

3 Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Peça	Def.max.	0,098	-	-	-	-	-	0,000	0,000	0,000	0,000
	Ampli.	0,105	-	-	-	-	-	0,000	0,000	0,000	0,000

Caso 4-Avental de uma QHD20040/60 com 6,2m de comprimento com 2100kN de força descentrada, compreendida de $x=1,525$, $x=4,675$ metros.

4 Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Peça	Def.max.	0,097	-	-	-	-	-	0,000	0,000	0,000	0,000
	Ampli.	0,095	-	-	-	-	-	0,000	0,000	0,000	0,000

Caso 5-Avental de uma QHD20040/60 com 6,2m de comprimento com 2100kN de força descentrada, compreendida de $x=2$, $x=3$ metros.

5 Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Peça	Def.max.	0,124	-	-	-	-	-	0,0050	9,6E-4	0,0047	9,6E-4
	Ampli.	0,189	-	-	-	-	-	0,0068	0,00163	0,0049	0,00163

Anexo F: Desvios de paralelismo de uma QHD20040/60

(Dados do avental superior: altura de 1,93 metros e espessura de 0,07 metros)

(Dados do avental inferior: altura de 0,865 metros e espessura de 0,1 metros)

(A negrito estão as amplitudes dos desvios e sem estar a negrito os desvios máximos, relativamente à zona da peça e a todo o avental)

Caso 1-Avental de uma QHD20040/60 com 6,15m de comprimento com 2100kN de força descentrada, compreendida de $x=0$, $x=3$ metros.

1 Avental Inferior Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	0,52 0,47	–	0,42 0,46	–	0,222 0,437	0,438 0,471	0,008 0,017	0,28 0,30	0,008 0,017	0,28 0,30
	Peça	0,52 0,47	–	0,42 0,46	–	0,214 0,240	0,004 0,005	0,008 0,010	3,5E-4 6,3E-4	0,008 0,010	3,5E-4 6,3E-4

Caso 2-Avental de uma QHD20060 com 6,15m de comprimento com 2100kN de força descentrada, compreendida de $x=1,5$, $x=2,5$ metros.

2 Avental Inferior Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	0,09 0,28	–	0,06 0,08	–	0,18 0,28	0,18 0,28	0,014 0,017	0,36 0,39	0,014 0,017	0,36 0,39
	Peça	0,090 0,095	–	0,02 0,02	–	0,09 0,09	0,09 0,09	0,0026 0,0045	1,3E-4 2,2E-4	0,0026 0,0045	1,3E-4 2,2E-4

Caso 3-Avental de uma QHD20060 com 6,15m de comprimento com 2100kN de força descentrada, compreendida de $x=0$, $x=1,5$ metros.

3 Avental Inferior Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	0,82 1,06	–	0,54 0,58	–	0,21 0,52	0,21 0,52	6,0E-4 9,0E-4	0,03 0,04	6,0E-4 9,0E-4	0,03 0,04
	Peça	0,82 0,87	–	0,52 0,55	–	0,21 0,23	0,21 0,23	6,0E-4 9,0E-4	3,0E-4 4,0E-4	6,0E-4 9,0E-4	3,0E-4 4,0E-4

Caso 4-Avental de uma QHD20060 com 6,15m de comprimento com 2100kN de força descentrada, compreendida de $x=1,5$, $x=4,65$ metros.

4 Avental Inferior Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	2,09 3,47	–	0,22 0,32	–	2,09 3,47	2,09 3,47	0,002 0,003	0,03 0,03	0,002 0,003	0,03 0,03
	Peça	1,37 1,42	–	0,09 0,10	–	1,37 1,42	1,37 1,42	0,002 0,003	0,001 0,001	0,002 0,0025	0,001 0,001

Caso 5-Avental de uma QHD20060 com 6,15m de comprimento com 2100kN de força descentrada, compreendida de $x=2$, $x=3$ metros.

5 Avental Inferior Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	1,8 2,8	–	0,056 0,080	–	1,8 2,8	1,8 2,8	0,07 0,09	1,35 1,43	0,07 0,09	1,35 1,43
	Peça	1,08 1,80	–	0,024 0,040	–	1,0 1,8	1,0 1,8	0,02 0,04	3,6E-4 6,0E-4	0,02 0,04	3,6E-4 6,0E-4

Anexo G: Desvio de rectitude de uma QHD20040

(Dados do avental superior: altura de 1,776 metros e espessura de 0,06 metros)

Caso 1-Avental de uma QHD20040 com 4,05 de comprimento com 980000N de força descentrada, compreendida de $x=0$, $x=2$ metros.

1-Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Peça	Def.max.	0,109	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ampli.	0,154	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Caso 2-Avental de uma QHD20040 com 4,05m de comprimento com 980000N de força descentrada, compreendida de $x=0.45$, $x=2$ metros.

2-Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Peça	Def.max.	0,117	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ampli.	0,117	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Caso 3-Avental de uma QHD20040 com 4,05m de comprimento com 980000N de força descentrada, compreendida de $x=0$, $x=0.45$ metros.

3-Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Peça	Def.max.	0,0057	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ampli.	0,0059	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Caso 4-Avental de uma QHD20040 com 4,05m de comprimento com 980000N de força descentrada, compreendida de $x=0.45$, $x=3.6$ metros.

4-Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Peça	Def.max.	0,233	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ampli.	0,234	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Caso 5-Avental de uma QHD20040 com 4,05m de comprimento com 980000N de força descentrada, compreendida de $x=1$, $x=3$ metros.

5-Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
Peça	Def.max.	0,193	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ampli.	0,196	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Anexo H: Desvios de paralelismo de uma QHD20040

(Dados do avental superior: altura de 1,776 metros e espessura de 0,06 metros)

(Dados do avental inferior: altura de 0,865 metros e espessura de 0,1 metros)

(A negrito estão as amplitudes dos desvios e sem estar a negrito os desvios máximos, relativamente à zona da peça e a todo o avental)

Caso 1-Avental de uma QHD20040 com 4,05m de comprimento com 980000N de força descentrada, compreendida de $x=0$, $x=2$ metros.

1 Avental Inferior Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1- Avental normal	Avental	0,676 0,955	—	0,215 0,334	—	0,030 0,100	0,030 0,100	0,034 0,047	0,12 0,17	0,034 0,047	0,12 0,17
	Peça	0,676 0,955	—	0,215 0,334	—	0,033 0,049	0,033 0,049	0,013 0,019	0,0014 0,0022	0,013 0,019	0,0014 0,0022

Caso 2-Avental de uma QHD20040 com 4,05m de comprimento com 980000N de força descentrada, compreendida de $x=0.45$, $x=2$ metros.

2 Avental Inferior Avental Superior		1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1- Avental normal	Avental	0,727 1,042	—	0,230 0,372	-	0,073 0,116	0,073 0,116	0,041 0,058	0,135 0,190	0,021 0,042	0,125 0,174
	Peça	0,727 0,639	—	0,139 0,158	-	0,045 0,047	0,039 0,061	0,016 0,026	0,0022 0,0035	0,010 0,013	7,0E-4 13E-4

Caso 3-Avental de uma QHD20040 com 4,05m de comprimento com 980000N de força descentrada, compreendida de $x=0$, $x=0.45$ metros.

3	Avental Inferior	1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	0,052 0,087	—	0,023 0,040	—	0,052 0,087	0,052 0,087	1,8E-8 3,2E-8	0,0075 0,0013	0,000 0,000	0,000 0,000
	Peça	0,035 0,036	—	0,023 0,023	—	0,035 0,036	0,035 0,036	1,4E-8 1,6E-8	2,4E-9 3,4E-9	0,000 0,000	0,000 0,000

Caso 4-Avental de uma QHD20040 com 4,05m de comprimento com 980000N de força descentrada, compreendida de $x=0.45$, $x=3.6$ metros.

4	Avental Inferior	1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	1,44 2,00	—	0,21 0,34	—	0,012 0,016	0,013 0,016	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000
	Peça	1,44 1,44	—	0,21 0,23	—	0,004 0,007	0,004 0,007	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000	0,000 0,000

Caso 5-Avental de uma QHD20040 com 4,05m de comprimento com 980000N de força descentrada, compreendida de $x=1$, $x=3$ metros.

5	Avental Inferior	1-Avental normal		2-Avental c três apoios		3-Avental c dois apoios e uma almofada hidráulica		4-Avental c dois apoios e três almofadas hidráulicas		5-Avental c dois apoios e seis almofadas hidráulicas	
		Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
1-Avental normal	Avental	1,19 1,65	—	0,14 0,22	—	0,003 0,006	0,003 0,006	0,003 0,005	0,013 0,015	0,003 0,005	0,013 0,015
	Peça	1,19 0,52	—	0,14 0,23	—	0,003 0,006	0,003 0,006	0,002 0,005	2,0E-4 4,0E-4	0,003 0,005	2,0E-4 4,0E-4