

**Desenvolvimento e validação de um sistema inovador de
compensação de deformação numa quinadora**
Projecto realizado na ADIRA

Artur Francisco Leite da Cunha Mendes da Costa

Relatório do Projecto Final do MIEM

Orientador na ADIRA: Engenheiro Tiago Brito e Faro

Orientador na FEUP: Professor Paulo Tavares de Castro



FEUP

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

Fevereiro de 2008

Desenvolvimento e validação de um sistema inovador de compensação de deformação numa quinadora

Projecto realizado na ADIRA

Artur Francisco Leite da Cunha Mendes da Costa

Relatório do Projecto Final do MIEM

Orientador na ADIRA: Engenheiro Tiago Brito e Faro

Orientador na FEUP: Professor Paulo Tavares de Castro



FEUP

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

Fevereiro de 2008

Aos meus pais

Resumo

O presente estudo incide sobre uma técnica de quinagem designada por quinagem livre ou "quinagem no ar". Na quinagem livre só se utiliza o efeito de flexão plástica simples. Este processo consiste numa chapa que é dobrada pela penetração de um punção numa matriz. Durante a quinagem, surgem deformações na estrutura das quinadoras que são responsáveis por pequenas variações da profundidade de penetração do punção na matriz, causando grandes variações angulares das dobras da chapa quinada ao longo do seu comprimento.

A solução pensada para a correcção da deformação sofrida pelos aventais da quinadora é impor uma contra-carga nos mesmos que contraria a deformação devida ao esforço de quinagem. Para isso, será criado nos aventais um volume interior em forma de rasgo com pressão hidráulica interna, que compensa a deformação sofrida pela carga de quinagem. O controlo da pressão no interior dos rasgos é feito por um sistema hidráulico, que terá a capacidade de auto compensar a deformação sofrida pelos aventais da quinadora, sem necessidade de perdas de tempo ou desperdício de material de afinação, devido à compensação de deformações ser automática, sem necessidade de ajustamento dos parâmetros de quinagem.

Neste trabalho foram desenvolvidos vários modelos em elementos finitos que reproduzem o sistema de compensação idealizado. Numa primeira fase do estudo foram apenas efectuados modelos não muito complexos da estrutura da quinadora, mas com o evoluir do trabalho, o grau de complexidade dos modelos foi aumentando numa tentativa de reproduzir mais correctamente o comportamento mecânico da quinadora. Este trabalho contém ainda uma abordagem teórica dos resultados obtidos em termos de variações angulares.

Com os resultados obtidos, foi possível concluir que o sistema de compensação de deformações desenvolvido pode constituir uma mais valia em relação às soluções existentes.

Development and Validation of an Innovative System of Press Brake Deflections Compensation

Abstract

This study focuses on a technique of bending process called free bending or air bending. With this technique it is only used the effect of simple plastic bending. The process consists in bending a metal plate by the punch penetration in the die. During the bending, deflections occur in the press brake structure, which are responsible for small depth variations of the punch penetration, causing large angular variations along the length of the bent plate.

The solution designed to compensate the deformation suffered by the press brake, consists of imposing a counter-load in press brake beams that contradicts the deformation due to the bending effort. A cavity is created inside the beams, subjected to hydraulic pressure, which offsets the bending deformation suffered by the press brake. The monitoring of the inside beam pressure is done by a hydraulic system, which will have the capacity to offset the self deformation suffered by press brake without the need to waste time or testing material due to an automatic deformation compensation without the need for adjusting the press brake parameters.

In this work several finite element models were developed, reproducing the idealized compensation system. In the first phase of the study only simple models of the press brake structure were made. With the work evolution, the complexity of the models has been increased in an attempt to correctly reproduce the mechanical press brake behavior. This work also contains a theoretical approach of the results in terms of angular variations.

It is concluded that the compensation system developed can be an improvement on the existing solutions.

Agradecimentos

Agradeço a todas as pessoas de ADIRA S.A. pelo apoio que me prestaram, muito em especial ao meu orientador na empresa Engenheiro Tiago Brito e Faro, ao Sr. António Alves e ao Engenheiro José Bessa Pacheco, pela enorme dedicação que tiveram durante a realização do projecto.

Agradeço também ao meu orientador da FEUP, Professor Paulo Tavares de Castro e a Professora Lúcia Dinis pelo apoio e envolvimento que tiveram no projecto.

Finalmente aos meus pais pelo incentivo e paciência.

Índice de Conteúdos

1 - Introdução.....	1
1.1 - A empresa ADIRA S. A.....	1
1.2 - Projecto realizado na ADIRA S.A.....	3
1.3 - Desenvolvimento do projecto na ADIRA S.A.....	4
1.4 - Organização e temas abordados no presente relatório.....	5
2 - Processo de quinagem.....	7
2.1 - Evolução das quinadoras.....	8
2.2 - Tipos de sistemas de compensação de deformações existentes em quinadoras.....	10
2.3 - Limitações dos sistemas de compensação de deformações existentes.....	16
2.4 - Método de compensação de deformações desenvolvido.....	17
3 - Modelos desenvolvidos.....	21
3.1 - Tipo de malha de elementos finitos usada nos modelos.....	21
3.2 - Modelos preliminares para determinar as geometrias dos rasgos dos aventais.....	22
3.2.1 - Modelação preliminar 1.....	24
3.2.2 - Modelação preliminar 2.....	27
3.2.3 - Modelação preliminar 3.....	30
3.2.4 - Modelação preliminar 4.....	33
3.2.5 - Modelação preliminar 5.....	36
3.2.6 - Modelação sem compensação de deformações.....	39
3.2.7 - Conclusões do estudo da geometria dos rasgos dos aventais.....	41
3.3 - Modelação dos aventais móvel e fixo.....	42
3.3.1 - Alterações efectuadas ao avental móvel.....	42
3.3.2 - Modelo do avental fixo.....	43
3.3.3 - Resultados obtidos com a modelação dos aventais.....	45
3.4 - Validação dos modelos desenvolvidos.....	49

3.4.1 - Resultados obtidos através dos modelos desenvolvidos em Ansys.....	50
3.4.2 - Comparação dos resultados das modelações em Ansys e Cosmos.....	52
3.5 - Modelação da quinadora.....	54
3.5.1 - Modelação 1.....	56
3.5.2 - Comparação dos resultados da modelação 1 em relação aos modelos individuais dos aventais	58
3.5.3 - Nova modelação individual do avental fixo da quinadora.....	59
3.5.4 - Modelação 2.....	61
3.5.5 - Modelação 3.....	65
3.5.6 - Modelação da quinadora com ferramentas de quinagem.....	70
3.5.7 - Verificação das tensões máximas nos montantes da quinadora.....	75
4 - Resultados obtidos.....	77
4.1 - Determinação das variações angulares de quinagem.....	77
4.1.1 - Considerações teóricas.....	77
4.1.2 - Cálculo das variações angulares de quinagem.....	81
4.2 - Comparação de resultados das modelações da quinadora.....	84
5 - Conclusões e perspectivas de trabalho futuro.....	87
5.1 - Conclusões sobre o trabalho desenvolvido.....	87
5.2 - Perspectivas de trabalho futuro.....	89
Bibliografia.....	91
Anexos.....	93

Índice de Figuras

Figura 1.1 - a) Células robotizadas de quinagem; b) Centro de corte laser com sistema de carregamento e descarregamento automático de chapa CCL 3015.....	2
Figura 2.1 - Quinagem de uma chapa.....	7
Figura 2.2 - Quinadora hidráulica QIH125090 para grandes comprimentos e fortes espessuras fabricada pela ADIRA.....	9
Figura 2.3 - Quinadora hidráulica QIHD11030 fabricada pela ADIRA	10
Figura 2.4 - Quinagem sem correcção de deformação	10
Figura 2.5 - Porta-punções	11
Figura 2.6 - Quinadora de curso ascendente.....	11
Figura 2.7 - Princípio de funcionamento uma mesa bombeada	12
Figura 2.8 - Mesas bombeadas: a) Com volante b); Com sistema CNC.....	12
Figura 2.9 - Quinadora RIFINDUS com bombeado hidráulico	13
Figura 2.10 - Sistema com mesa bombeada hidraulicamente	13
Figura 2.11 - Sistema de bombeado imposto de uma quinadora.....	14
Figura 2.12 - Método de quinagem em três pontos	14
Figura 2.13 - Montagem de uma quinadora da ADIRA QIH125090.....	15
Figura 2.14 - Deformações típicas dos aventais da quinadora	16
Figura 2.15 - Ideia base para a eliminação da deformação num avental móvel.....	17
Figura 2.16 - Sistema hidráulico para a compensação de deformações da quinadora	18
Figura 2.17 - Modelo base de quinadora para o desenvolvimento de um sistema de compensação de deformações (cotas em mm)	19
Figura 3.1 - Elemento tetraédrico de 4 nós.....	21
Figura 3.2 - Modelos exemplificativos gerados pelo Comos sem refinamento e com refinamento automático por parte do software	21
Figura 3.3 - Guiamento do avental móvel	22

Figura 3.4 - Representação da carga de quinagem, pressão no interior do rasgo e condições de fronteira no avental móvel.....	23
Figura 3.5 - Avental móvel da modelação preliminar 1 com rasgo de pressão hidráulica (cotas em mm).....	24
Figura 3.6 - Malha de elementos finitos do avental móvel da modelação preliminar 1.....	24
Figura 3.7 - Deslocamentos máximos e mínimos em zz em relação ao comprimento de quinagem na modelação preliminar 1.....	25
Figura 3.8 - Deslocamentos em zz da modelação preliminar 1 para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m	26
Figura 3.9 - Tensões máximas de Von Mises no avental da modelação preliminar 1 para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m	26
Figura 3.10 - Avental móvel da modelação preliminar 2 com rasgo de pressão hidráulica (cotas em mm).....	27
Figura 3.11 - Malha de elementos finitos do avental móvel para a modelação preliminar 2 .	27
Figura 3.12 - Deslocamentos máximos e mínimos em zz em relação ao comprimento de quinagem na modelação preliminar 2	28
Figura 3.13 - Deslocamentos em zz da modelação preliminar 2, para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m.....	29
Figura 3.14 - Tensões máximas de Von Mises no avental da modelação preliminar 2 para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m.....	29
Figura 3.15 - Avental móvel da modelação preliminar 3 com rasgo de pressão hidráulica (cotas em mm).....	30
Figura 3.16 - Malha de elementos finitos do avental móvel da modelação preliminar 3	30
Figura 3.17 - Deslocamentos máximos e mínimos em zz em relação ao comprimento de quinagem na modelação preliminar 3	31
Figura 3.18 - Deslocamentos em zz da modelação preliminar 3 para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m.....	32
Figura 3.19 - Tensões máximas de Von Mises no avental da modelação preliminar 3 para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m.....	32

Figura 3.20 - Avental móvel da modelação preliminar 4 com rasgo de pressão hidráulica (cotas em mm).....	33
Figura 3.21 - Malha de elementos finitos do avental móvel da modelação preliminar 4	33
Figura 3.22 - Deslocamentos máximos e mínimos em zz em relação ao comprimento de quinagem na modelação preliminar 4	34
Figura 3.23 - Deslocamentos em zz da modelação preliminar 4 para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m.....	35
Figura 3.24 - Tensões máximas de Von Mises no avental da modelação preliminar 4 para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m.....	35
Figura 3.25 - Avental móvel da modelação preliminar 5 com rasgo de pressão hidráulica (cotas em mm).....	36
Figura 3.26 - Malha de elementos finitos do avental móvel da modelação preliminar 5	36
Figura 3.27 - Deslocamentos máximos e mínimos em zz em relação ao comprimento de quinagem na modelação preliminar 5.....	37
Figura 3.28 - Deslocamentos em zz da modelação preliminar 5 para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m	38
Figura 3.29 - Tensões máximas de Von Mises no avental da modelação preliminar 5 para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m	38
Figura 3.30 - Malha de elementos finitos do avental móvel da modelação preliminar 4.....	39
Figura 3.31 - Deslocamentos em zz da modelação sem compensação de deformações para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m .	39
Figura 3.32 - Dimensões do avental móvel (cotas em mm)	42
Figura 3.33 - Dimensões do reforço (cotas em mm)	43
Figura 3.34 - Dimensões do avental fixo (cotas em mm).....	43
Figura 3.35 - Avental fixo com carga de quinagem e condições de fronteira representadas ...	44
Figura 3.36 - Malhas de elementos finitos: a) Avental móvel; b) Avental fixo.....	45
Figura 3.37 - Deslocamentos em zz obtidos no avental móvel para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m	45

Figura 3.38 - Deslocamentos em zz obtidos no avental fixo para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m	46
Figura 3.39 - Tensões máximas de Von Mises nos aventais com material de reforço (Aço CK45)	46
Figura 3.40 - Deslocamentos em zz em função do comprimento de quinagem tendo em conta uma carga de 130 toneladas.....	48
Figura 3.41 - Variações de pressão no interior dos rasgos dos aventais	48
Figura 3.42 - Malhas de elementos finitos criadas no Ansys: a) Avental móvel; b) Avental fixo	49
Figura 3.43 - Variação dos deslocamentos em zz no avental móvel em carga máxima para comprimentos de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m.....	50
Figura 3.44 - Deslocamentos do avental móvel sujeitos a carga máxima para comprimentos de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m	50
Figura 3.45 - Variação dos deslocamentos em zz no avental fixo em carga máxima para comprimentos de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m.....	51
Figura 3.46 - Deslocamentos em zz do avental fixo sujeitos a carga máxima para comprimentos de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m.....	51
Figura 3.47 - Tensões máximas de Von Mises nos aventais da quinadora obtidas no Ansys ..	52
Figura 3.48 - Elementos da quinadora usados na modelação em Cosmos	54
Figura 3.49 - Condições de fronteira usadas para a modelação em Cosmos.....	55
Figura 3.50 - Condições de fronteira entre elementos da guiagem do avental móvel.....	55
Figura 3.51 - Malha de elementos finitos da quinadora usada na modelação em Cosmos	56
Figura 3.52 - Deslocamentos em zz na quinadora para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m (Factor de ampliação das deformações = 172,77×).....	58
Figura 3.53 - Novas condições de fronteira para o avental fixo.....	60
Figura 3.54 - Zona de tensões superiores a 265MPa na quinadora, para uma carga de quinagem de 130 toneladas distribuída em 1,3m	63
Figura 3.55 - Deslocamentos em zz na quinadora para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m (Factor de ampliação das deformações = 145,54×).....	63

Figura 3.56 - Deslocamentos em zz em função do comprimento de quinagem para cargas de 130 toneladas	64
Figura 3.57 - Variação da pressão no interior dos rasgos dos aventais em função do comprimento de quinagem para cargas de 130 toneladas	64
Figura 3.58 - Geometria final do avental móvel (Cotas em mm).....	65
Figura 3.59 - Geometria final do avental fixo (Cotas em mm)	65
Figura 3.60 - Malha de elementos finitos da modelação da quinadora.....	66
Figura 3.61 - Deslocamentos em zz na quinadora para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m (Factor de ampliação das deformações = 215,96×)	68
Figura 3.62 - Zona de tensões superiores a 160MPa no reforço do avental fixo, para uma carga de quinagem de 130 toneladas distribuída em 1,3m	69
Figura 3.63 - Deslocamentos em zz em função do comprimento de quinagem tendo em conta uma carga de 130 toneladas	69
Figura 3.64 - Variação da pressão no interior dos rasgos dos aventais em relação aos comprimentos de quinagem em carga máxima.....	70
Figura 3.65 - Diferenças entre os modelos efectuados das quinadoras	71
Figura 3.66 - Malha de elementos finitos para um comprimento de quinagem de 1,3m.....	72
Figura 3.67 - Deslocamentos em zz para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m: a) Na estrutura da quinadora (Factor de ampliação das deformações = 262,511×); b) Na linha de contacto do punção com a matriz.....	73
Figura 3.68 - Deslocamentos em zz para uma carga de 130 toneladas distribuída em 3m: a) Na estrutura da quinadora (Factor de ampliação das deformações = 258,439×); b) Na linha de contacto do punção com a matriz.....	73
Figura 3.69 - Tensões máximas de Von Mises superiores a 160MPa na modelação da quinadora com ferramentas de quinagem para uma carga máxima distribuída em 1,3m.....	74
Figura 3.70 - Deslocamentos em zz em função do comprimento de quinagem tendo em conta uma carga de 130 toneladas	74
Figura 3.71 - Tensões verificadas nos montantes: a) Modelação 3; b) Modelo da quinadora com ferramentas de quinagem incluídas; c) Montante isolado.....	75

Figura 4.1 - Variação angular de uma chapa	77
Figura 4.2 - Flechas máximas obtidas com as modelações da quinadora	85
Figura 4.3 - Tensões máximas de Von Mises obtidas no avental fixo dos modelos da quinadora	85

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Material usado no Cosmos	23
Tabela 3.2 - Resumo dos deslocamentos em zz de uma carga de 100 toneladas da modelação preliminar 1	25
Tabela 3.3 - Resumo dos deslocamentos em zz para cargas de 130 toneladas da modelação preliminar 1	25
Tabela 3.4 - Resumo dos deslocamentos em zz de uma carga de 100 toneladas da modelação preliminar 2	28
Tabela 3.5 - Resumo dos deslocamentos em zz para cargas de 130 toneladas da modelação preliminar 2	28
Tabela 3.6 - Resumo dos deslocamentos em zz de uma carga de 100 toneladas da modelação preliminar 3	31
Tabela 3.7 - Resumo dos deslocamentos em zz para cargas de 130 toneladas da modelação preliminar 3	31
Tabela 3.8 - Resumo dos deslocamentos em zz de uma carga de 100 toneladas da modelação preliminar 4	34
Tabela 3.9 - Resumo dos deslocamentos em zz para cargas de 130 toneladas da modelação preliminar 4	34
Tabela 3.10 - Resumo dos deslocamentos em zz de uma carga de 100 toneladas da modelação preliminar 5	37
Tabela 3.11 - Resumo dos deslocamentos em zz para cargas de 130 toneladas da modelação preliminar 5	37
Tabela 3.12 - Deslocamentos em zz para cargas de 130 toneladas da modelação sem compensação de deformações.....	40
Tabela 3.13 - Comparação da variação máxima dos deslocamentos em zz para o avental móvel sem compensação de deformações relativamente ao avental móvel da modelação preliminar 5	40
Tabela 3.14 - Deslocamentos em zz em cada modelo preliminar desenvolvido para uma carga de quinagem de 130 toneladas distribuída em 3m	41

Tabela 3.15 - Tensões máximas de Von Mises verificadas em cada modelo preliminar desenvolvido para uma carga de quinagem de 130 toneladas distribuída em 1,3m	41
Tabela 3.16 - Características mecânicas do material do reforço	43
Tabela 3.17 - Resultados obtidos para uma carga de 100 toneladas no avental móvel.....	47
Tabela 3.18 - Resultados obtidos para cargas de 130 toneladas no avental móvel	47
Tabela 3.19 - Resultados obtidos para uma carga de 100 toneladas no avental fixo	47
Tabela 3.20 - Resultados obtidos para cargas de 130 toneladas no avental fixo.....	47
Tabela 3.21 - Resumo dos deslocamentos e tensões máximas obtidas no Ansys.....	52
Tabela 3.22 - Resumo dos deslocamentos e tensões máximas obtidas no Cosmos.....	52
Tabela 3.23 - Erros dos deslocamentos em zz dos modelos efectuados no Cosmos	53
Tabela 3.24 - Resultados obtidos no avental móvel para uma carga de 100 toneladas.....	57
Tabela 3.25 - Resultados obtidos no avental móvel para cargas de 130 toneladas	57
Tabela 3.26 - Resultados obtidos no avental fixo para uma carga de 100 toneladas	57
Tabela 3.27 - Resultados obtidos no avental fixo para cargas de 130 toneladas.....	57
Tabela 3.28 - Comparação dos deslocamentos obtidos em zz através dos modelos da quinadora com os modelos individuais	58
Tabela 3.29 - Comparação dos deslocamentos obtidos em zz através dos modelos da quinadora com os modelos individuais	59
Tabela 3.30 - Resultados obtidos no avental fixo para uma carga de 100 toneladas	60
Tabela 3.31 - Resultados obtidos no avental fixo para cargas de 130 toneladas.....	60
Tabela 3.32 - Resultados obtidos no avental móvel para uma carga de 100 toneladas.....	61
Tabela 3.33 - Resultados obtidos no avental móvel para cargas de 130 toneladas	61
Tabela 3.34 - Resultados obtidos no avental fixo para uma carga de 100 toneladas	61
Tabela 3.35 - Resultados obtidos no avental fixo para cargas de 130 toneladas.....	61
Tabela 3.36 - Comparação dos resultados obtidos através dos modelos individuais dos aventais e a modelação 2 em termos de variação máxima dos deslocamentos em zz.....	62
Tabela 3.37 - Comparação dos resultados obtidos através dos modelos individuais dos aventais e a modelação 2 em termos tensões máximas de Von Mises	62

Tabela 3.38 - Resultados obtidos no avental móvel para uma carga de 100 toneladas.....	67
Tabela 3.39 - Resultados obtidos no avental móvel para cargas de 130 toneladas	67
Tabela 3.40 - Resultados obtidos no avental fixo para uma carga de 100 toneladas	67
Tabela 3.41 - Resultados obtidos no avental fixo para cargas de 130 toneladas.....	67
Tabela 3.42 - Malhas de elementos finitos criadas.....	71
Tabela 3.43 - Resultados obtidos nos aventais para uma carga de 100 toneladas.....	72
Tabela 3.44 - Resultados obtidos nos aventais para cargas de 130 toneladas	72
Tabela 4.1 - Flechas máximas obtidas nos modelos da quinadora.....	84
Tabela 4.2 - Variações angulares de um ângulo de quinagem de 90° em carga máxima para a modelação da quinadora com ferramentas de quinagem.....	86

1 - Introdução

1.1 - A empresa ADIRA S. A.

O presente projecto foi desenvolvido na empresa ADIRA S.A. A empresa foi fundada em 1956 por António Dias Ramos. A sua área de negócio é a concepção, produção e comercialização de máquinas-ferramentas para a conformação e manipulação de chapa.

No início a ADIRA S.A. era apenas uma pequena oficina com cerca de 400m², com quatro trabalhadores, mas depressa se lançou na construção de máquinas-ferramentas, orientando-se, por volta de 1961, para as máquinas para trabalho de chapa com a construção da primeira guilhotina mecânica fabricada em Portugal, seguida em 1964, do fabrico da sua primeira quinadora hidráulica.

Ao longo dos cerca de 50 anos de existência, a ADIRA S.A. foi acumulando uma vasta experiência. O constante investimento na pesquisa científica e desenvolvimento tecnológico, incluindo a cooperação com universidades e importantes laboratórios de pesquisa, mostra o seu empenho para o fornecimento de máquinas de elevado grau de tecnologia, desempenho, qualidade e fiabilidade, apoiado por um eficaz serviço de assistência pós-venda.

Actualmente a empresa ocupa uma área de cerca de 10.000m² constituídos por um pavilhão fabril, um pavilhão reservado à montagem e um edifício para os serviços técnicos e administrativos, assegurando cerca de 200 postos de trabalho.

Um dos factores de sucesso da empresa é não se limitar à venda dos seus produtos. Faz também instalação e assistência dos equipamentos e presta serviços que vão desde a formação dos operadores, técnicos de programação e de manutenção, a instalação de equipamentos de segurança e recondicionamento de equipamentos mais antigos.

Hoje em dia é uma empresa sólida, inovadora com prestígio e qualidade, exportando para mais de meia centena de países. Sendo a 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.

A ADIRA S.A. é também a única empresa ibérica a fazer máquinas de corte por laser para a indústria metalomecânica. 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.

Refira-se que a ADIRA S.A. durante os anos 70 e 80, que foram de grande expansão comercial, criou 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 seu. Com esta marca a ADIRA S.A. procura não perder terreno para os fabricantes de máquinas de menos tecnologia mas com preços inferiores. A marca Guifil procura satisfazer os clientes que procuram máquinas com qualidade, a preços acessíveis e com garantia de assistência técnica.

A ADIRA S.A. é uma empresa apostada na inovação tecnológica. São exemplos recentes dessa aposta o recurso à tecnologia das células robotizadas de quinagem, que consistem na integração de uma quinadora com um robot manipulador de chapa ou o centro de corte laser CCL3015 com sistema automático de carregamento e descarregamento de chapa, sem intervenção de operadores.



(a)



(b)

Figura 1.1 - a) Células robotizadas de quinagem; b) Centro de corte laser com sistema de carregamento e descarregamento automático de chapa CCL 3015

1.2 - Projecto realizado na ADIRA S.A.

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. No processo de quinagem surgem deformações nos aventais das quinadoras responsáveis por uma não correcta dobragem da chapa. Com a existência de deformações nos aventais das quinadoras ocorrem variações da profundidade de penetração do punção na matriz ao longo do comprimento de quinagem. Originando uma chapa dobrada com um ângulo não constante ao longo do seu comprimento. Uma pequena variação da penetração do punção numa matriz pode causar grandes variações no ângulo de dobragem da chapa.

A solução pensada para a correcção da deformação sofrida pelos aventais da quinadora consiste em impor uma contra-carga nos aventais da quinadora que contraria a deformação devida ao esforço de quinagem. Para isso, será criado nos aventais um volume interior em forma de rasgo, com pressão hidráulica, que compensa a deformação sofrida pela carga de quinagem.

O sistema hidráulico que controla a pressão no interior dos rasgos dos aventais, terá a capacidade de auto compensar a deformação sofrida pelos aventais da quinadora, sem necessidade de perdas de tempo na produção, devido à compensação de deformações ser automática, sem necessidade de ajustamentos de parâmetros de quinagem.

1.3 - Desenvolvimento do projecto na ADIRA S.A.

Para o desenvolvimento do projecto na empresa foi necessário uma aprendizagem inicial sobre o processo de quinagem e o tipo de quinadoras projectadas na empresa. Para tal, foi disponibilizada literatura sobre o assunto e foram efectuadas visitas à zona da fábrica onde se procede à montagem e teste das máquinas. Depois de uma abordagem inicial ao processo de quinagem, foi feita uma pesquisa sobre o tipo de soluções existentes no mercado para a compensação de deformações nas quinadoras, foram recolhidas informações sobre o assunto, e estudadas as soluções existentes. O interesse desta pesquisa consiste não só um aprofundamento do conhecimento sobre o assunto em causa, mas também a verificação sobre a possível existência de uma solução semelhante a idealizada para este projecto.

No estudo desenvolvido foi necessária a utilização de ferramentas de trabalho disponíveis na empresa, como o Solid Edge, Cosmos e Mathcad e foi, também, utilizado o software Ansys disponível na FEUP.

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.

1.4 - Organização e temas abordados no presente relatório

O presente estudo é constituído por cinco capítulos. O capítulo 1 serve, principalmente, para descrever o contexto do projecto realizado. É, também, descrita a empresa onde decorreu o estágio e feita uma apresentação da organização dos temas abordados no trabalho.

No capítulo 2, é descrito o processo de quinagem de chapa, é também apresentado o estado do conhecimento em relação aos sistemas de compensação de deformações existentes em quinadoras, explicando quais as suas principais limitações. Existe também uma parte reservada no capítulo para a apresentação do sistema idealizado, onde é explicado o seu modo de funcionamento.

O capítulo 3 é dedicado à apresentação da evolução do trabalho em elementos finitos. O subcapítulo 3.1 começa com a descrição do tipo de malha de elementos finitos usado nos modelos efectuados, passando-se depois, no subcapítulo 3.2, à descrição dos modelos preliminares realizados na tentativa de encontrar de uma solução que permita obter baixos deslocamentos nos aventais da quinadora.

No subcapítulo 3.3, é dada uma solução para os aventais da quinadora de modo a obter uma eficiente compensação de deformações de quinagem. É, também, apresentada uma solução com vista a tentar garantir a segurança estrutural da quinadora devido à obtenção de tensões elevadas nos modelos preliminares efectuados. No capítulo 3.4, é realizada uma validação do trabalho desenvolvido, através do modelador de elementos finitos Ansys.

No subcapítulo 3.5 é feita a modelação em elementos finitos da quinadora através das soluções encontradas para os modelos individuais dos aventais. Conclui-se, neste capítulo, que foram tomadas algumas considerações não muito correctas em termos de condições de fronteira nos modelos individuais dos aventais, que influenciam a obtenção de tensões elevadas nos extremos dos rasgos dos aventais. No final do capítulo é apresentada uma solução para os aventais da quinadora, que permite compensar as deformações de quinagem e garante a segurança estrutural da quinadora. A solução proposta neste capítulo é o culminar dos modelos desenvolvidos, que passou por efectuar alterações às geometrias dos rasgos de modo a diminuir as tensões nos seus extremos e garantir, ao mesmo tempo, uma eficiente compensação de deformações de quinagem.

A partir dos resultados obtidos no capítulo 3, é feita uma abordagem teórica no capítulo 4, de modo a obter as variações angulares de chapas quinadas com um sistema de compensação semelhante ao desenvolvido neste trabalho. Neste capítulo é feita também uma comparação

das modelações efectuadas para a compensação de deformações.

No capítulo 5, abordam-se as principais conclusões do trabalho realizado e, também, são apresentadas perspectivas de trabalhos futuros com base no projecto realizado.

2 - Processo de quinagem

O presente estudo incide sobre uma técnica de quinagem designada por quinagem livre ou “quinagem no ar”. Na quinagem livre só se utiliza o efeito de flexão plástica simples, o processo consiste na dobragem duma chapa pela penetração de um punção na matriz (Bessa Pacheco, 1992), como mostra a Figura 2.1.

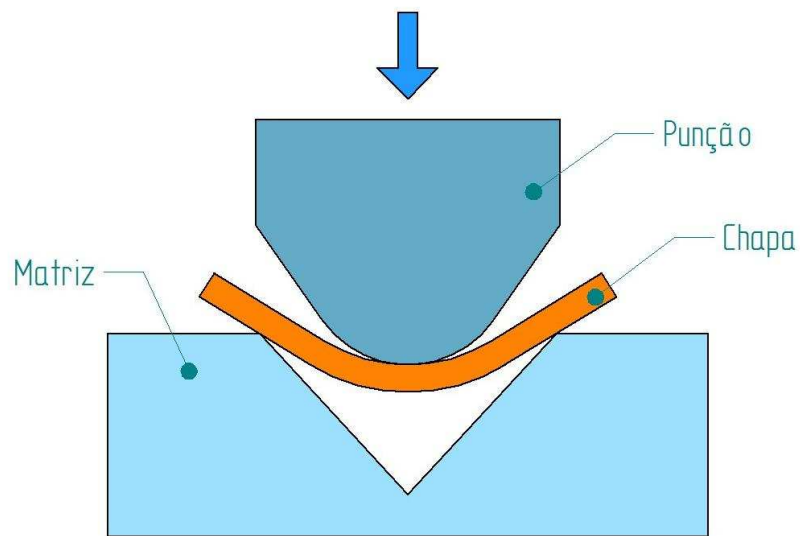


Figura 2.1 - Quinagem de uma chapa

Durante o processo de quinagem surgem deformações na estrutura das quinadoras que são responsáveis por pequenas variações da profundidade de penetração do punção na matriz, o que causa grandes variações angulares na chapa quinada. Com a variação de profundidade de penetração ao longo do comprimento da chapa, irá haver variações do ângulo de quinagem da chapa ao longo do seu comprimento, o que torna a chapa dobrada numa peça sem qualidade dimensional. Os parâmetros a controlar, para se obter o ângulo de quinagem pretendido, são o grau de penetração do punção na matriz e o valor de abertura da matriz ("vê" da matriz), para uma determinada espessura e material da chapa.

Uma variação da penetração do punção na chapa a dobrar de 0,05mm, pode causar variações de 1° no ângulo de quinagem, para uma chapa de aço RSt33 com 10mm de "vê". Torna-se, portanto, necessária uma elevada precisão da penetração do punção na chapa, e uma quase total eliminação da deformação provocada pela flexão dos aventais devido ao esforço de dobragem da chapa.

Neste contexto, para melhorar o processo de quinagem, é pertinente desenvolver uma solução que permita a compensação de deformação numa quinadora durante o processo de quinagem de chapas, garantindo um ângulo de dobragem constante ao longo de toda a peça. E, assim, minimizar um dos defeitos frequentes associados a este processo de conformação.

2.1 - Evolução das quinadoras

O aparecimento dos computadores, associado a uma aposta na investigação e desenvolvimento, fez com que as quinadoras dessem um importante “salto” tecnológico. A utilização de comandos numéricos computadorizados (CNC) associado a sistemas de localização de chapa e de posicionamento de paragem da quinadora, que contribuem para um rigoroso controlo dos parâmetros de quinagem, fez com que as quinadoras sejam hoje máquinas extremamente precisas e flexíveis.

No final dos anos 80, as quinadoras para além das funções básicas de controlo da posição do esbarro posterior (eixo x), e da profundidade de quinagem (eixo y) para a obtenção do ângulo de quinagem pretendido, tinham as seguintes características:

- Programação do ângulo de quinagem desejado, com o cálculo, pela máquina, da profundidade de quinagem necessária, tendo em conta as características da chapa e das ferramentas a usar;
- Programação da velocidade aconselhável para cada operação de quinagem;
- Cálculo e regulação das capacidades da máquina necessárias para o trabalho pretendido;
- Programação do curso de quinagem (apenas o curso mínimo necessário);
- Cálculo automático dos pontos importantes do curso de quinagem;
- Controlo dos tempos de trabalho da quinadora;
- Etc.

Dado o elevado número de características associadas às máquinas, o seu custo de produção tornou-se demasiado elevado, o que fez com que o preço final das máquinas também fosse pouco atractivo. A partir desse momento, a indústria de quinadoras fez intenso trabalho de investigação e desenvolvimento em áreas da hidráulica e comandos numéricos computadorizados na tentativa de reduzir o custo final da máquina (Bessa Pacheco, 1992).

As empresas, hoje em dia, procuram, cada vez mais, um elevado grau de actualização tecnológica e flexibilidade das suas máquinas. Os construtores de quinadoras deparam-se com os seguintes problemas fundamentais:

- Manter o paralelismo entre a mesa e o avental durante a operação de quinagem, que é garantia de um ângulo idêntico nas duas extremidades da quinadora;
- Paragem com grande precisão e repetibilidade do avental móvel, que é fundamental para a obtenção do ângulo de quinagem pretendido de forma repetida;
- Correção das deformações da máquina durante a quinagem, para que o ângulo de quinagem seja constante ao longo da peça.

A compensação de deformações nas quinadoras é uma das grandes preocupações dos construtores deste tipo de máquinas e é alvo de desenvolvimento constante, na tentativa de resolver este problema.

A Figura 2.2 ilustra um exemplo de uma quinadora fabricada pela ADIRA S.A. para grandes comprimentos de chapa.



Figura 2.2 - Quinadora hidráulica QIH125090 para grandes comprimentos e fortes espessuras fabricada pela ADIRA

Na Figura 2.3 podemos ver os principais componentes de uma quinadora moderna:



Figura 2.3 - Quinadora hidráulica QIHD11030 fabricada pela ADIRA

2.2 - Tipos de sistemas de compensação de deformações existentes em quinadoras

Se uma quinadora não tiver qualquer tipo de correcção de deformações dos aventais, a chapa por ela dobrada terá um ângulo maior a meio do seu comprimento do que nos seus extremos. Será necessário manter o paralelismo entre o punção e a matriz da quinadora ao longo do comprimento de quinagem, para que o ângulo se mantenha constante. Podemos ver na Figura 2.4 a representação de uma chapa dobrada por uma quinadora sem correcção de deformações.

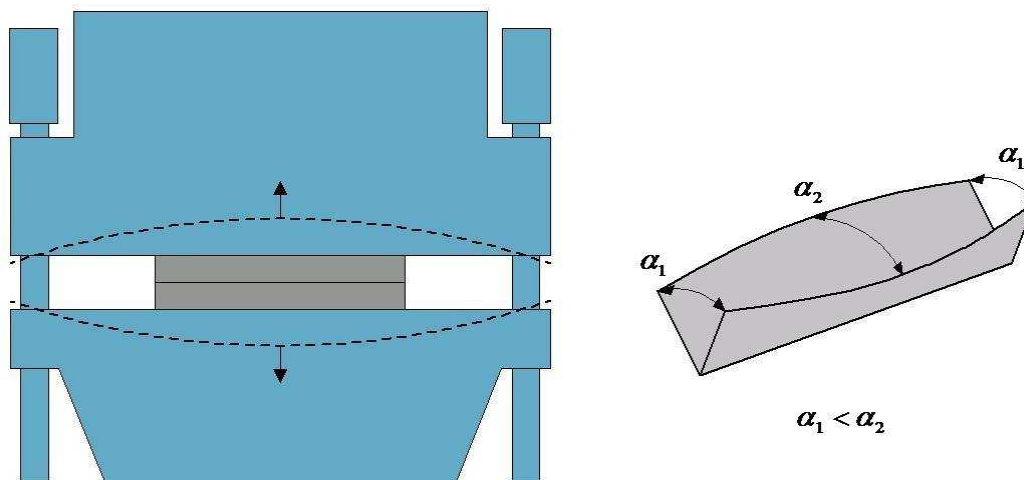


Figura 2.4 - Quinagem sem correcção de deformação

A técnica mais comum de compensação de deformações consiste em colocar intermediários especiais entre o avental móvel e o punção, designados por porta-punções (Bessa Pacheco, 1992). Os porta-punções podem ter a sua altura ajustada ao longo do comprimento da quinadora, através de cunhas, compensando assim a deformação da máquina durante a quinagem através de uma deformação imposta (bombeado) pela variação de altura dos porta-punções.

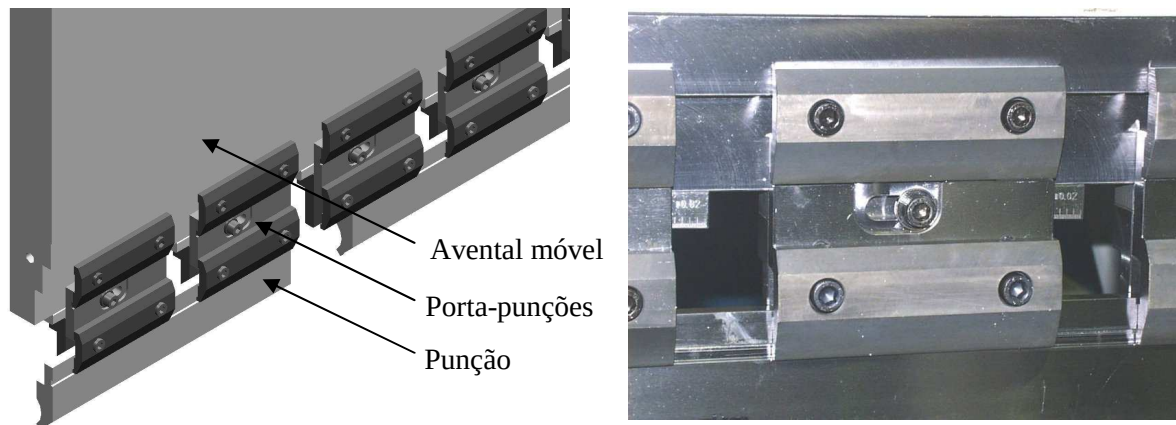


Figura 2.5 - Porta-punções

Existe um tipo de quinadoras em que o avental móvel é de curso ascendente. Estas têm os cilindros no centro do avental móvel. Este cilindro assegura um paralelismo entre o avental móvel e o fixo, fazendo o ângulo de quinagem da chapa seja constante ao longo do comprimento (Bessa Pacheco, 1992).

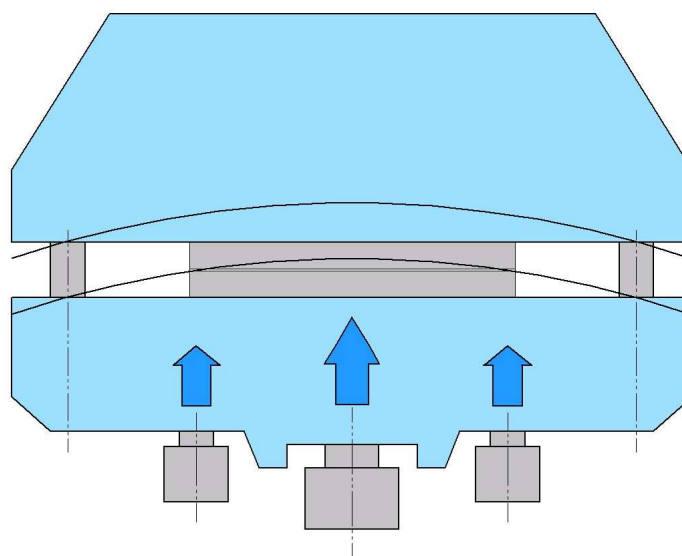


Figura 2.6 - Quinadora de curso ascendente

Um dos sistemas mais comuns de compensação de deformações, é impor uma contra deformação, através de um sistema de cunhas integradas na mesa onde assenta a matriz, que pela acção de um volante associado a um contador ou um motor associado a um CNC, assumem uma deformação progressiva que compensa a deformação relativa entre aventais. Este sistema é normalmente designado por mesa bombeada. O princípio de elevação da mesa através de cunhas esta exemplificado na Figura 2.7.

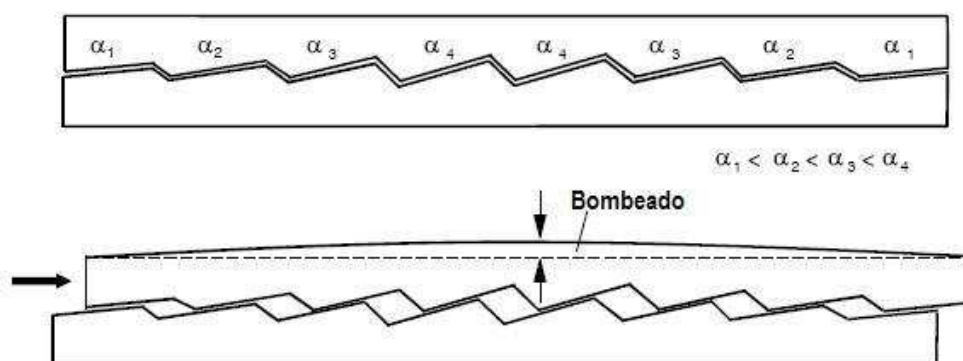


Figura 2.7 - Princípio de funcionamento uma mesa bombeada

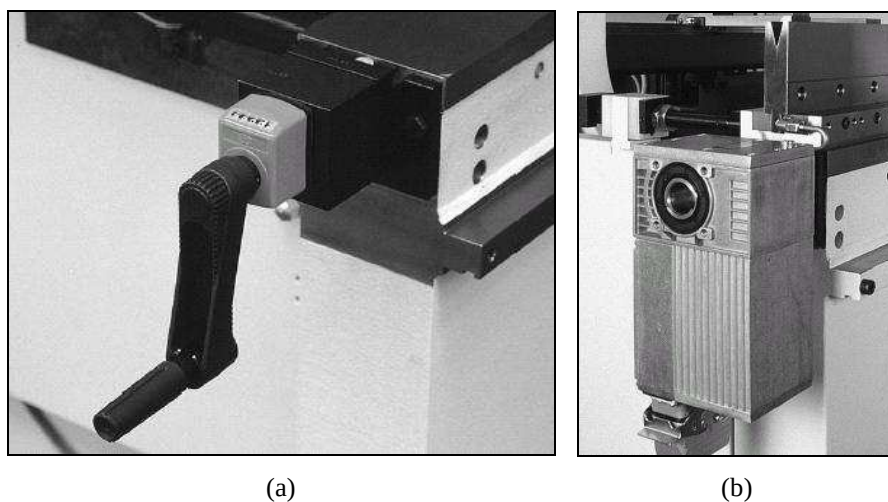


Figura 2.8 - Mesas bombeadas: a) Com volante b); Com sistema CNC

Um sistema de compensação de deformações idêntico a mesa bombeada, é o sistema hidráulico desenvolvido pela já extinta marca italiana de quinadoras RIFINDUS. O sistema baseia-se numa mesa bombeada que ao invés de utilizar um sistema de cunhas para se deformar, utiliza um conjunto de cilindros hidráulicos no seu interior dispostos em todo o comprimento de quinagem (Figura 2.10). Estes, ao serem actuados hidraulicamente impõem um bombeado que corrige a deformação sofrida pelos aventais durante a quinagem (RIFINDUS, 1974).

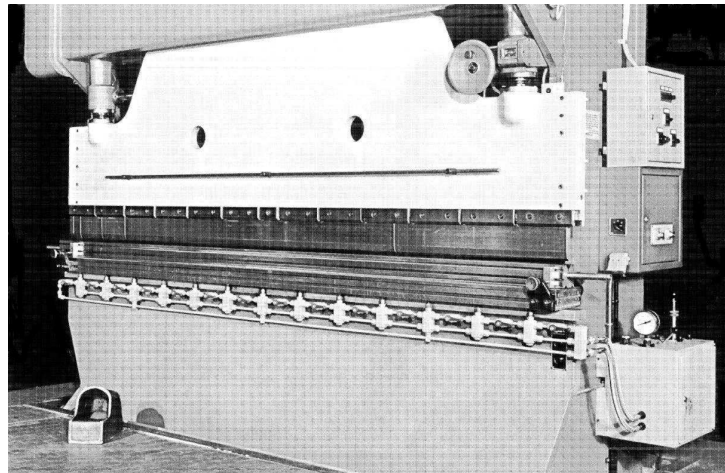


Figura 2.9 - Quinadora RIFINDUS com bombeado hidráulico

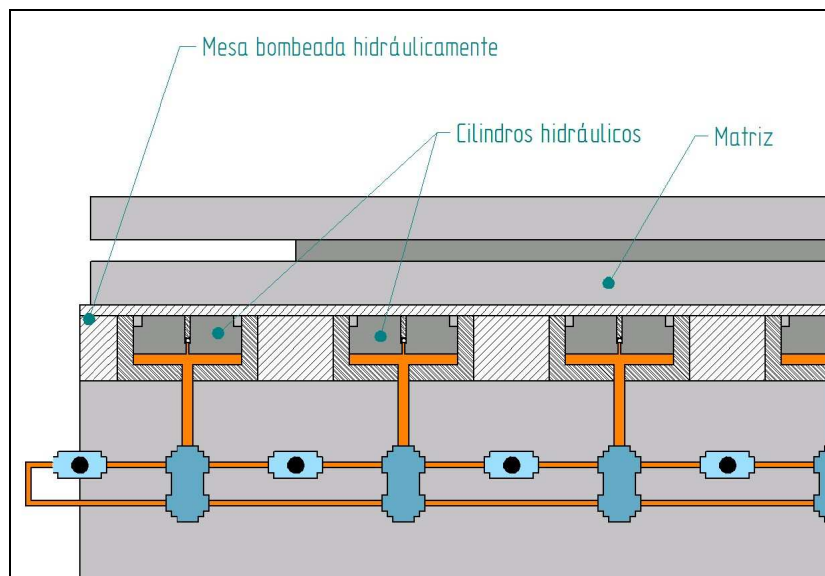


Figura 2.10 - Sistema com mesa bombeada hidraulicamente

Outra técnica usada por alguns construtores, é a utilização de cilindros hidráulicos ligados ao avental fixo que recebem apoio em duas placas, provocando um bombeado imposto no avental (Figura 2.11). O bombeado, por sua vez, é controlado por uma válvula hidráulica que impõe a pressão necessária para manter o paralelismo entre os aventais.

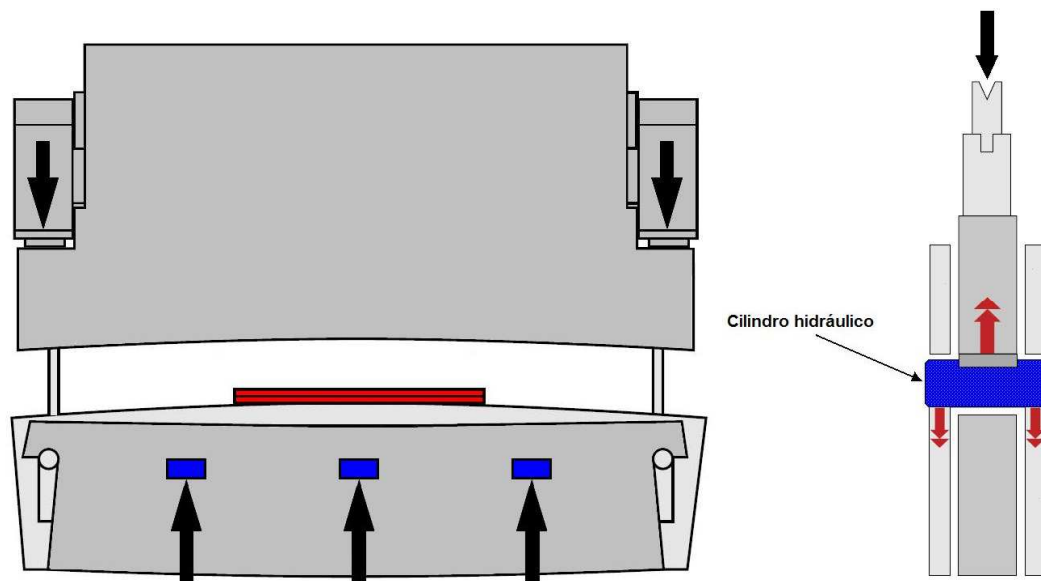


Figura 2.11 - Sistema de bombeado imposto de uma quinadora

Um método de quinagem que garante resultados muito precisos, é o método de quinagem em três pontos. Este método encontra-se patenteado pela firma HÄMMERLE ZOFINGEN. O método consiste em fazer penetrar um punção suspenso por uma almofada hidráulica numa chapa. A dobra da chapa é controlada por um conjunto de batentes ajustáveis na matriz. A chapa apoia nas duas arestas interiores da matriz. O terceiro ponto de apoio é definido pelo batente ajustável que controla o ângulo de quinagem da chapa. Podemos ver o princípio de funcionamento deste método na Figura 2.12.

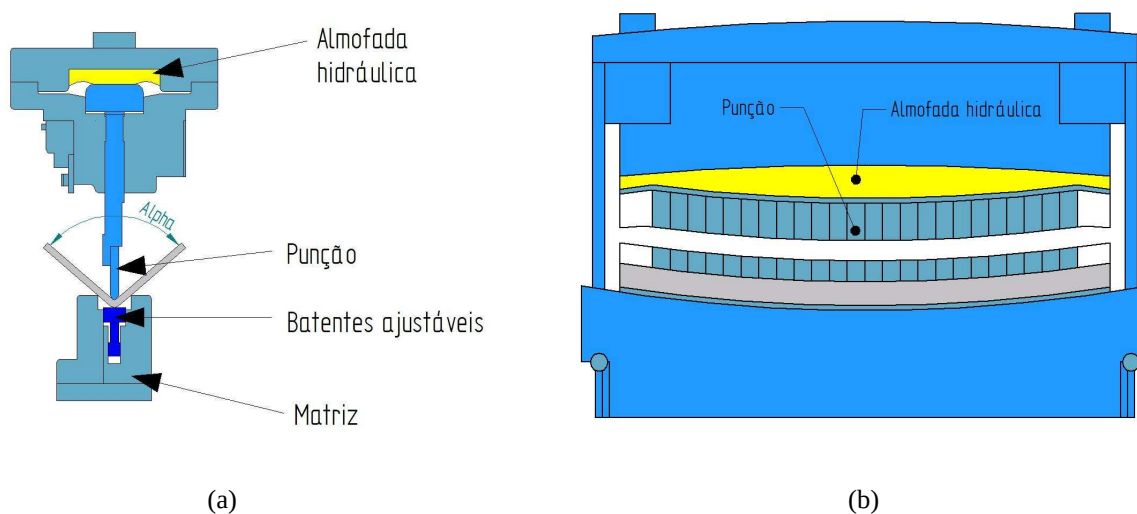


Figura 2.12 - Método de quinagem em três pontos

O punção da quinadora é constituído por um conjunto de pequenas fracções suspensas hidraulicamente, que asseguram uma distribuição uniforme da força de quinagem ao longo da aresta de quinagem, garantindo, também, um ângulo de quinagem constante. A Figura 2.12 (b) demonstra como é mantida a profundidade de penetração do punção ao longo do comprimento de quinagem devido à deformação da almofada hidráulica.

Esta técnica reduz grandemente a influência da espessura da chapa e das deformações dos aventais, assegurando resultados muito precisos. O principal inconveniente desta técnica é que a quinadora tem um grau de complexidade elevado, o que torna o processo extremamente dispendioso e difícil de rentabilizar. Esta metodologia só se utiliza em peças que exijam grande precisão e com grande número de quinagens.

Existe uma técnica de compensação de deformações utilizada em quinadoras de grandes dimensões. A técnica consiste num aumento de altura do avental fixo à custa da utilização de um fosso no chão para que a quinadora possa ser instalada (Figura 2.13). O aumento da altura confere maior inércia ao avental, fazendo com que este se deforme menos durante a quinagem. Esta técnica não resolve por si só o problema de deformações na estrutura da quinadora. Dependendo da precisão requerida, pode estar associada a outro sistema de correcção de deformações. Na Figura 2.13 é possível observar a montagem de uma quinadora da ADIRA QIH125090, em que cada avental deste modelo de quinadoras pesa cerca de 35 toneladas.



Figura 2.13 - Montagem de uma quinadora da ADIRA QIH125090

2.3 - Limitações dos sistemas de compensação de deformações existentes

Os sistemas correntes de correcção de deformações permitem obter resultados muito precisos, normalmente na ordem das centésimas de milímetro em termos de deslocamentos ao longo do comprimento de quinagem. No entanto, existem alguns inconvenientes nos processos existentes. Um dos problemas de maior dificuldade de resolução, é que a correcção de deformações é localizada num dos aventais com valor semelhante à deformação do avental oposto de modo a que haja paralelismo entre os dois. Isto implica que o ângulo de quinagem se mantenha constante ao longo do comprimento de quinagem, mas que a chapa não fique linear ao longo do seu comprimento. A Figura 2.14 mostra a deformação típica dos aventais da quinadora. Normalmente refere-se que, neste tipo de sistema de correcção, um avental "copia" a deformação do outro.

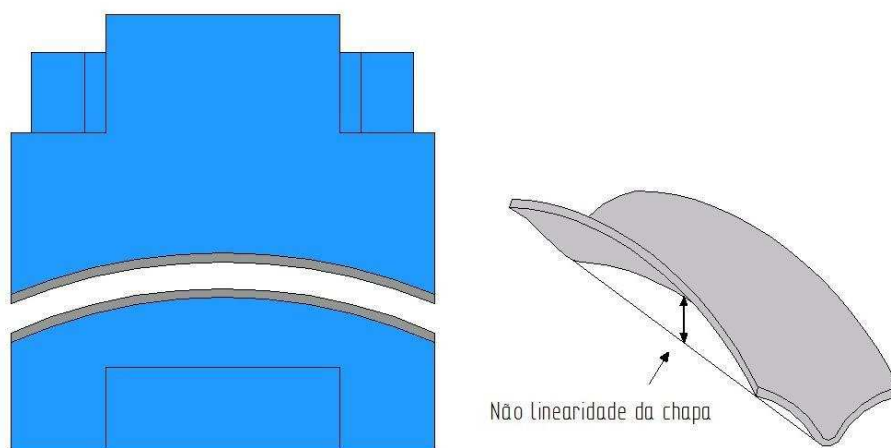


Figura 2.14 - Deformações típicas dos aventais da quinadora

Outro problema dos sistemas de correcção existentes é que a primeira peça produzida de uma série de quinagens a efectuar é quase sempre inutilizável. Isto ocorre porque é necessária a introdução de algumas informações sobre a quinagem a efectuar na máquina (parâmetros de quinagem), mas esta informação apenas serve para o sistema CNC fazer uma estimativa de qual será a força de quinagem necessária e o bombeado a introduzir para se efectuar a quinagem correcta pretendida. Existem sempre erros associados ao valor das características do tipo de material da chapa e erros introduzidos na programação da própria quinadora. Depois de uma quinagem inicial e de obtidos os desvios em relação aos valores de quinagem pretendidos, o sistema CNC recalcula novamente como efectuar a quinagem correcta com base nos desvios obtidos. A chapa utilizada na quinagem inicial fica quase sempre inutilizável para outra quinagem. Este processo exige também uma certa qualificação do operador da

máquina, e algumas perdas de tempo na produção, pois cada quinagem diferente que se efectuar necessita de uma nova preparação da máquina para que a quinagem seja efectuada.

Por fim, outro dos problemas dos sistemas de correcção, é o seu custo elevado. O custo adicional de uma quinadora com sistema de mesa bombeada com comando CNC é de 5000 a 8000 euros para máquinas mais correntes.

2.4 - Método de compensação de deformações desenvolvido

A solução pensada para a correcção da deformação sofrida pelos aventais da quinadora consiste em impor uma contra-carga nos aventais que contraria a deformação devida ao esforço de quinagem. Para isso, será criado nos aventais um volume interior em forma de rasgo com pressão hidráulica interna, que tenta compensar a deformação sofrida. A Figura 2.15 tenta reproduzir a ideia base para o desenvolvimento do modelo.

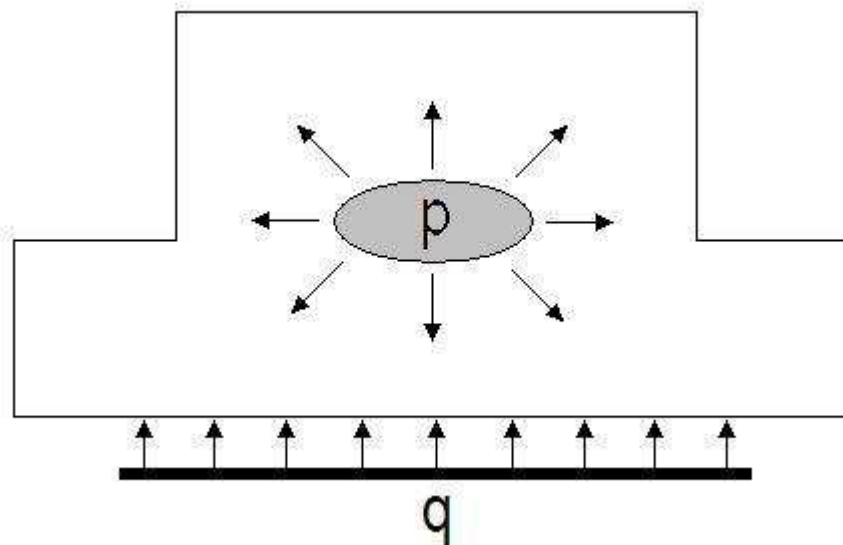


Figura 2.15 - Ideia base para a eliminação da deformação num avental móvel

É com base nesta figura que será estudada a melhor forma de eliminar as deformações nos aventais da quinadora. A solução ideal será aquela em que o rasgo com pressão hidráulica interna tenha uma forma tal, que consiga corrigir as deformações durante a quinagem para os vários comprimentos de chapa a quinar.

O sistema hidráulico que controla a pressão do óleo no interior do rasgo dos aventais, terá a capacidade de auto compensar a deformação sofrida pelos aventais da quinadora, através do ajuste da pressão necessária, para a manutenção do paralelismo dos aventais.

Na Figura 2.16 temos a representação do sistema hidráulico idealizado para a quinadora. O controlo da pressão dos rasgos é feito através de um estrangulador variável, regulado por uma alavanca ligada ao avental fixo. Quando este se deforma, o estrangulador é accionado pela alavanca, aumentando a pressão nos rasgos dos aventais da quinadora. No sistema hidráulico existe um diferencial de pressão entre o rasgo do avental fixo e do móvel, gerada através de uma válvula de contrapressão relativa. A existência desta válvula no circuito hidráulico está dependente da necessidade, ou não, de pressões hidráulicas diferentes nos rasgos dos aventais da quinadora.

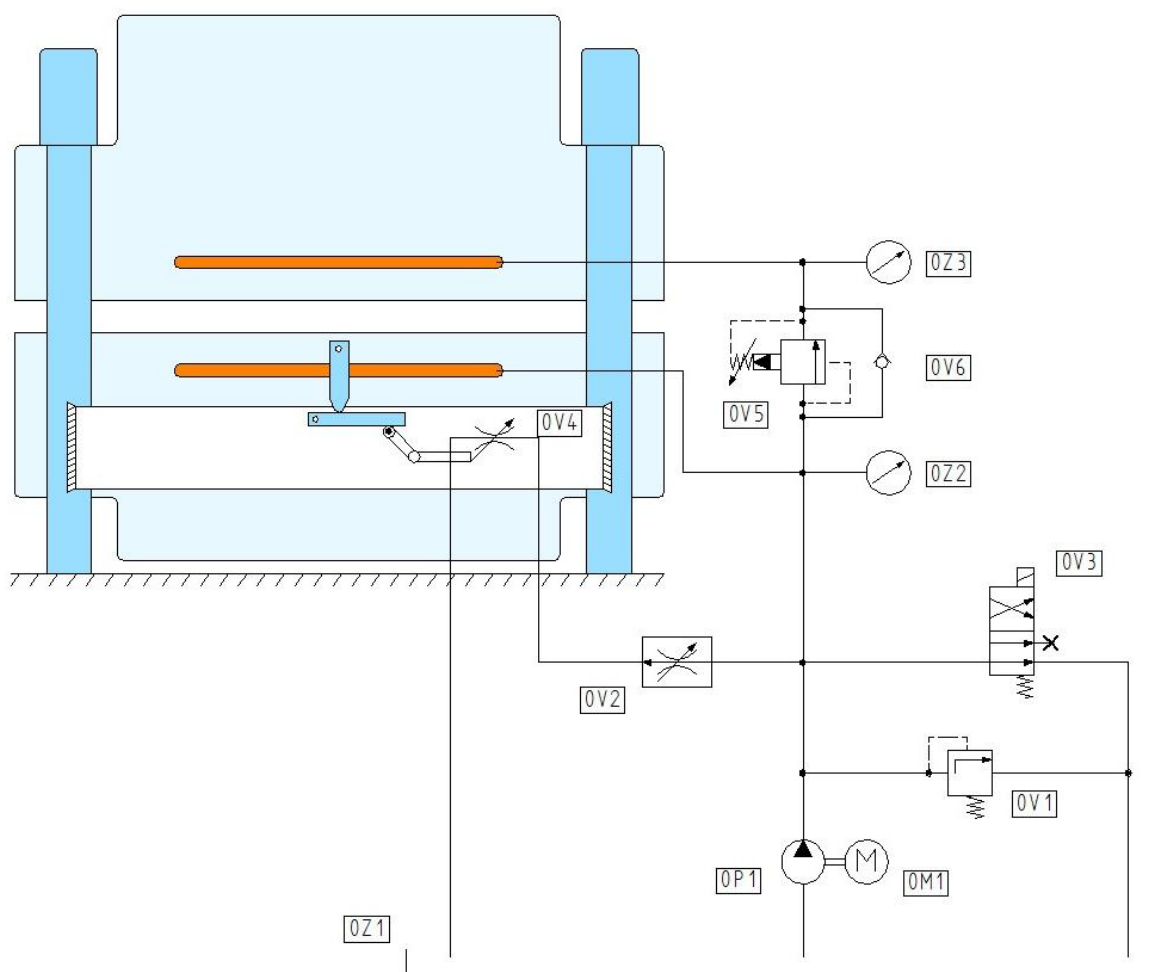


Figura 2.16 - Sistema hidráulico para a compensação de deformações da quinadora

Uma das necessidades importantes que o comportamento dos aventais deve ter para o funcionamento da quinadora, é de que as pressões necessárias para a correcção das deformações da quinadora tenham um diferencial constante, ou pressões iguais, para diferentes comprimentos de quinagem a efectuar. Como a pressão no sistema hidráulico é controlada pela deformação do avental fixo, a correcção do avental móvel fica dependente da pressão necessária na correcção do avental fixo.

Outro ponto importante a salientar, é que a pressão no rasgo do avental móvel necessária à correcção das deformações não seja superior à pressão do rasgo do avental fixo, pois o sistema hidráulico concebido não permite introduzir uma pressão no avental móvel superior à do fixo.

A função da válvula reguladora de caudal de 2 orifícios visível na Figura 2.17, é a de gerar uma pré-carga muito baixa no circuito hidráulico, para que os rasgos dos aventais estejam com os seus volumes interiores completamente preenchidos por óleo.

Para o estudo dos rasgos de pressão hidráulica que os aventais da quinadora deverão ter para permitir compensar deformações durante a quinagem, foi necessário tomar em consideração um modelo base inicial para a configuração da quinadora onde se vai introduzir o sistema de compensação de deformações. O modelo inicial escolhido para o estudo a efectuar é baseado no modelo de quinadoras QIHF11030 da marca ADIRA. As dimensões base que a quinadora deverá ter são as apresentadas na Figura 2.17. A quinadora a desenvolver deverá possibilitar a quinagem de chapas até 3m de comprimento, com uma carga máxima de quinagem de 130 toneladas, fazendo cada cilindro hidráulico 65 toneladas. Por questões de segurança a carga de quinagem nunca deverá ser superior a 100 toneladas por metro.

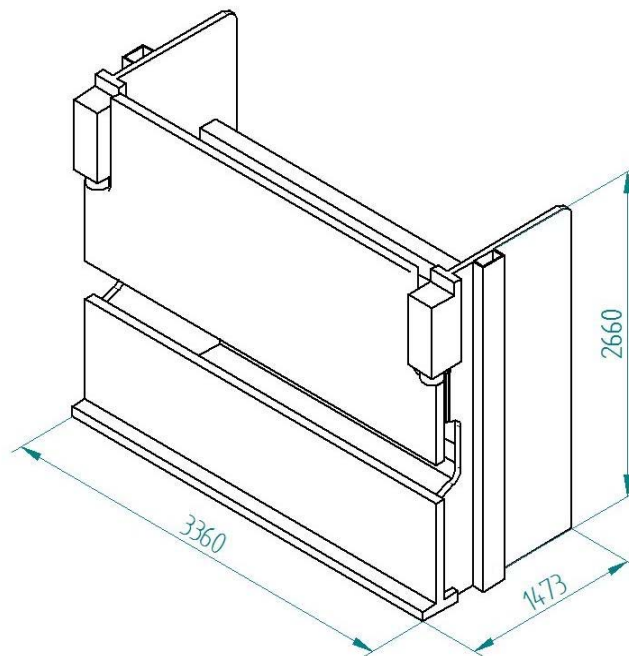


Figura 2.17 - Modelo base de quinadora para o desenvolvimento de um sistema de compensação de deformações (cotas em mm)

3 - Modelos desenvolvidos

3.1 - Tipo de malha de elementos finitos usada nos modelos

Nas modelações efectuadas foram usados elementos de malha tetraédricos de 4 nós (Figura 3.1). A dimensão sugerida pelo Cosmos para o elemento e adoptada neste trabalho foi de 60mm para cada lado, com uma tolerância de 3mm. Foi também usada uma opção do Cosmos chamada "automatic transition" que permite um refinamento automático por parte do software de zonas de concentração de tensões, como furos, rasgos e arestas. Na Figura 3.2 podemos verificar a diferença entre um modelo sem refinamento e com refinamento automático.

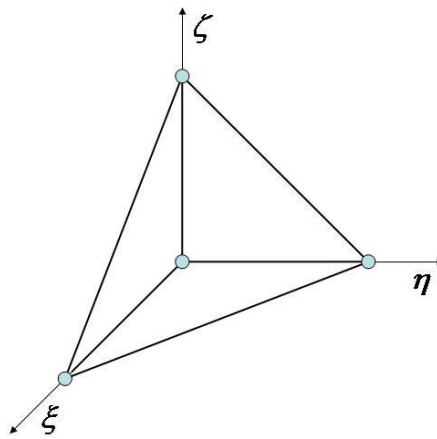
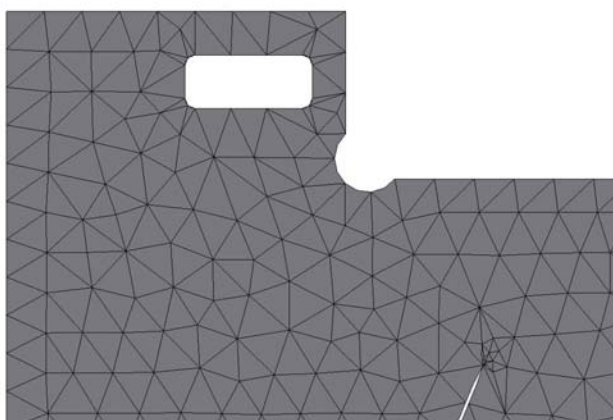
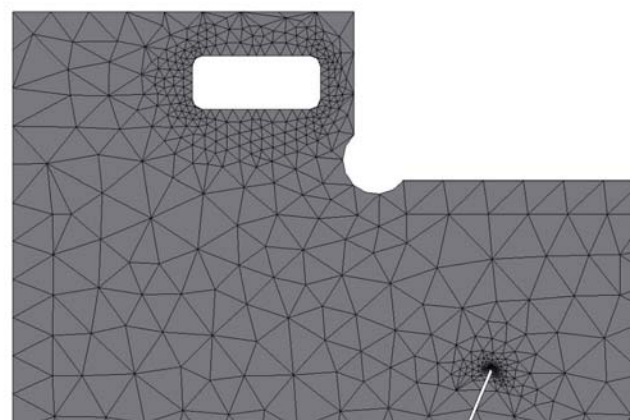


Figura 3.1 - Elemento tetraédrico de 4 nós



(a) Sem refinamento



(b) Com refinamento

Figura 3.2 - Modelos exemplificativos gerados pelo Cosmos sem refinamento e com refinamento automático por parte do software

3.2 - Modelos preliminares para determinar as geometrias dos rasgos dos aventais

O principal objectivo deste subcapítulo é mostrar o evoluir dos modelos desenvolvidos, utilizados para determinar a forma que os rasgos de pressão hidráulica deverão ter para uma correcta correcção das deformações de quinagem. São apresentadas, nesta fase do trabalho, diversas configurações possíveis para o rasgo de pressão do avental móvel. Todo este estudo será também aplicado ao avental fixo. Embora haja diferenças no que respeita à forma geométrica e condições de fronteira de cada um dos aventais, assume-se que o comportamento às deformações de quinagem deverá ser idêntico. Logo, o estudo desenvolvido para o rasgo do avental móvel estender-se-á ao rasgo do avental fixo.

A pressão hidráulica no interior dos rasgos dos aventais é determinada nos modelos, através de um processo demorado de "tentativa-erro", até encontrar um equilíbrio entre a carga de quinagem e a pressão hidráulica. A pressão hidráulica ideal no interior do rasgo é aquela que garante a mínima variação de deslocamentos na direcção de penetração do punção na matriz ao longo do comprimento de quinagem.

Convém referir que apenas são apresentados alguns exemplos dos vários efectuados, e que todos eles mostram a evolução do trabalho desenvolvido na procura de uma solução que permita obter baixos deslocamentos para os vários comprimentos de quinagem.

Para determinar quais as condições de fronteira nos aventais da quinadora, foram consideradas as ligações normalmente utilizadas para a fixação dos aventais. O avental móvel desloca-se através de um sistema de guiagens com rolamentos, implementados nos montantes da máquina, como mostra a Figura 3.3. O avental fixo é soldado aos montantes da quinadora.

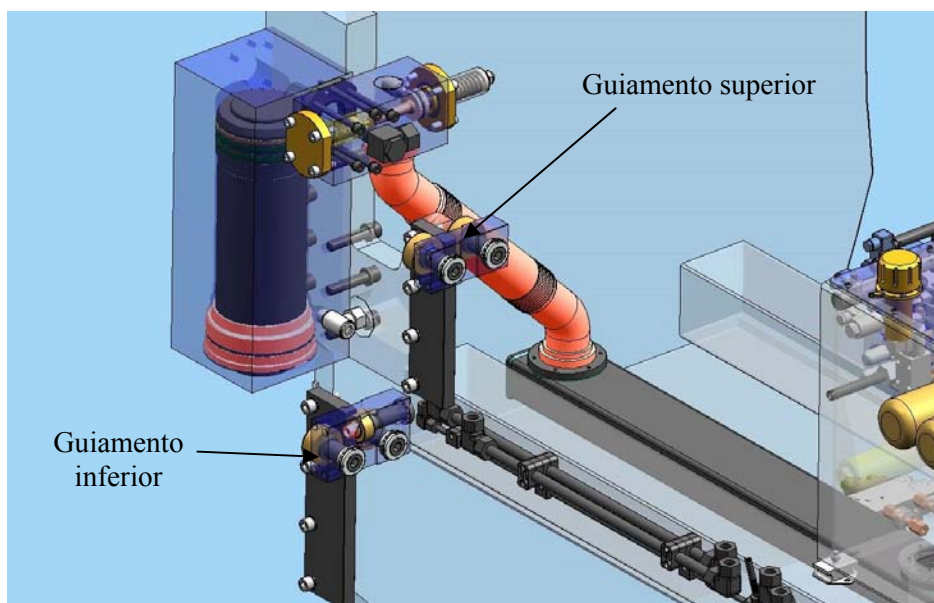


Figura 3.3 - Guiamento do avental móvel

Para as várias configurações do avental móvel estudadas, foram tomadas condições de fronteira tendo como base as restrições de movimento impostas pelas guias do avental e pelos cilindros hidráulicos da quinadora. O modo como foram implementadas as condições de fronteira e as solicitações aos modelos do avental móvel pode ser vista na Figura 3.4.

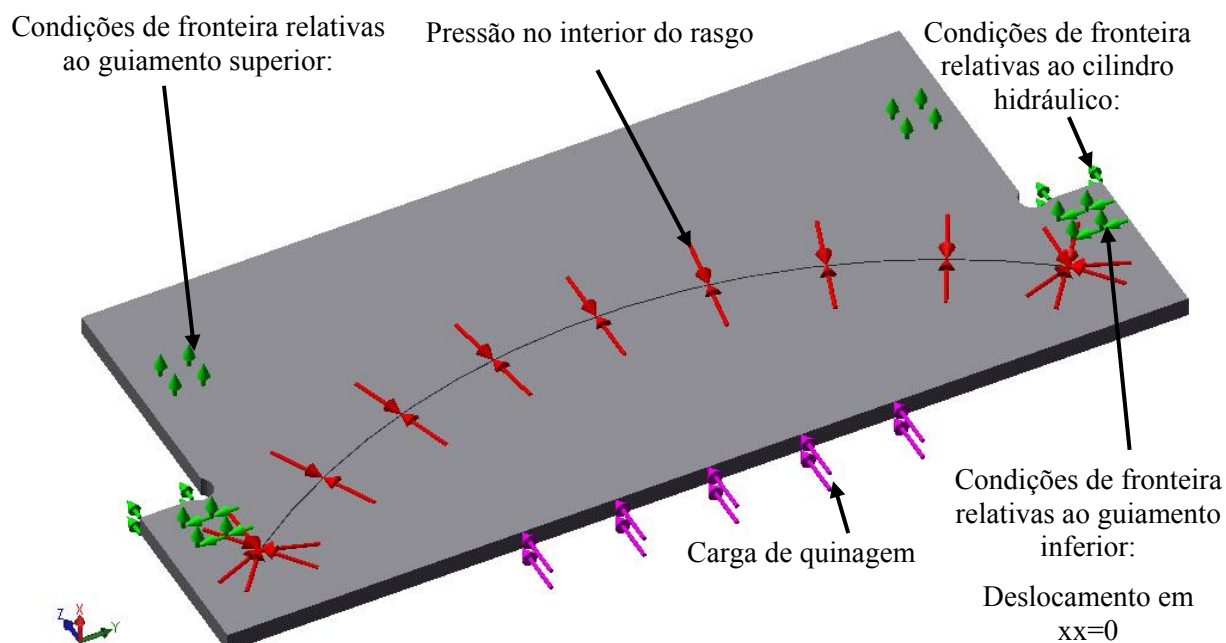


Figura 3.4 - Representação da carga de quinagem, pressão no interior do rasgo e condições de fronteira no avental móvel

O tipo de material utilizado no Cosmos para a modelação foi o seguinte:

Tabela 3.1 - Material usado no Cosmos

Material	Modulo de Elasticidade	Coeficiente de Poisson	Densidade	Tensão de cedência
RSt37	2,1E+11 Pa	0,28	7870kg/m ³	275 MPa

3.2.1 - Modelação preliminar 1

Nos primeiros modelos realizados foi escolhida uma forma curvilínea para o rasgo de pressão hidráulico. A Figura 3.5 mostra a forma escolhida da modelação preliminar 1.

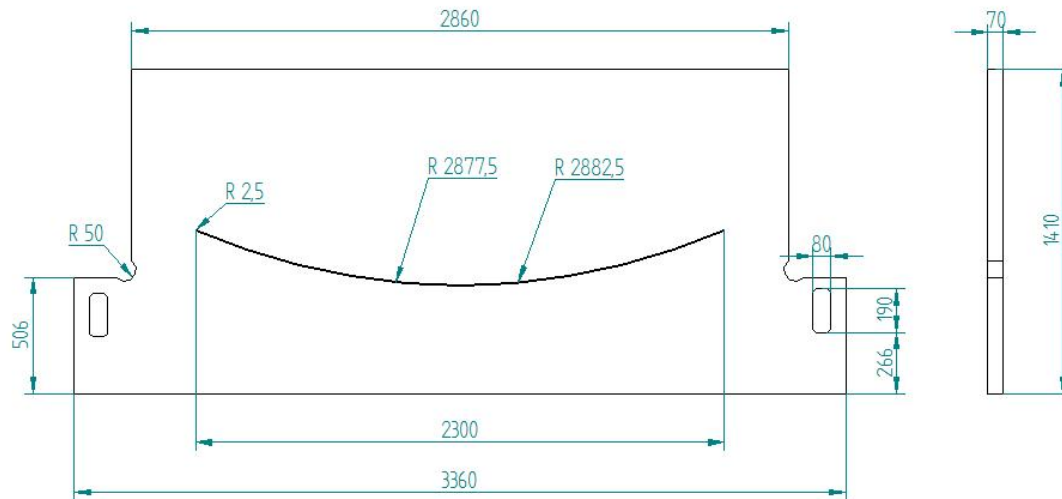


Figura 3.5 - Avental móvel da modelação preliminar 1 com rasgo de pressão hidráulica (cotas em mm)

A partir da configuração da Figura 3.5 foi criada uma malha de elementos finitos com 33671 elementos tetraédricos de 4 nós, com $60 \pm 3\text{mm}$ de lado (Figura 3.6).

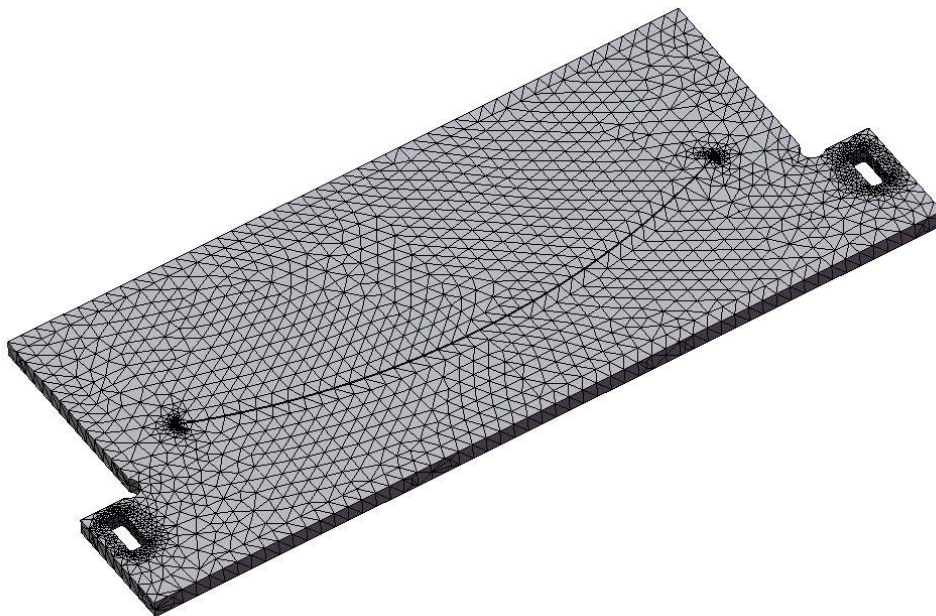


Figura 3.6 - Malha de elementos finitos do avental móvel da modelação preliminar 1

Os modelos em estudo foram desenvolvidos tendo em conta as situações mais desfavoráveis, ou seja, a carga máxima a que um comprimento de quinagem pode estar sujeito. Foram, então, desenvolvidos modelos para quinagens de chapa, que vão desde 1m até 3m de comprimento, que é o comprimento máximo de quinagem. As Tabelas 3.2 e 3.3 mostram a variação dos deslocamentos na direcção zz (direcção de penetração do punção na matriz) ao longo dos vários comprimentos de quinagem considerados. Os resultados pormenorizados podem ser vistos no Anexo A.

Tabela 3.2 - Resumo dos deslocamentos em zz de uma carga de 100 toneladas da modelação preliminar 1

Resultados para uma carga de 100 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1	0,029944	-0,013301	0,043245	11,2	1014

Tabela 3.3 - Resumo dos deslocamentos em zz para cargas de 130 toneladas da modelação preliminar 1

Resultados para cargas de 130 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1,3	0,020419	0,0036684	0,0167506	14,1	1463
1,5	0,017303	-0,040207	0,05751	14	1461
2	0,078525	-0,040171	0,118696	12,5	1300
2,5	0,096418	-0,079847	0,176265	11,5	1059
3	0,091076	-0,11264	0,203716	10,05	1128

A Figura 3.7 apresenta a variação de deslocamentos máximos e mínimos para vários comprimentos de quinagem. Consta-se que se obtêm melhores resultados para comprimentos de quinagem mais pequenos.

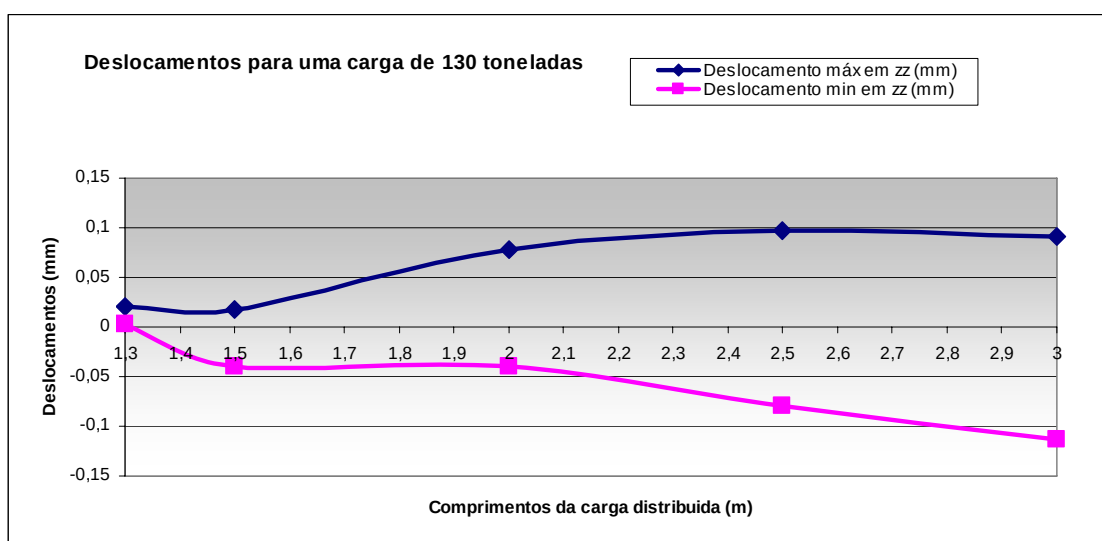


Figura 3.7 - Deslocamentos máximos e mínimos em zz em relação ao comprimento de quinagem na modelação preliminar 1

A Figura 3.8 mostra os deslocamentos em zz do avental para comprimentos de quinagem de 1,3m e 3m.

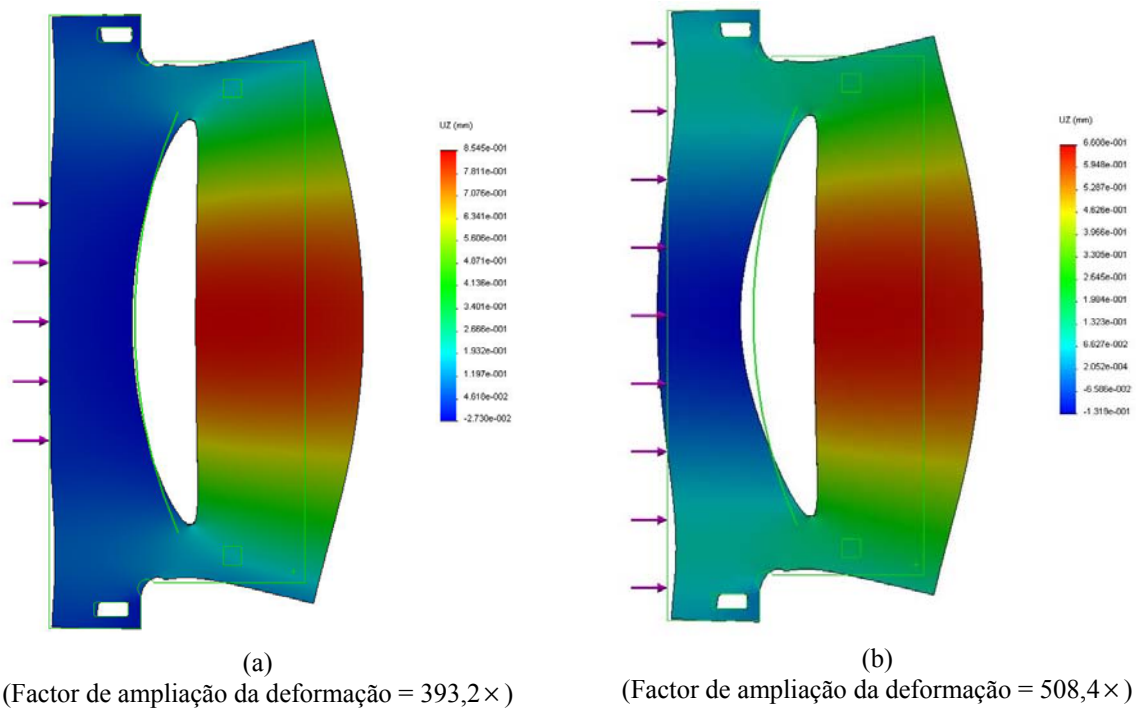


Figura 3.8 - Deslocamentos em zz da modelação preliminar 1 para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m

As tensões máximas foram registadas para uma carga de quinagem de 130 toneladas distribuída em 1,3m. O valor da tensão máxima de Von Mises é de 1463MPa e encontra-se nos extremos do rasgo de pressão hidráulica (Figura 3.9).

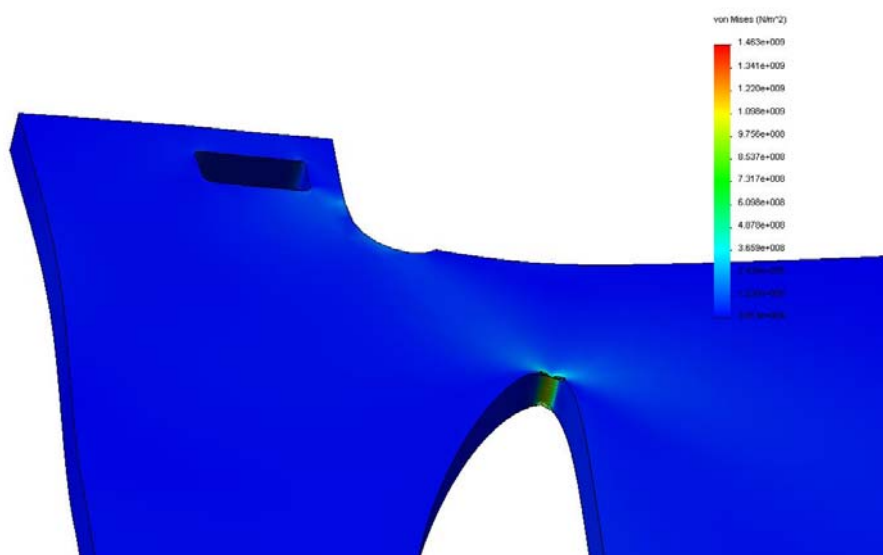


Figura 3.9 - Tensões máximas de Von Mises no avental da modelação preliminar 1 para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m

3.2.2 - Modelação preliminar 2

Com o evoluir do estudo realizado para a compensação de deformações de quinagem tendo por base a forma da modelação preliminar 1, constatou-se que quanto maior o raio do rasgo de pressão hidráulica, melhor eram os resultados obtidos. Optou-se, então, por uma forma recta para o rasgo de pressão (Figura 3.10).

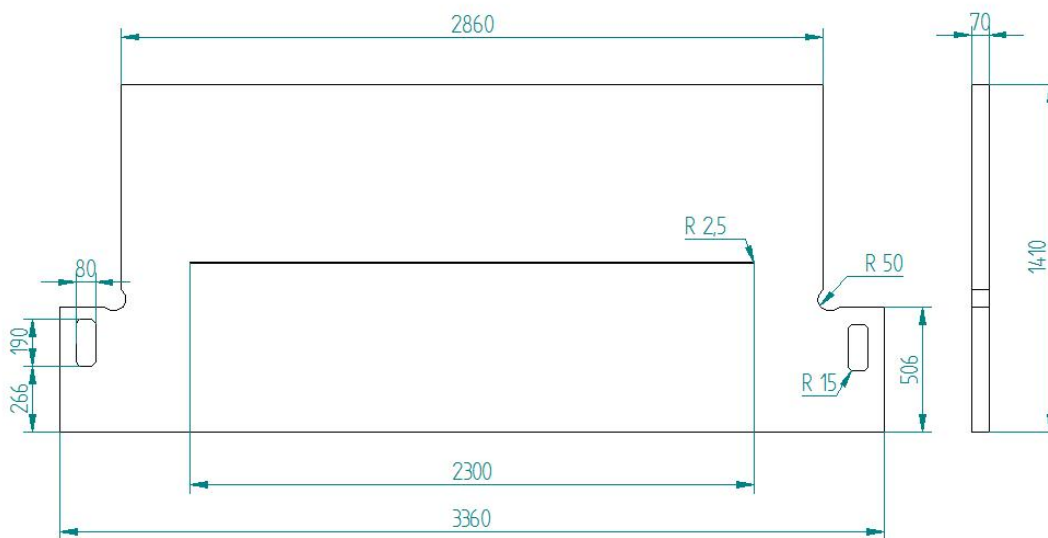


Figura 3.10 - Avental móvel da modelação preliminar 2 com rasgo de pressão hidráulica (cotas em mm)

A partir da configuração da Figura 3.10 foi criada uma malha de elementos finitos com 32370 elementos tetraédricos de 4 nós, de 60 ± 3 mm de lado, representada na Figura 3.11.

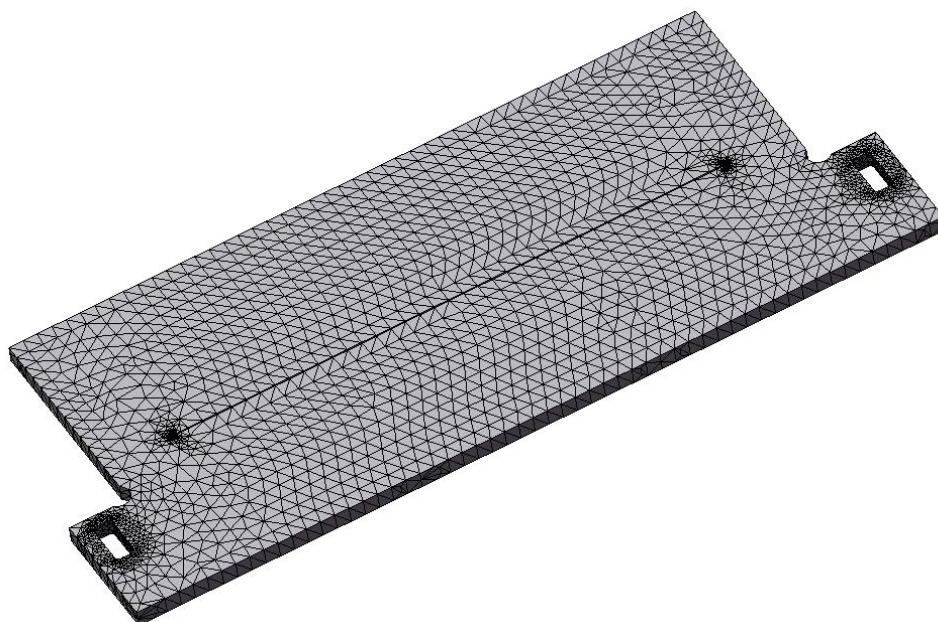


Figura 3.11 - Malha de elementos finitos do avental móvel para a modelação preliminar 2

3 - Modelos desenvolvidos para determinar a geometria do rasgo de pressão hidráulica

De seguida, são novamente apresentados os resultados dos modelos efectuados para vários comprimentos de quinagem de chapa em carga máxima, começando por comprimentos de 1m, até 3m de comprimento.

As Tabelas 3.4 e 3.5 mostram a variação dos deslocamentos na direcção zz (direcção de penetração do punção na matriz) ao longo dos comprimentos de quinagem considerados. Os resultados pormenorizados dos modelos desenvolvidos podem ser vistos no Anexo B.

Tabela 3.4 - Resumo dos deslocamentos em zz de uma carga de 100 toneladas da modelação preliminar 2

Resultados para uma carga de 100 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1	-0,010797	-0,016303	0,005506	10,5	1207

Tabela 3.5 - Resumo dos deslocamentos em zz para cargas de 130 toneladas da modelação preliminar 2

Resultados para cargas de 130 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1,3	0,015215	-0,002588	0,017803	12,8	1438
1,5	0,015754	-0,03032	0,046074	12,7	1366
2	0,047562	-0,084419	0,131981	12,2	1387
2,5	0,085243	-0,085999	0,171242	11	1252
3	0,084908	-0,10404	0,188948	10	1121

A Figura 3.12 apresenta a variação de deslocamentos máximos e mínimos para vários comprimentos de quinagem.

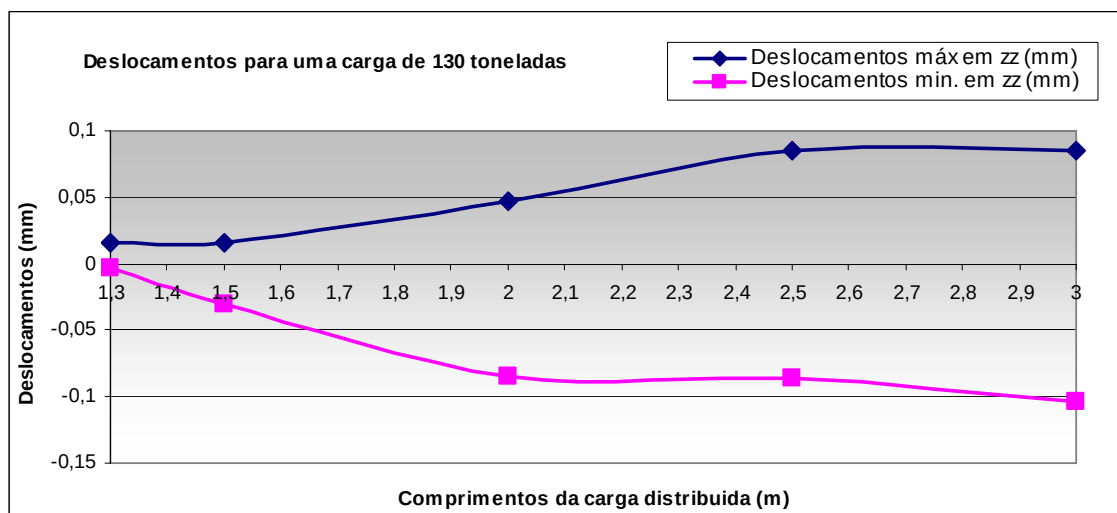


Figura 3.12 - Deslocamentos máximos e mínimos em zz em relação ao comprimento de quinagem na modelação preliminar 2

A Figura 3.13, que foi obtida a partir do Cosmos, mostra os deslocamentos em zz do avental móvel para comprimentos de quinagem de 1,3m e 3m.

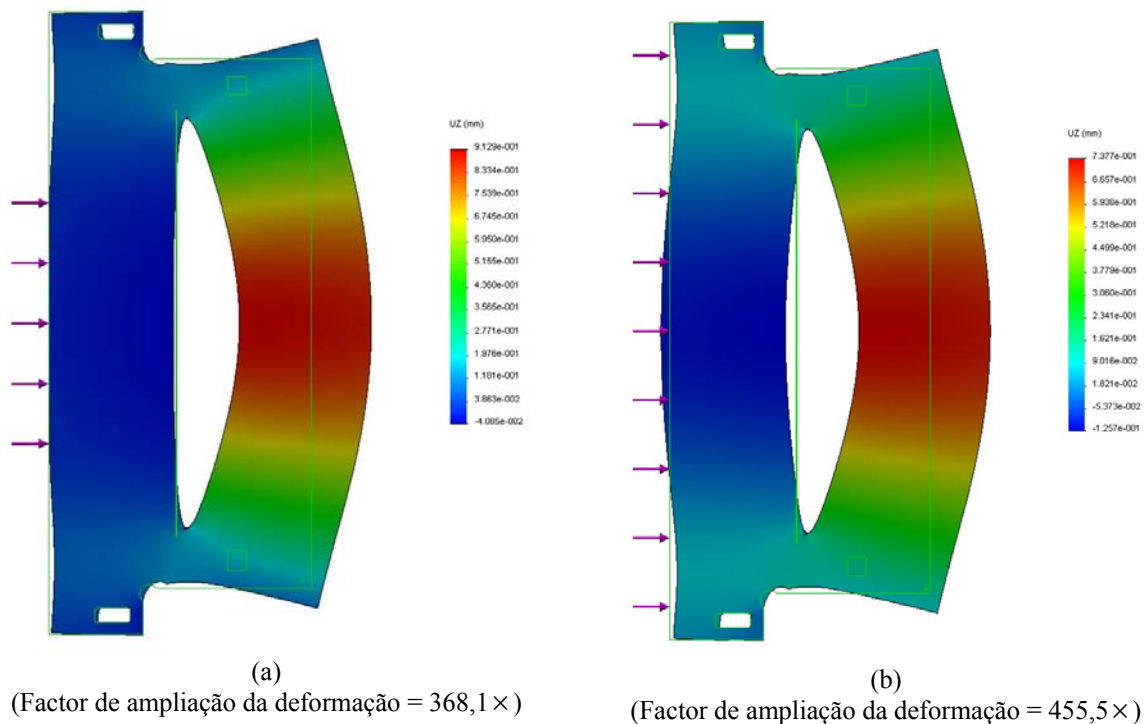


Figura 3.13 - Deslocamentos em zz da modelação preliminar 2, para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m

As tensões máximas foram registadas novamente para uma carga de quinagem de 130 toneladas distribuída em 1,3m. O valor de tensão máxima de Von Mises é de 1438MPa e encontra-se nos extremos do rasgo de pressão hidráulica, conforme documenta a Figura 3.14.

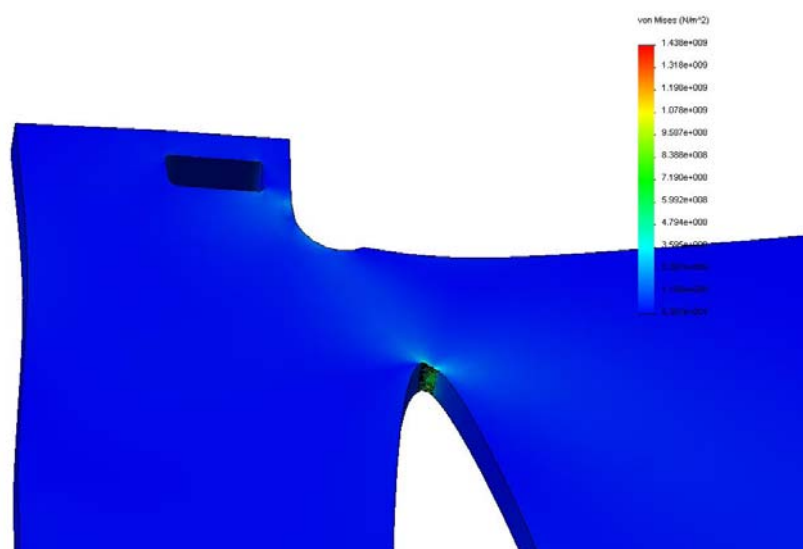


Figura 3.14 - Tensões máximas de Von Mises no avental da modelação preliminar 2 para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m

3.2.3 - Modelação preliminar 3

Neste exemplo é aumentado o comprimento do rasgo de pressão hidráulica, e este é aproximado para a zona de quinagem da chapa.

A Figura 3.15 mostra a configuração do avental móvel com rasgo de pressão hidráulica para a modelação preliminar 3.

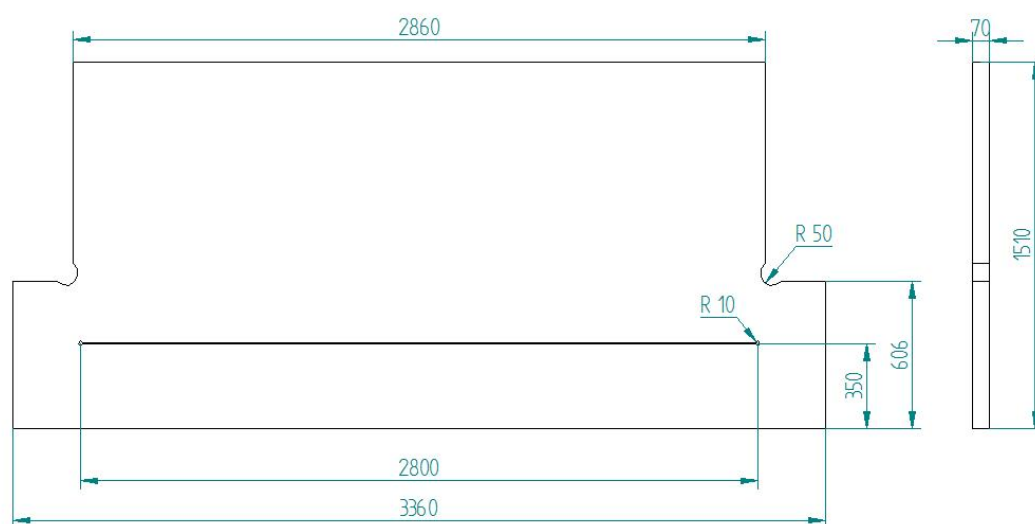


Figura 3.15 - Avental móvel da modelação preliminar 3 com rasgo de pressão hidráulica (cotas em mm)

A partir da configuração da Figura 3.15 foi criado um modelo de elementos finitos com uma malha com 35241 elementos tetraédricos de 4 nós, com 60 ± 3 mm de lado (Figura 3.16).

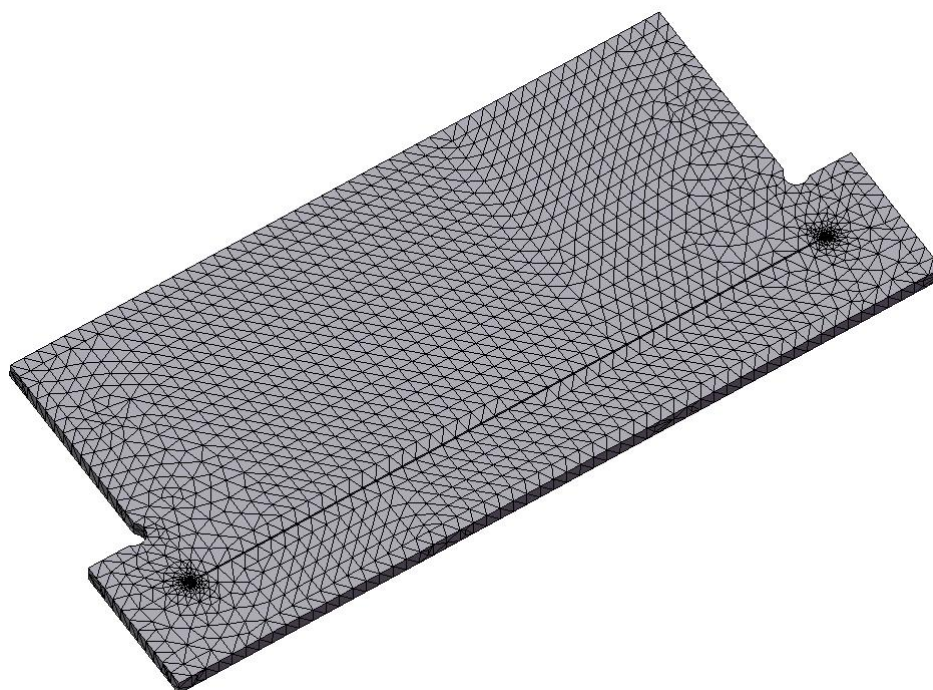


Figura 3.16 - Malha de elementos finitos do avental móvel da modelação preliminar 3

As Tabelas 3.6 e 3.7 mostram a variação dos deslocamentos na direcção zz (direcção de penetração do punção na matriz) para vários tipos de quinagem de chapa, começando por comprimentos de 1m, até 3m de comprimento. Os resultados pormenorizados dos modelos desenvolvidos encontram-se tabelados no Anexo C.

Tabela 3.6 - Resumo dos deslocamentos em zz de uma carga de 100 toneladas da modelação preliminar 3

Resultados para uma carga de 100 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1	0,051177	-0,064702	0,115879	7,9	412,5

Tabela 3.7 - Resumo dos deslocamentos em zz para cargas de 130 toneladas da modelação preliminar 3

Resultados para cargas de 130 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1,3	0,096604	-0,057586	0,15419	9,7	480,4
1,5	0,07636	-0,055859	0,132219	9,36	418,5
2	0,018866	-0,017452	0,036318	8,43	389,6
2,5	0,03002	-0,043978	0,073998	7,45	328,1
3	0,052542	-0,049373	0,101915	6,4	255,9

Podemos constatar, através da observação da Figura 3.17, que a variação de deslocamentos em zz máximos e mínimos nos comprimentos de quinagem, vão diminuindo para comprimentos médios de quinagem, o que não se verificava nas modelações preliminares anteriores. Normalmente, no processo de quinagem, é mais importante uma boa correcção de deformações para comprimentos maiores, devido a que as chapas quinadas em comprimentos maiores serem, normalmente, menos espessas e mais susceptíveis de sofrerem maiores deformações angulares.

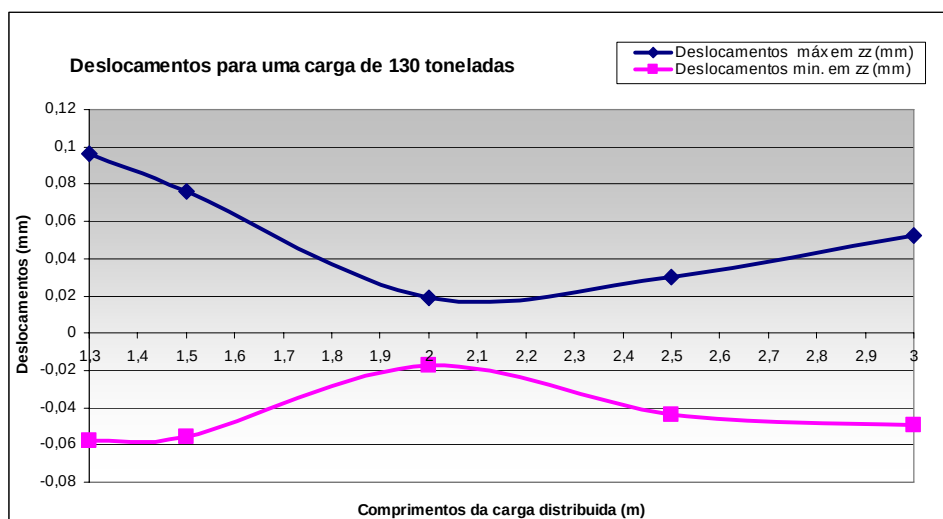


Figura 3.17 - Deslocamentos máximos e mínimos em zz em relação ao comprimento de quinagem na modelação preliminar 3

A Figura 3.18 mostra os deslocamentos em zz do avental móvel para comprimentos de quinagem de 1,3m e 3m.

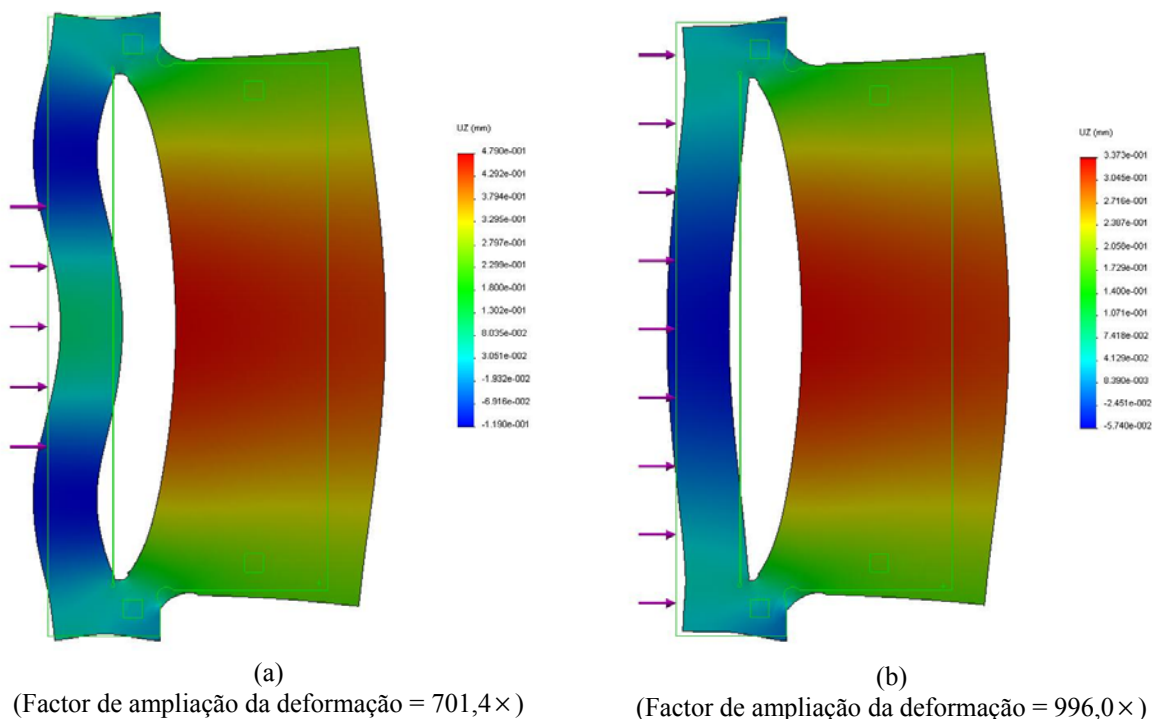


Figura 3.18 - Deslocamentos em zz da modelação preliminar 3 para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m

As tensões máximas no avental móvel foram registadas para uma carga de quinagem de 130 toneladas distribuída em 1,3m. O valor de tensão máxima é de Von Mises é de 480,4MPa e encontra-se localizada nos extremos do rasgo de pressão hidráulica. Conforme se pode constatar por intermédio da observação da Figura 3.19.

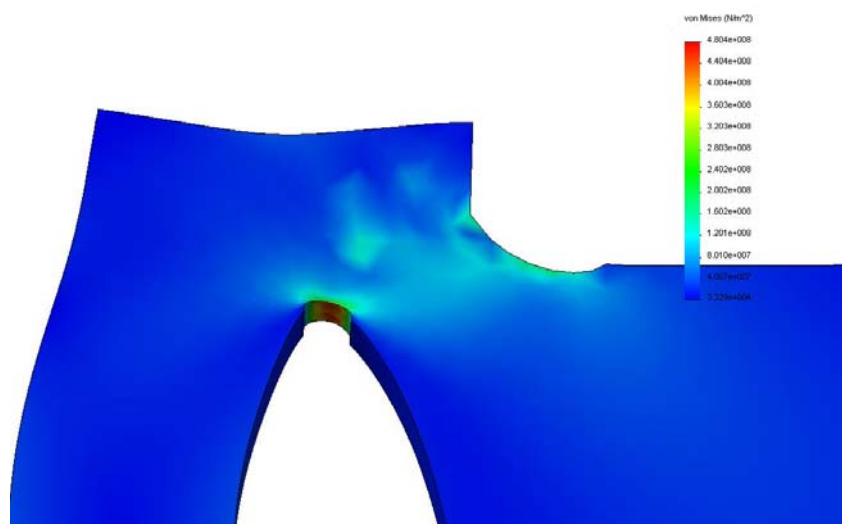


Figura 3.19 - Tensões máximas de Von Mises no avental da modelação preliminar 3 para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m

3.2.4 - Modelação preliminar 4

Depois do estudo, que teve por base a forma recta da modelação anterior, foi desenvolvido de novo um modelo com forma curvilínea para o rasgo de pressão, mas desta vez invertido em relação à modelação preliminar 1. A Figura 3.20 apresenta a geometria escolhida para a modelação preliminar 4.

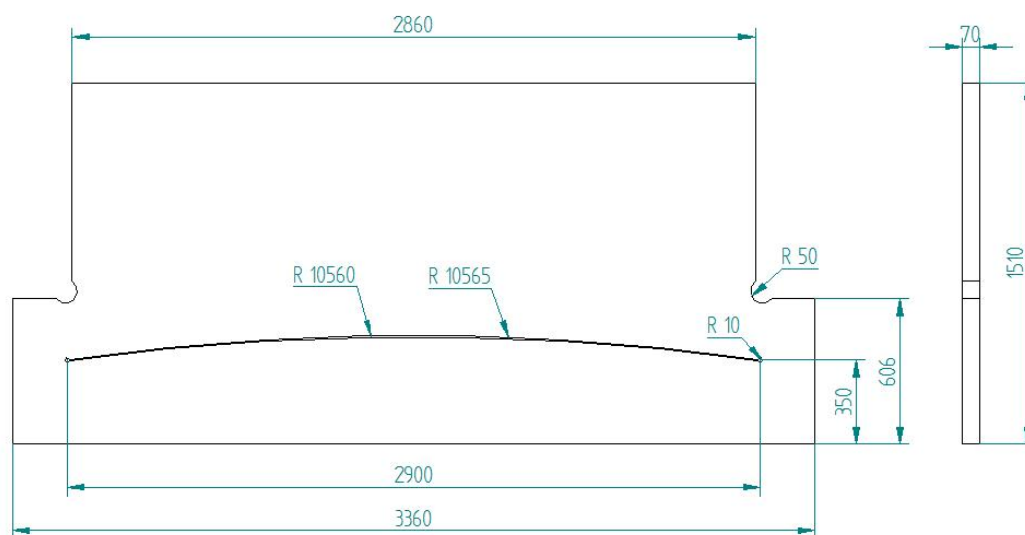


Figura 3.20 - Avental móvel da modelação preliminar 4 com rasgo de pressão hidráulica (cotas em mm)

A partir desta configuração da Figura 3.20 foi criada uma malha de elementos finitos, com 19733 elementos tetraédricos de 4 nós, de 60 ± 3 mm de lado (Figura 3.21).

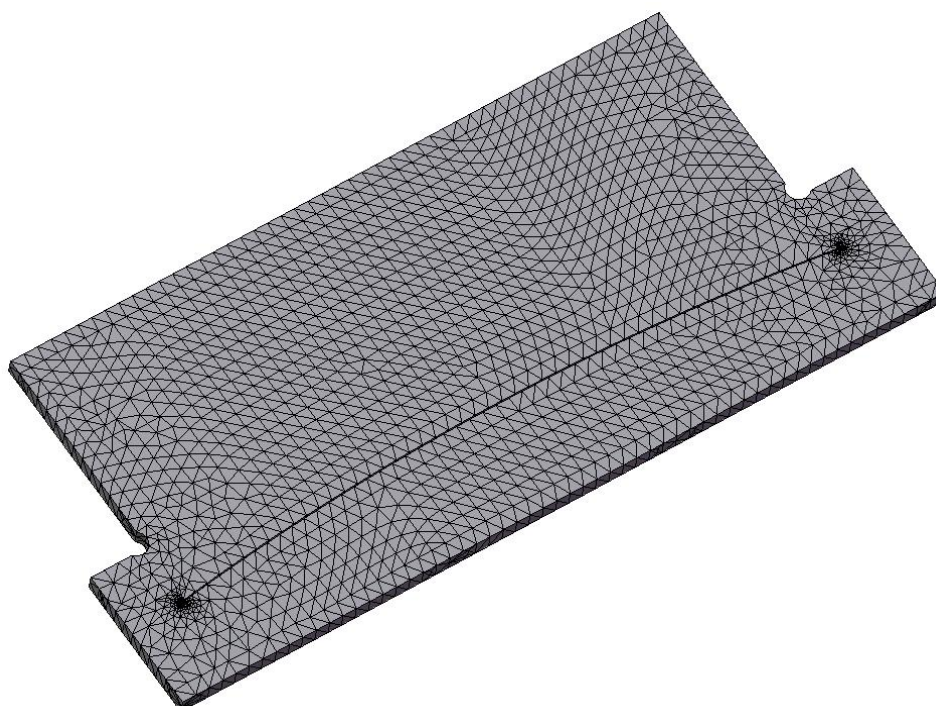


Figura 3.21 - Malha de elementos finitos do avental móvel da modelação preliminar 4

3 - Modelos desenvolvidos para determinar a geometria do rasgo de pressão hidráulica

Nas Tabelas 3.8 e 3.9 são apresentados os resultados da modelação efectuada em termos de deslocamentos na direcção zz para comprimentos de quinagens que vão de 1m até 3m. Os resultados pormenorizados dos modelos desenvolvidos podem ser vistos no Anexo D.

Tabela 3.8 - Resumo dos deslocamentos em zz de uma carga de 100 toneladas da modelação preliminar 4

Resultados para uma carga de 100 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1	0,044561	-0,037627	0,08219	7,25	375,8

Tabela 3.9 - Resumo dos deslocamentos em zz para cargas de 130 toneladas da modelação preliminar 4

Resultados para cargas de 130 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1,3	0,033806	-0,071067	0,10487	9,1	461,1
1,5	0,040563	-0,05826	0,09882	8,8	436,9
2	0,032867	-0,020794	0,05366	8	372,6
2,5	0,015321	-0,0022365	0,01756	7,15	318,3
3	0,037634	-0,031396	0,06903	6,25	263,4

Por observação da Figura 3.22 verifica-se que os deslocamentos em zz diminuem para comprimentos maiores o que é importante, como já foi dito, em termos de quinagem.

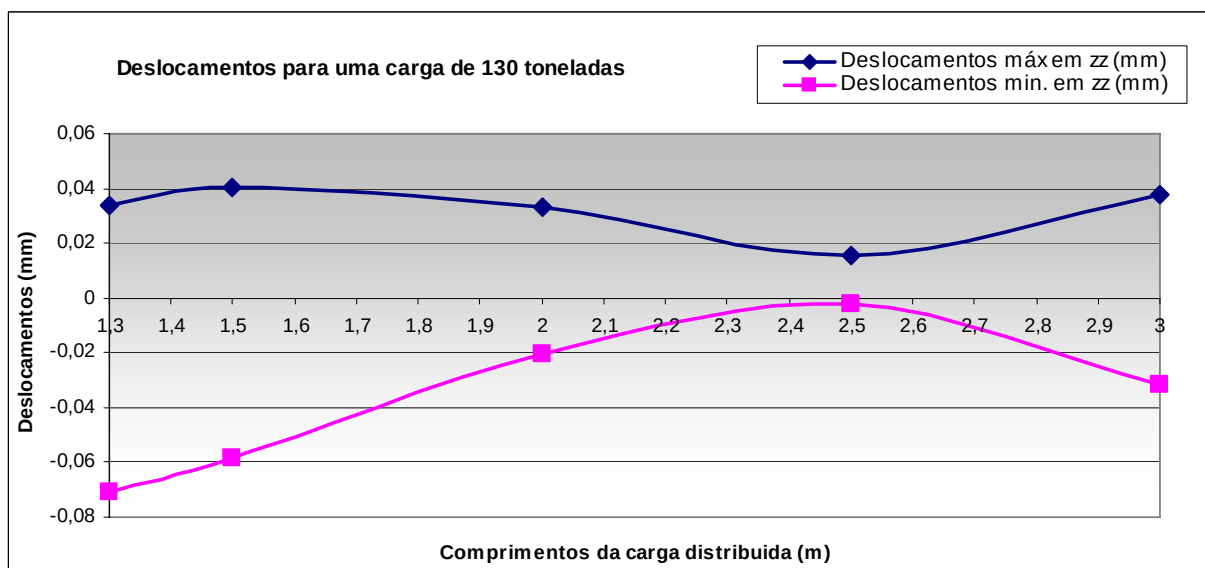


Figura 3.22 - Deslocamentos máximos e mínimos em zz em relação ao comprimento de quinagem na modelação preliminar 4

A Figura 3.23 mostra os deslocamentos em zz do avental móvel para comprimentos de quinagem de 1,3m e 3m.

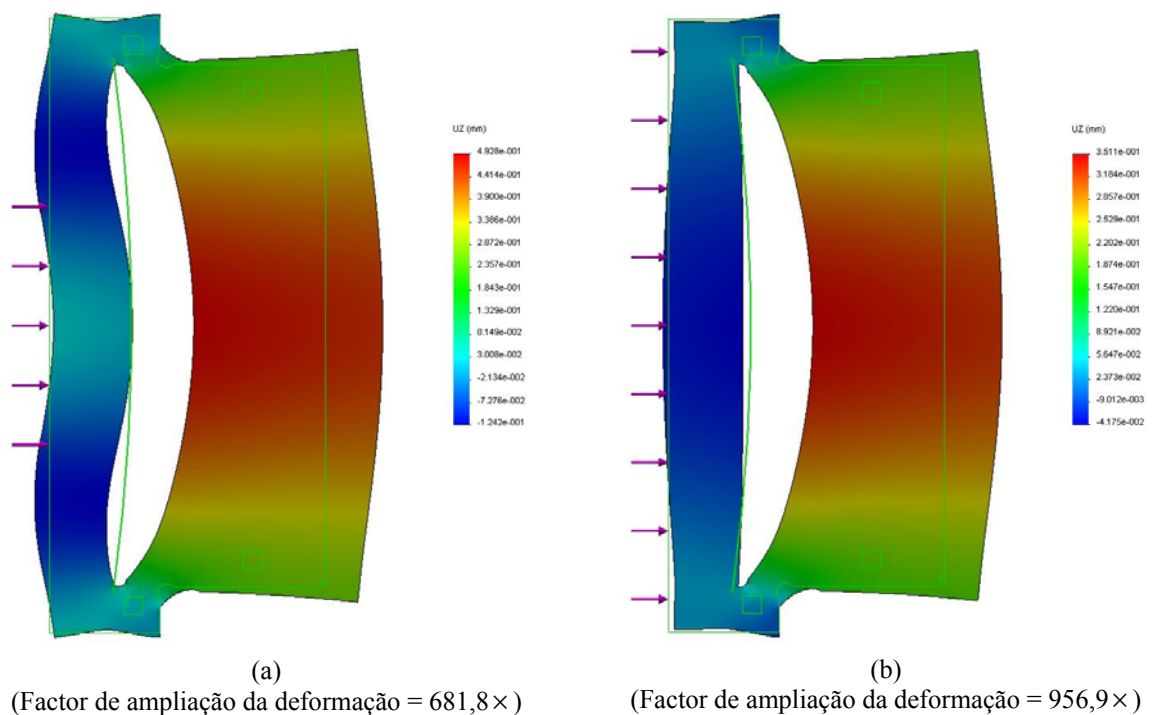


Figura 3.23 - Deslocamentos em zz da modelação preliminar 4 para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m

As tensões máximas foram registadas para uma carga de quinagem de 130 toneladas distribuída em 1,3m. O valor de tensão máxima de Von Mises é de 461,1MPa e encontra-se localizada nos extremos do rasgo de pressão hidráulica (Figura 3.24).

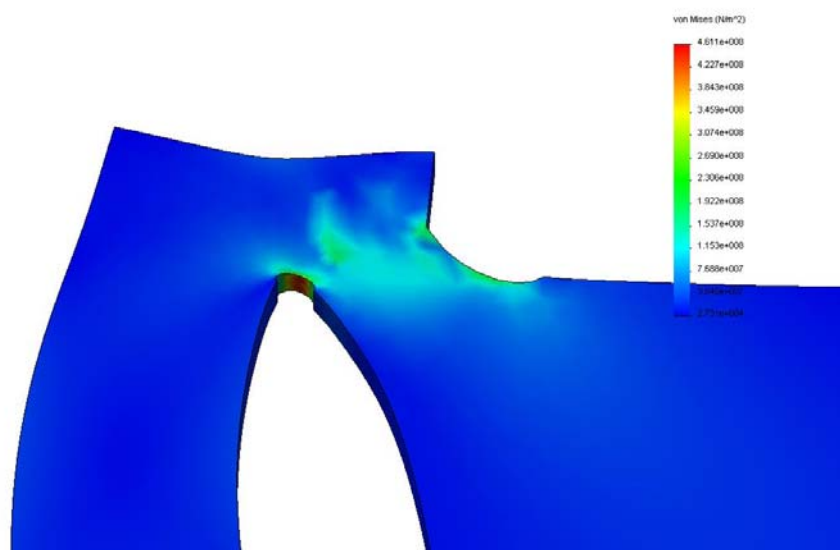


Figura 3.24 - Tensões máximas de Von Mises no avental da modelação preliminar 4 para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m

3.2.5 - Modelação preliminar 5

A modelação preliminar 5 é o resultado de várias alterações à forma geométrica do rasgo da modelação preliminar 4, com vista a atingir melhores resultados em termos de correcção de deformações. O parâmetro que foi alvo de maior estudo foi o raio da curva do rasgo. Este modelo é o culminar do estudo da forma geométrica para o rasgo do avental.

A configuração do avental móvel com rasgo de pressão hidráulica para a modelação preliminar 5 é a seguinte:

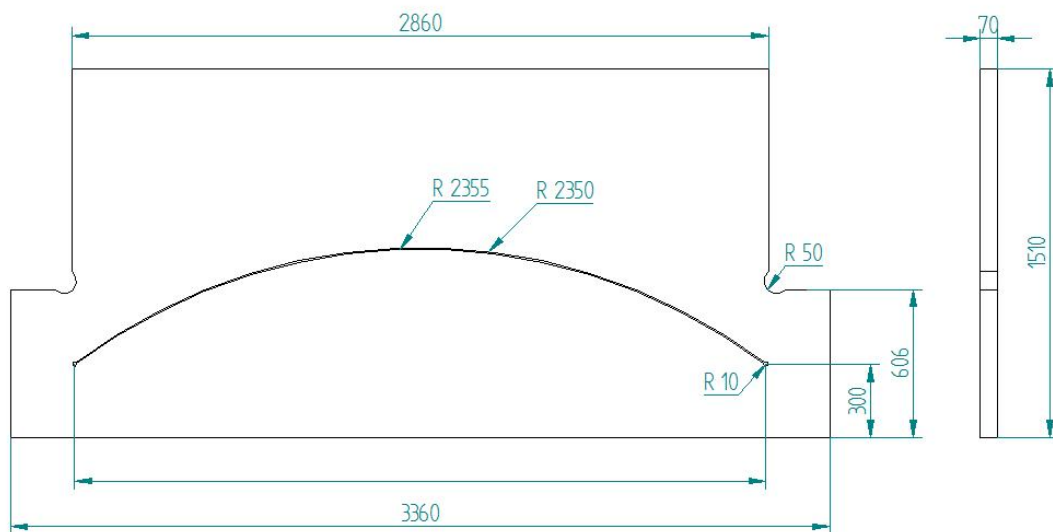


Figura 3.25 - Avental móvel da modelação preliminar 5 com rasgo de pressão hidráulica (cotas em mm)

A malha de elementos finitos usada na modelação era constituída por 20039 elementos tetraédricos de 4 nós com 60 ± 3 mm de lado, e apresenta-se na Figura 3.26.

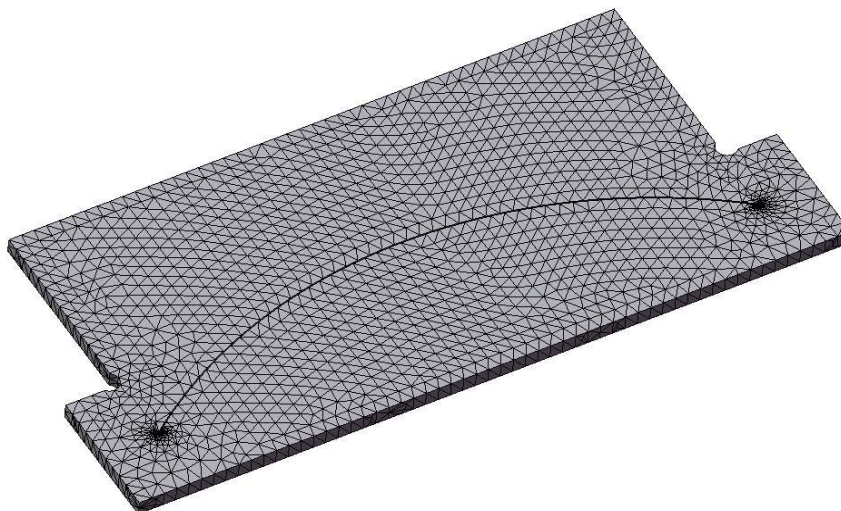


Figura 3.26 - Malha de elementos finitos do avental móvel da modelação preliminar 5

Nas Tabelas 3.10 e 3.11 apresentam-se os resultados dos modelos efectuados em carga máxima, em termos de deslocamentos na direcção zz. Os comprimentos considerados variam entre 1,3m e 3m. Os resultados pormenorizados dos modelos desenvolvidos podem ser vistos no Anexo E.

Tabela 3.10 - Resumo dos deslocamentos em zz de uma carga de 100 toneladas da modelação preliminar 5

Resultados para uma carga de 100 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1	0,014063	-0,020996	0,035059	7,1	335,8

Tabela 3.11 - Resumo dos deslocamentos em zz para cargas de 130 toneladas da modelação preliminar 5

Resultados para cargas de 130 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1,3	0,02531	-0,019018	0,044328	8,9	397,9
1,5	0,021958	-0,017274	0,039232	8,7	380,9
2	-0,003881	-0,011233	0,007352	8,2	343,2
2,5	0,020474	-0,018747	0,039221	7,5	292,2
3	0,042974	-0,040533	0,083507	6,7	242,1

A Figura 3.27 mostra o evoluir dos deslocamentos em zz para diferentes comprimentos de quinagem. Como podemos constatar, há uma boa correcção de deformações para comprimentos médios de quinagem.

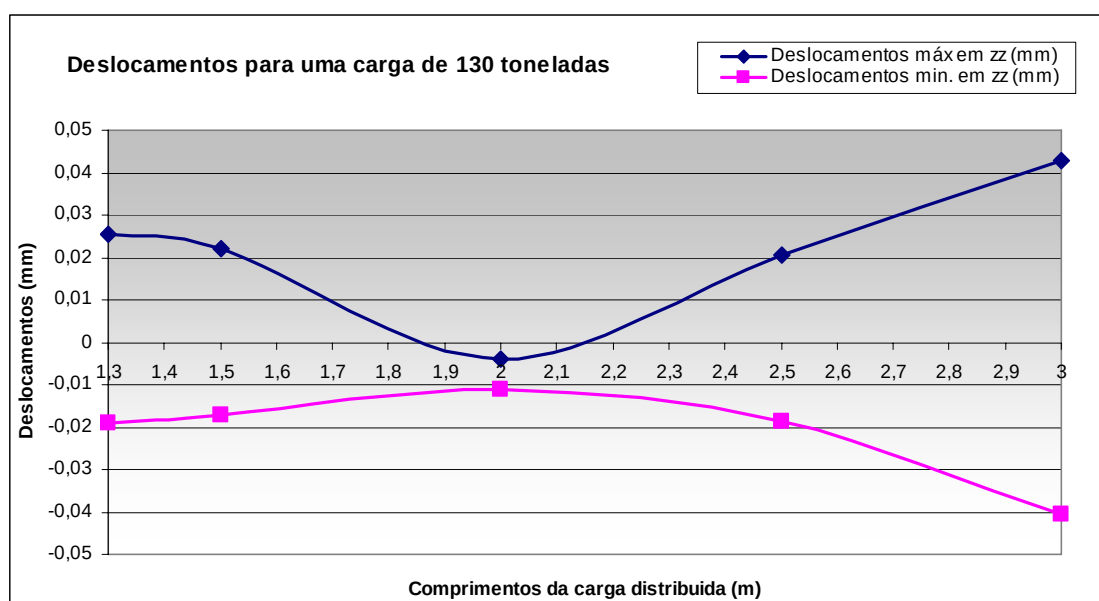


Figura 3.27 - Deslocamentos máximos e mínimos em zz em relação ao comprimento de quinagem na modelação preliminar 5

A Figura 3.28 mostra os deslocamentos em zz do avental móvel para comprimentos de quinagem de 1,3m e 3m.

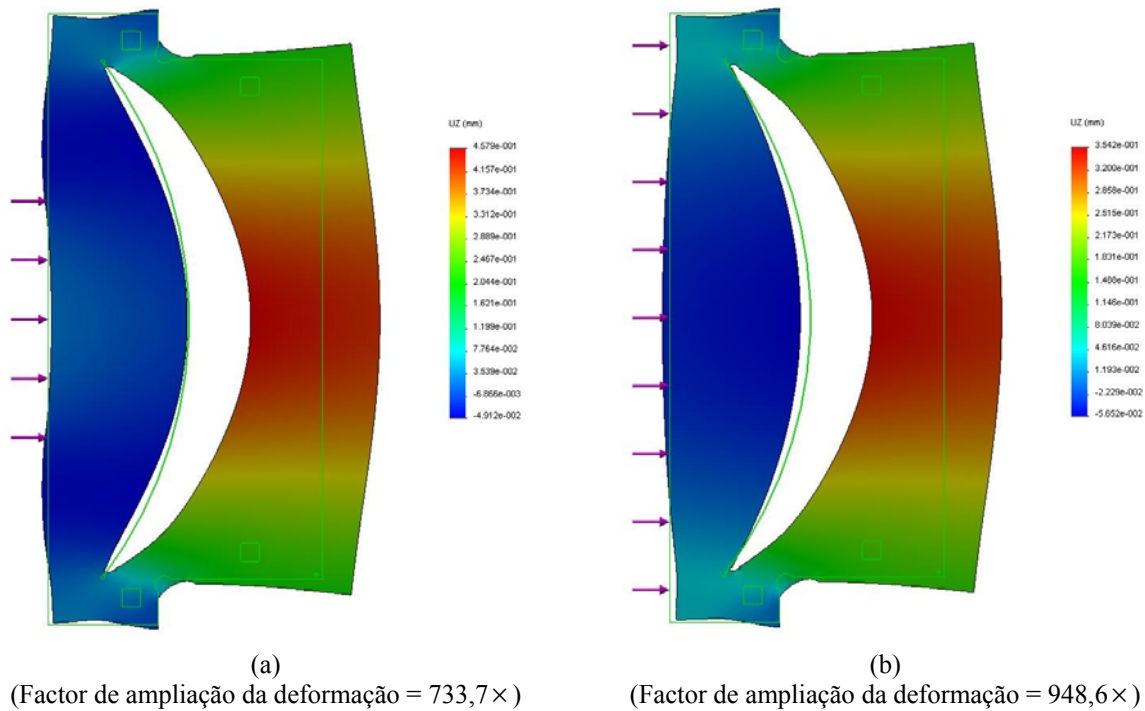


Figura 3.28 - Deslocamentos em zz da modelação preliminar 5 para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m

As tensões máximas foram registadas para uma carga de quinagem de 130 toneladas distribuída em 1,3m, o valor de tensão máxima é de Von Mises é de 397,9MPa e encontra-se localizada nos extremos do rasgo de pressão hidráulica (Figura 3.29).

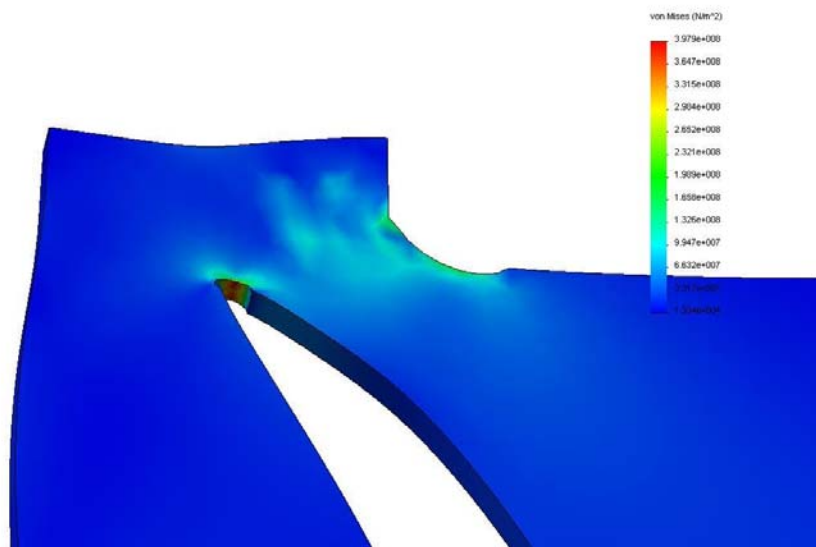


Figura 3.29 - Tensões máximas de Von Mises no avental da modelação preliminar 5 para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m

3.2.6 - Modelação sem compensação de deformações

Para determinar a capacidade compensação de deformações de quinagem dos modelos preliminares é necessário confrontar com uma modelação sem compensação de deformações. Para tal, foi desenvolvido um modelo de um avental móvel igual ao dos modelos preliminares mas sem rasgo de pressão hidráulica. A malha de elementos finitos criada é constituída por 14515 elementos tetraédricos de 4 nós com $60 \pm \text{mm}$ de lado (Figura 3.30).

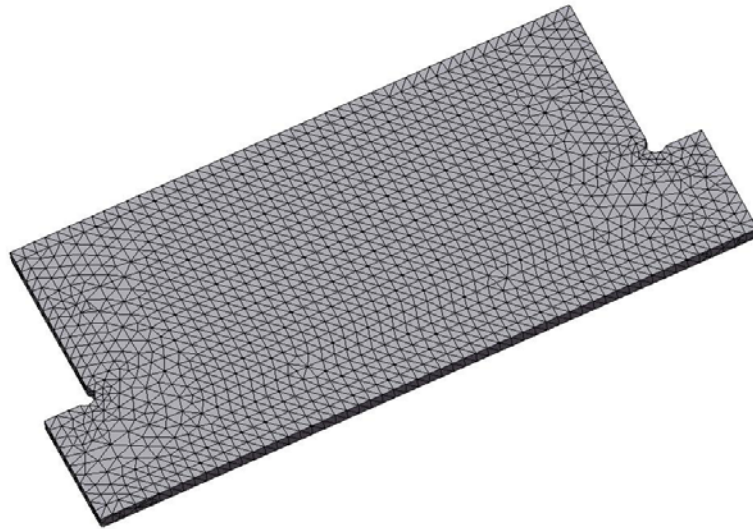


Figura 3.30 - Malha de elementos finitos do avental móvel da modelação preliminar 4

Na Figura 3.31 é representado os deslocamentos em zz do avental móvel para comprimentos de quinagem de 1,3m e 3m.

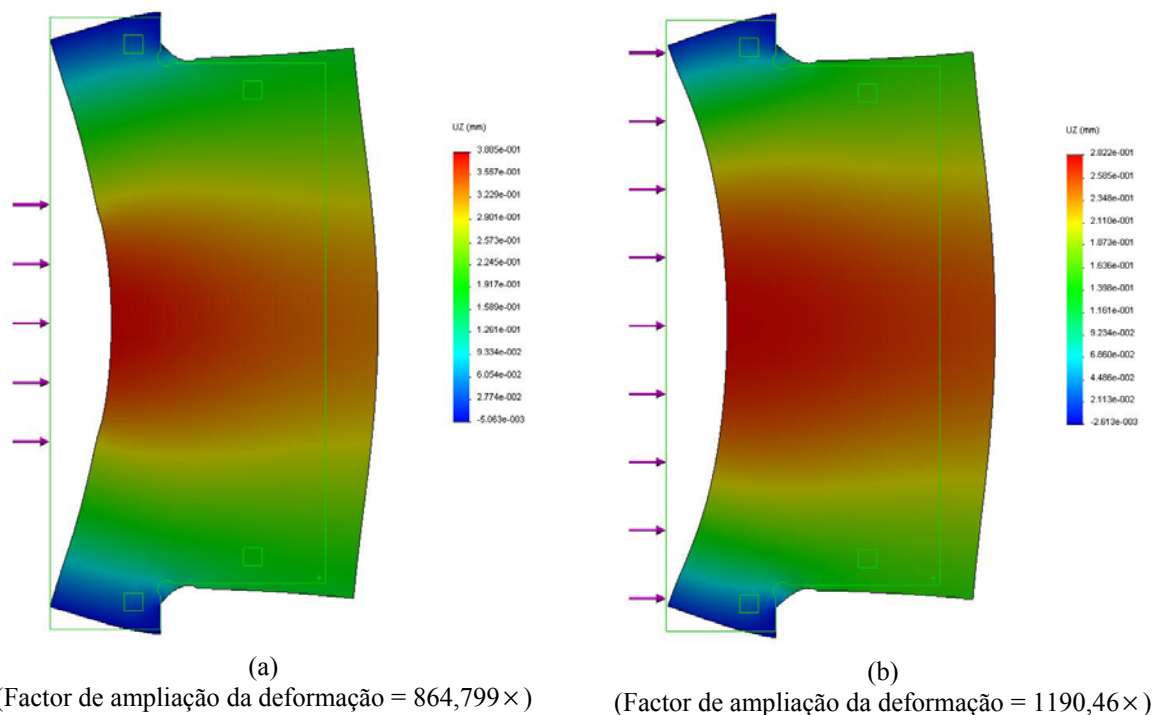


Figura 3.31 - Deslocamentos em zz da modelação sem compensação de deformações para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m

Na Tabela 3.12, são apresentados os resultados obtidos em termos de deslocamentos em zz para comprimentos de quinagem de 1,3 e 3m em carga máxima.

Tabela 3.12 - Deslocamentos em zz para cargas de 130 toneladas da modelação sem compensação de deformações

Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)
1,3	0,38853	0,31484	0,07369
3	0,28224	0,067289	0,214951

A partir dos valores dados na Tabela 3.12 é possível verificar a capacidade dos rasgos com pressão hidráulica do avental móvel de compensar deformações em relação a um avental sem qualquer tipo de compensação. Por exemplo, comparando os deslocamentos em zz do avental móvel sem compensação de deformações com os deslocamentos da modelação preliminar 5, é verificado que o sistema desenvolvido é mais eficaz na compensação de deformações para comprimentos de quinagem maiores, como demonstra a Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Comparação da variação máxima dos deslocamentos em zz para o avental móvel sem compensação de deformações relativamente ao avental móvel da modelação preliminar 5

Comprimento da carga distribuída (m)	Avental sem compensação de deformações Δz (mm)	Modelação preliminar 5 Δz (mm)	Diminuição da variação máxima dos deslocamentos em zz (%)
1,3	0,07369	0,044328	66,238044
3	0,214951	0,083507	157,404768

3.2.7 - Conclusões do estudo da geometria dos rasgos dos aventais

Podemos verificar através da Tabela 3.14 que os deslocamentos em zz para um comprimento de quinagem de 3m em carga máxima, vão melhorando com o evoluir do estudo da geometria do rasgo de pressão. Embora que o último modelo desenvolvido não seja o que ofereça melhor correcção de deformações. Em termos de tensões máximas de Von Mises verificadas nos extremos dos rasgos a modelação preliminar 5 é a solução que garante maior segurança estrutural (Tabela 3.15).

Tabela 3.14 - Deslocamentos em zz em cada modelo preliminar desenvolvido para uma carga de quinagem de 130 toneladas distribuída em 3m

Resumo dos deslocamentos em zz para cada modelo preliminar desenvolvido para uma carga de quinagem de 130 toneladas distribuída em 3m		
Modelação preliminar	Deslocamentos máximos em zz (mm)	Deslocamentos mínimos em zz (mm)
1	0,091076	-0,11264
2	0,084908	-0,10404
3	0,052542	-0,049373
4	0,037634	-0,031396
5	0,042974	-0,040533

Tabela 3.15 - Tensões máximas de Von Mises verificadas em cada modelo preliminar desenvolvido para uma carga de quinagem de 130 toneladas distribuída em 1,3m

Resumo das tensões máximas de Von Mises verificadas em cada modelo preliminar desenvolvido para uma carga de quinagem de 130 toneladas distribuída em 1,3m	
Modelação preliminar	Tensões máximas de Von Mises (MPa)
1	1463
2	1438
3	480,4
4	461,1
5	397,9

Em termos de tensões verificamos que para as várias modelações desenvolvidos, existe uma grande concentração de tensões nos extremos do rasgo. A tensão de cedência do aço RSt37 utilizado nos aventais das quinadoras é de 275MPa. Por norma no projecto das quinadoras, utilizam-se 160MPa, como valor limite de tensões máximas admissíveis. Na modelação preliminar 5, que é o modelo em que se obteve menos tensões, o valor da tensão máxima de Von Mises verificada, foi de 397,9MPa. Como este valor ultrapassa grandemente as tensões máximas toleráveis, torna-se necessário encontrar uma solução para diminuir as tensões verificadas.

3.3 - Modelação dos aventais móvel e fixo

3.3.1 - Alterações efectuadas ao avental móvel

Como foi verificado em 3.2.7, existem tensões demasiado elevadas no avental móvel. Por esse motivo, foram testadas várias alterações ao modelo inicial. O resultado das alterações foi um aumento do raio nas extremidades do rasgo, um aumento da espessura do avental e a utilização de um material de reforço nas zonas de maior concentração de tensões. Também existem pequenas diferenças no tamanho do rasgo de pressão devidas às alterações efectuadas.

Na Figura 3.32 é apresentada a forma encontrada para o avental móvel depois das alterações efectuadas no sentido de diminuir a concentração de tensões.

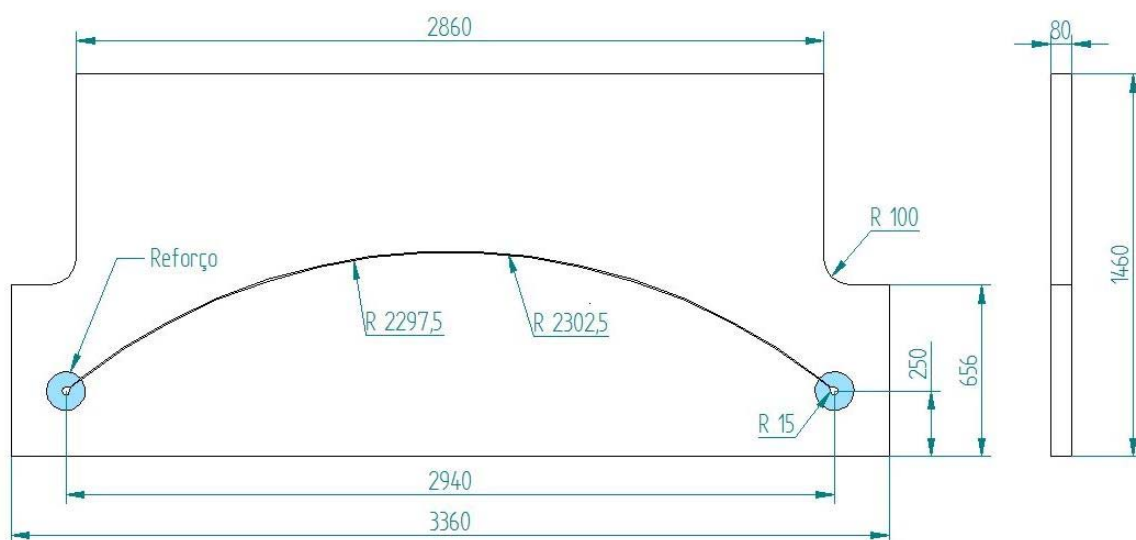


Figura 3.32 - Dimensões do avental móvel (cotas em mm)

Na Figura 3.33 apresentam-se as dimensões dos reforços usados para solucionar o problema das tensões elevadas nos extremos dos rasgos. O material escolhido para os reforços foi o aço CK45 (Tabela 3.16). Para a determinação do raio exterior do reforço foi tido em conta a área onde existem concentrações de tensões elevadas, para que estas sejam apenas exercidas sobre o reforço e não no material menos resistente.



Figura 3.33 - Dimensões do reforço (cotas em mm)

Tabela 3.16 - Características mecânicas do material do reforço

Material	Aço – CK45 – AISI 1045
Módulo de Elasticidade	2,1E+11 N/m ²
Coefficiente de Poisson	0,29
Densidade	7850 kg/m ³
Tensão de Cedência	530 MPa

3.3.2 - Modelo do avental fixo

O modelo do avental fixo foi baseado no estudo desenvolvido para o avental móvel, verificando-se apenas diferenças no que respeita à forma do avental, e condições de fronteira implementadas na sua análise. Essas diferenças vão implicar volumes diferentes no interior dos rasgos de pressão hidráulica. Depois de um estudo para determinar as dimensões do rasgo de pressão hidráulica no avental fixo baseado no rasgo do móvel, chegou-se à geometria apresentada na Figura 3.34.

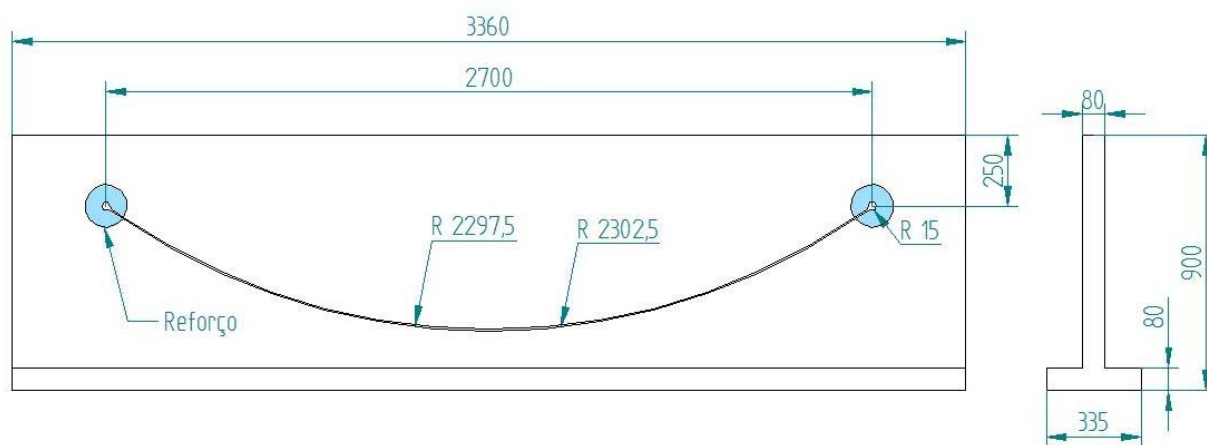


Figura 3.34 - Dimensões do avental fixo (cotas em mm)

Os reforços a serem usados no avental fixo têm as mesmas dimensões dos usados no avental móvel, devido não só a motivos de construção, mas, também, porque a concentração de tensões nos extremos dos rasgos é semelhante.

Na Figura 3.35 podem ser vistas as condições de fronteira consideradas para o avental fixo. A ligação do avental fixo à estrutura da quinadora é feita através de uma ligação soldada do avental aos montantes da máquina. Para reproduzir a ligação soldada foi considerado que as faces de ligação do avental ao montante estão encastradas.

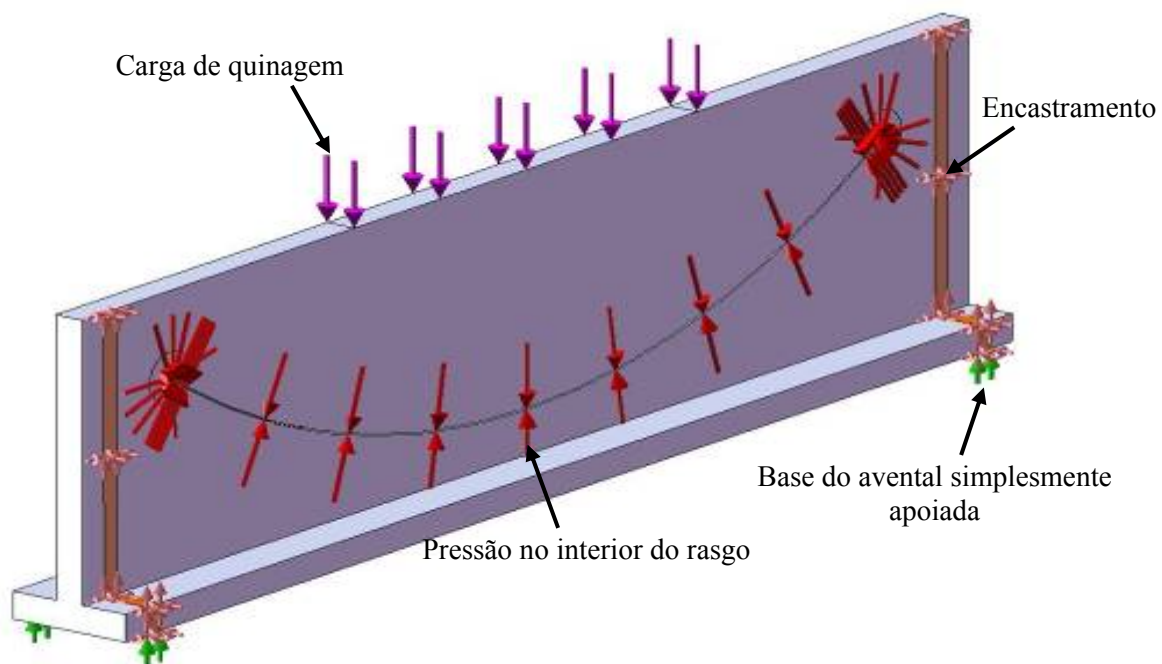


Figura 3.35 - Avental fixo com carga de quinagem e condições de fronteira representadas

As malhas de elementos finitos criadas para os aventais são apresentadas na Figura 3.36. A malha criada para o avental móvel têm 16647 elementos tetraédricos de 4 nós, e a malha do avental fixo, é constituída por 14394 elementos tetraédricos de 4 nós. Os elementos usados nas malhas têm 60mm de lado com uma tolerância de $\pm 3\text{mm}$.

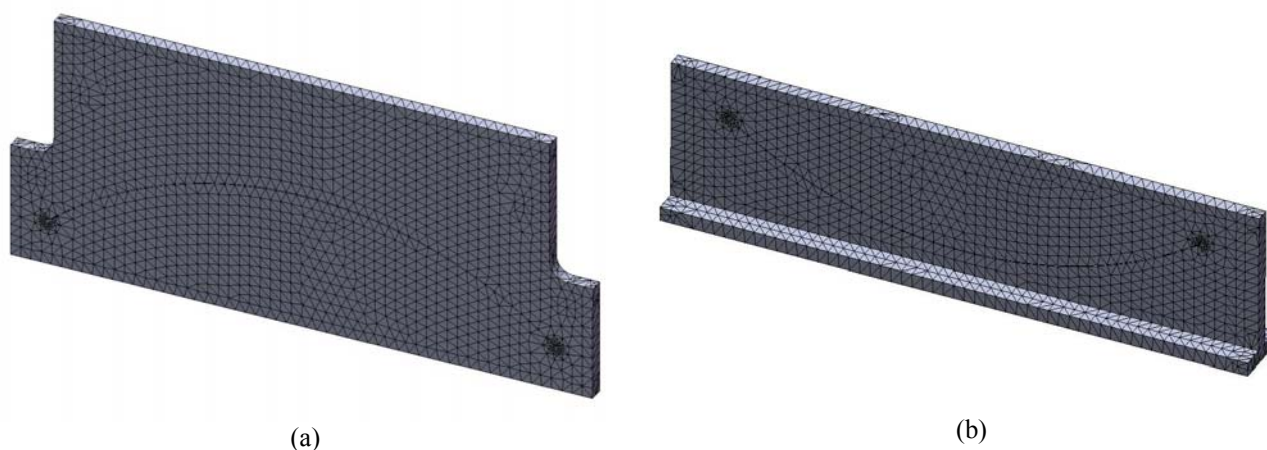


Figura 3.36 - Malhas de elementos finitos: a) Avental móvel; b) Avental fixo

3.3.3 - Resultados obtidos com a modelação dos aventais

Este subcapítulo é dedicado à apresentação de resultados para os modelos desenvolvidos em Cosmos para os aventais da quinadora. Os modelos foram desenvolvidos considerando os mesmos casos de quinagem anteriormente analisados em 3.2. Nas Figuras 3.37 e 3.38 é possível observar os deslocamentos em zz sofridos pelos aventais móvel e fixo, respectivamente, para comprimentos de quinagem de 1,3m e 3m.

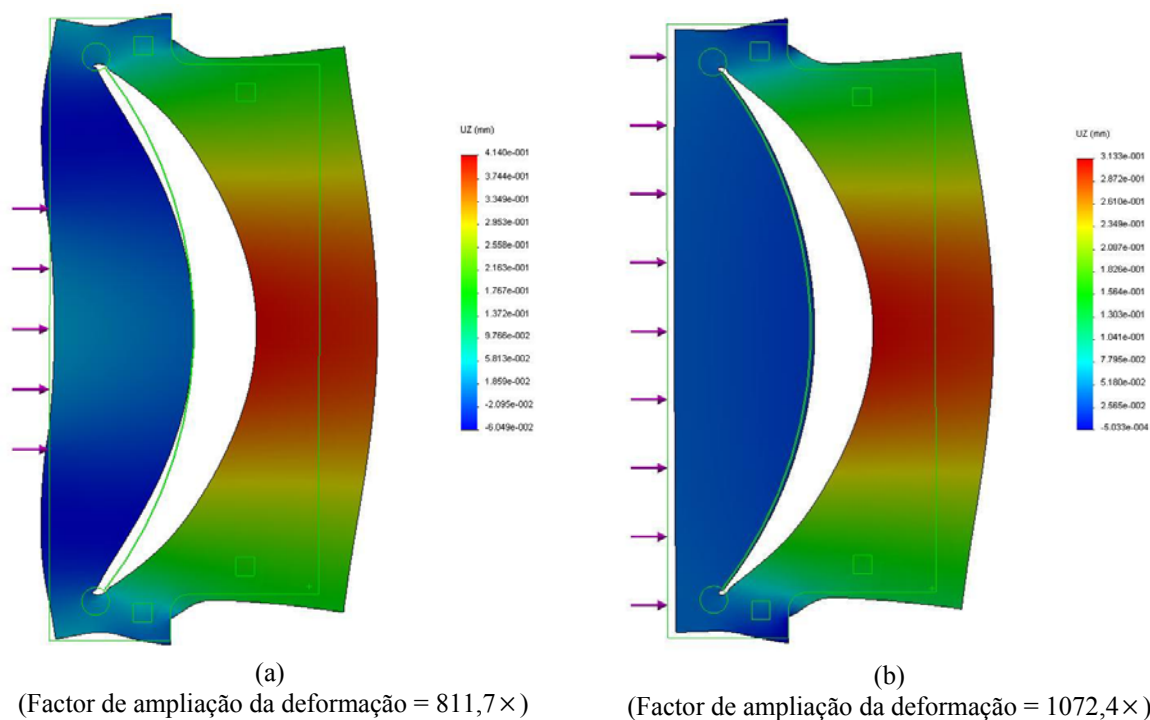


Figura 3.37 - Deslocamentos em zz obtidos no avental móvel para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m

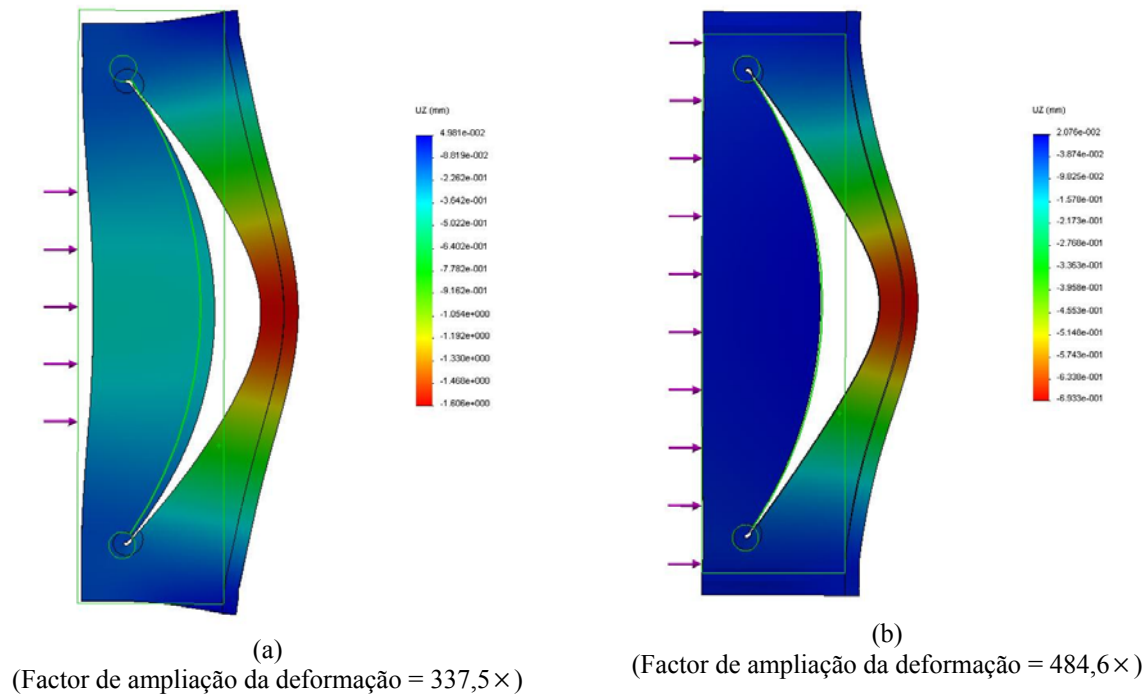


Figura 3.38 - Deslocamentos em zz obtidos no avental fixo para uma carga de 130 toneladas distribuída num comprimento de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m

As tensões máximas de Von Mises verificadas nos modelos foram obtidas, quando estes estão sujeitos a uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m. A tensão de cedência do aço de reforço CK45 é 530MPa. Utilizando um coeficiente de segurança de 2, as tensões não devem ultrapassar o valor de 265MPa. Sendo os valores máximos das tensões de Von Mises registados nos aventais móvel e fixo, respectivamente 263,8MPa e 257,4MPa (Figura 3.39), verificamos que os valores se encontram dentro da margem de segurança.

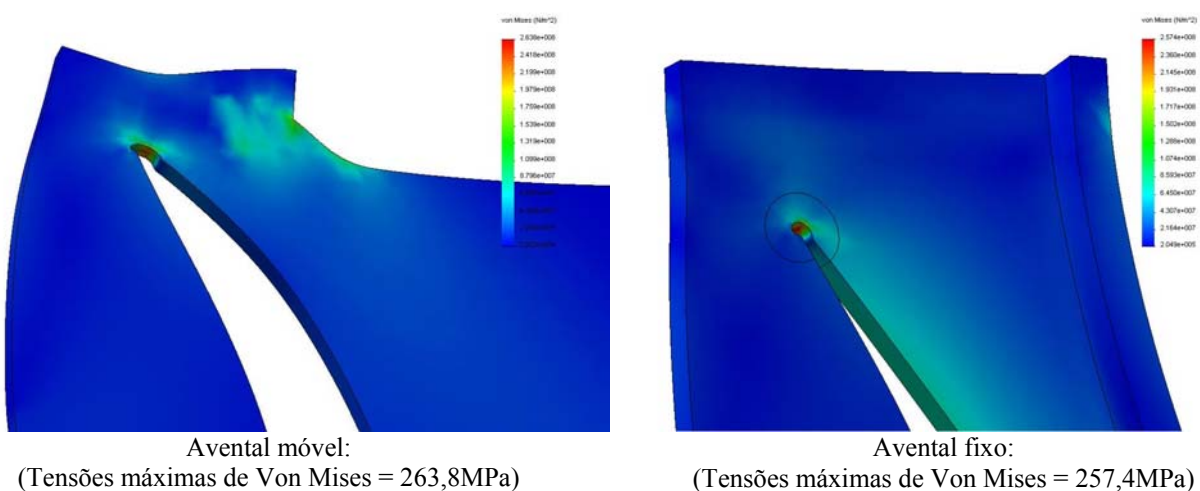


Figura 3.39 - Tensões máximas de Von Mises nos aventais com material de reforço (Aço CK45)

Nas Tabelas 3.17 e 3.18 temos resumido os valores obtidos no avental móvel considerando carga máxima de quinagem. As Tabelas 3.19 e 3.20 são dados os resultados para o avental fixo. São dados os valores dos deslocamentos em zz nos vários comprimentos de quinagem considerados. Encontram-se também incluídos nas tabelas os valores das pressões do interior dos rasgos, necessários para efectuar a correcção das deformações de quinagem. Nos Anexos F e G podem ver vistos os resultados pormenorizados das variações dos deslocamentos em zz para os comprimentos de quinagem dos dois aventais.

Tabela 3.17 - Resultados obtidos para uma carga de 100 toneladas no avental móvel

Resultados para uma carga de 100 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1	0,018831	-0,017355	0,036186	5,8	219,2

Tabela 3.18 - Resultados obtidos para cargas de 130 toneladas no avental móvel

Resultados para cargas de 130 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1,3	0,031123	-0,01861	0,049733	7,4	263,8
1,5	0,023338	-0,024209	0,047547	7,175	254,8
2	0,014321	-0,016728	0,031049	6,75	222,5
2,5	0,0036645	-0,0036091	0,0072736	6,25	188,9
3	0,041806	0,035251	0,006555	5,275	182

Tabela 3.19 - Resultados obtidos para uma carga de 100 toneladas no avental fixo

Resultados para uma carga de 100 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1	0,020687	-0,017249	0,037936	6,2	213,5

Tabela 3.20 - Resultados obtidos para cargas de 130 toneladas no avental fixo

Resultados para cargas de 130 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1,3	0,018618	-0,032332	0,05095	7,7	257,4
1,5	0,023539	-0,024083	0,047622	7,5	247,4
2	0,015314	-0,0064933	0,0218073	6,95	220,8
2,5	0,0030001	-0,0078437	0,0108438	6,2	184,5
3	0,0069559	-0,018708	0,0256639	5,35	151,1

A Figura 3.40 resume todo o andamento dos deslocamentos em zz em função do comprimento de quinagem para a carga máxima. Na Figura 3.41 temos as pressões necessárias no interior dos rasgos dos aventais, para que a compensação de deformações de quinagem seja feita.

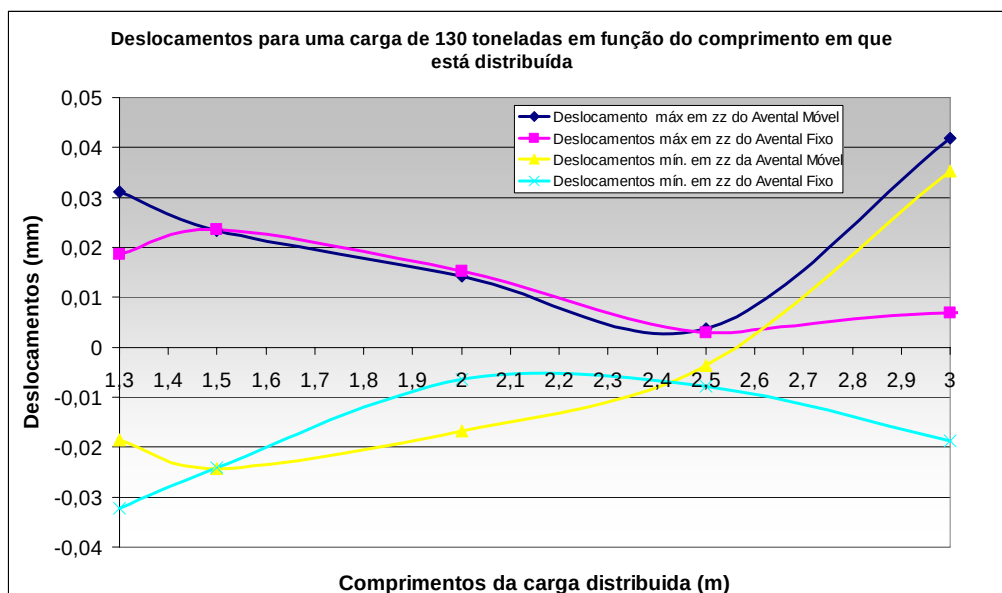


Figura 3.40 - Deslocamentos em zz em função do comprimento de quinagem tendo em conta uma carga de 130 toneladas

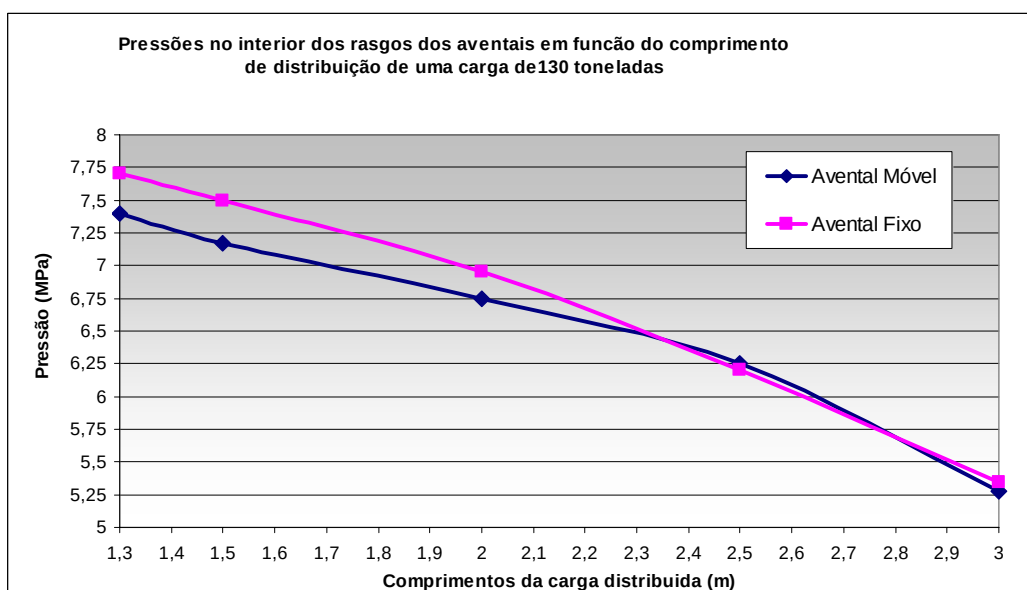


Figura 3.41 - Variações de pressão no interior dos rasgos dos aventais

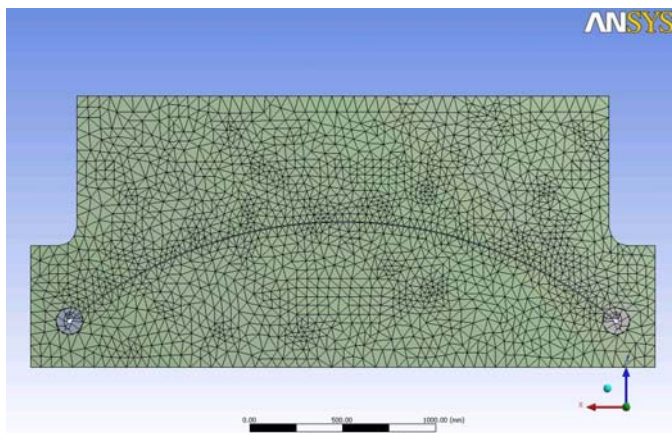
Depois de determinados os deslocamentos máximos dos aventais, tendo em conta a carga máxima de quinagem, foram desenvolvidos modelos com cargas de quinagem mais baixas. O interesse deste estudo reside na importância do conhecimento das variações de pressão e volume no interior dos rasgos, para se efectuar o cálculo do sistema hidráulico capaz de equilibrar as deformações de quinagem. Todos esses valores estão registados nos Anexos H e I.

3.4 - Validação dos modelos desenvolvidos

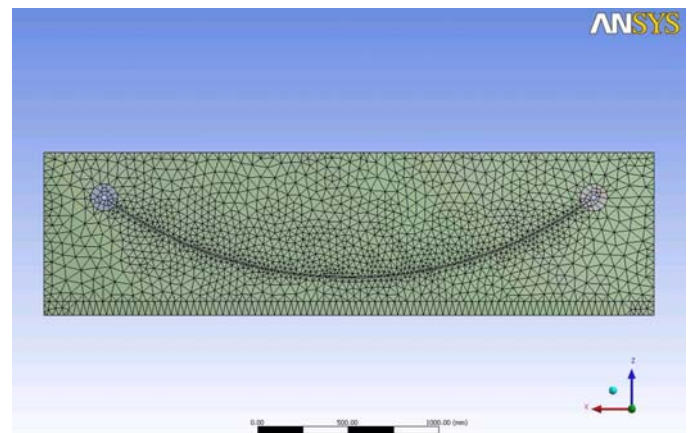
Para verificar os resultados obtidos em Cosmos para os aventais da quinadora foram criados modelos no software de elementos finitos Ansys, com vista a validar os resultados anteriormente obtidos. Para isso, foram criados modelos para o avental móvel e fixo, com carga máxima de quinagem para duas situações distintas. A primeira, para um comprimento de quinagem de 1,3m e a segunda para o comprimento máximo, que corresponde a 3m.

Convém referir que todas as condições de fronteira, solicitações e matérias usados nos modelos desenvolvidos no Ansys mantiveram-se iguais aos anteriormente considerados no Cosmos. No que diz respeito às malhas geradas, no Ansys o tamanho e tipo dos elementos são iguais, mas a configuração das malhas produzidas são ligeiramente diferentes devido às características próprias de cada software.

Na Figura 3.42 são apresentadas as imagens das malhas de elementos finitos criadas para os aventais da quinadora.



(a) - Malha de elementos finitos do avental móvel
(Malha com 15855 elementos tetraédricos de 4 nós)

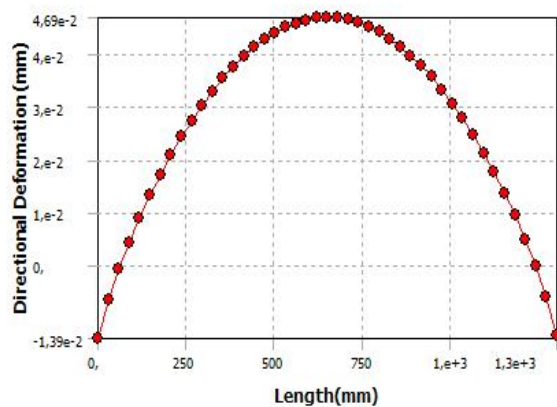


(b) - Malha de elementos finitos do avental fixo
(Malha com 15538 elementos tetraédricos de 4 nós)

Figura 3.42 - Malhas de elementos finitos criadas no Ansys: a) Avental móvel; b) Avental fixo

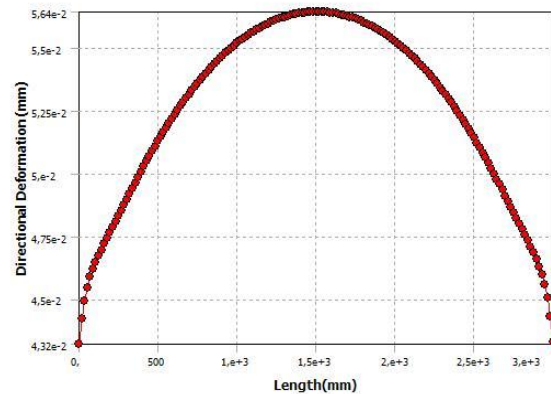
3.4.1 - Resultados obtidos através dos modelos desenvolvidos em Ansys

Na Figura 3.43 é apresentada a variação dos deslocamentos em zz no avental móvel nos comprimentos de quinagem de 1,3m e 3m.



(a)

Deslocamento máx. em zz = 0,046896mm
Deslocamento mín. em zz = -0,013889mm

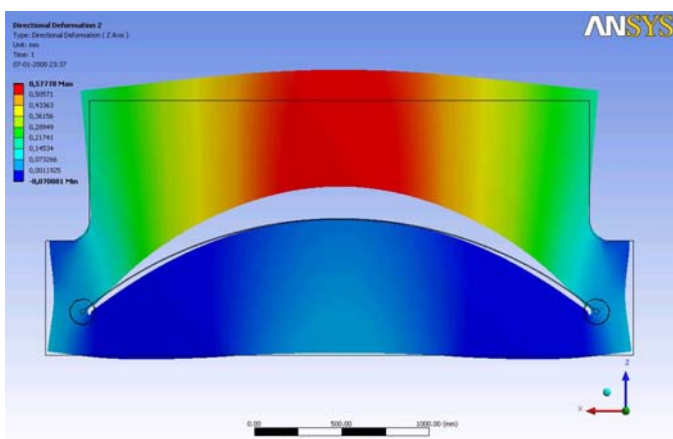


(b)

Deslocamento máx. em zz = 0,05644mm
Deslocamento mín. em zz = 0,043219mm

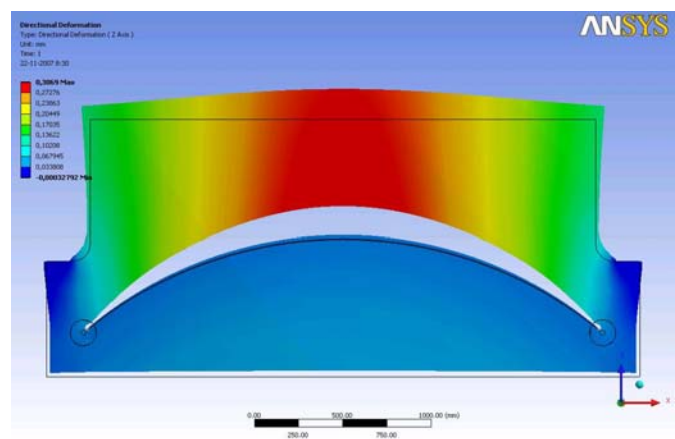
Figura 3.43 - Variação dos deslocamentos em zz no avental móvel em carga máxima para comprimentos de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m

A Figura 3.44 mostra os deslocamentos em zz do avental móvel para comprimentos de quinagem de 1,3m e 3m.



(a)

(Factor de ampliação da deformação = 330×)

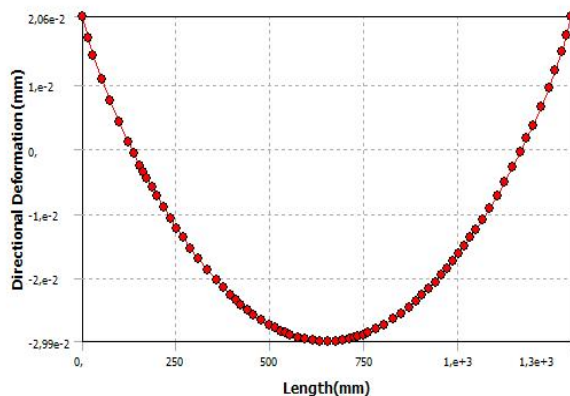


(b)

(Factor de ampliação da deformação = 600×)

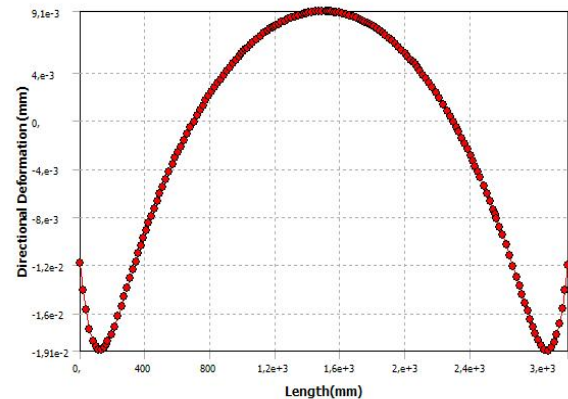
Figura 3.44 - Deslocamentos do avental móvel sujeitos a carga máxima para comprimentos de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m

Na Figura 3.45 são apresentados os resultados da modelação do avental fixo em termos de deslocamentos em zz, para comprimentos de quinagem de 1,3m e 3m em carga máxima.



(a)

Deslocamento máx. em zz = 0,020619mm
Deslocamento mín. em zz = -0,029853mm

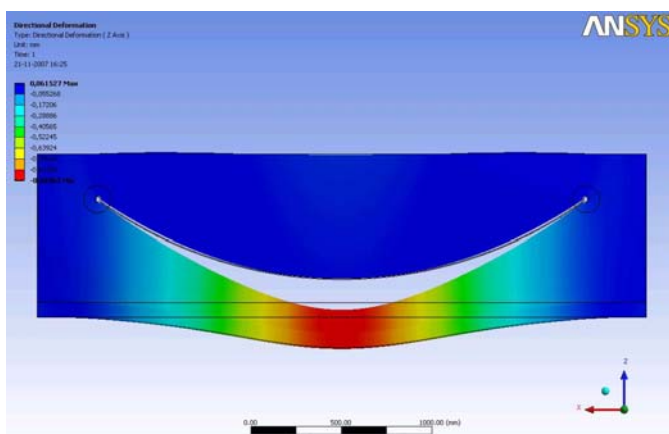


(b)

Deslocamento máx. em zz = 0,0091725mm
Deslocamento mín. em zz = -0,018103mm

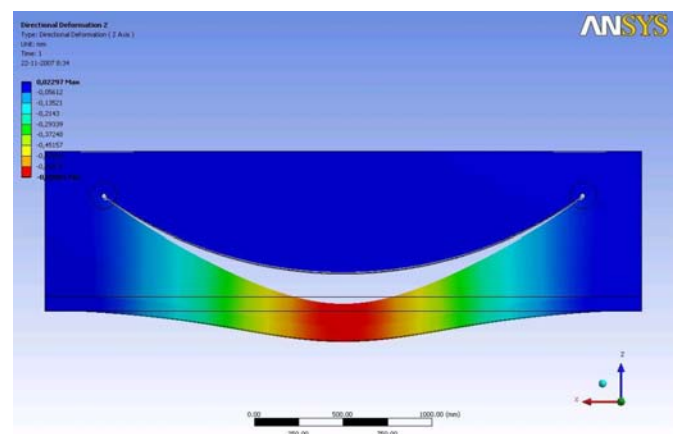
Figura 3.45 - Variação dos deslocamentos em zz no avental fixo em carga máxima para comprimentos de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m

Os deslocamentos em zz do avental fixo para cargas de 130 toneladas distribuída em 1,3m e 3m são apresentados na Figura 3.46.



(a)

(Factor de ampliação da deformação = 180×)



(b)

(Factor de ampliação da deformação = 250×)

Figura 3.46 - Deslocamentos em zz do avental fixo sujeitos a carga máxima para comprimentos de quinagem de: a) 1,3m; b) 3m

Em termos de tensões de Von Mises, estas apresentam o maior valor para o caso em que a carga de quinagem é distribuída num comprimento de 1,3m, como foi verificado nas modelações em Cosmos (Figura 3.47).

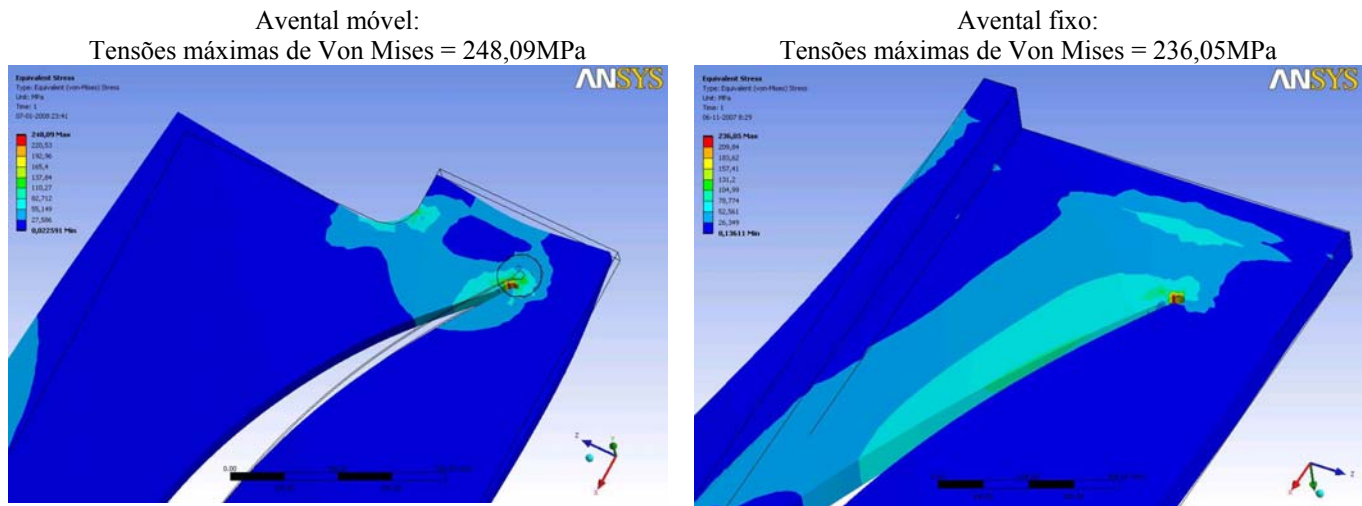


Figura 3.47 - Tensões máximas de Von Mises nos aventais da quinadora obtidas no Ansys

3.4.2 - Comparação dos resultados das modelações em Ansys e Cosmos

Nas Tabelas 3.21 e 3.22 é feita uma comparação dos resultados obtidos em termos de deslocamentos em zz e tensões máximas de Von Mises, para as modelações efectuadas no Ansys e Cosmos. Através destes valores podemos verificar a validade das modelações desenvolvidas em Cosmos.

Tabela 3.21 - Resumo dos deslocamentos e tensões máximas obtidas no Ansys

Modelos desenvolvidos no Ansys						
	Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máximos em zz (mm)	Deslocamento mínimos em zz (mm)	Variação dos deslocamentos em zz Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
Avental Móvel	1,3	0,046896	-0,013889	0,060785	7,4	248,09
	3	0,05644	0,043219	0,013221	5,275	140,33
Avental Fixo	1,3	0,020619	-0,029853	0,050472	7,7	236,05
	3	0,0091725	-0,018103	0,0272755	5,35	139,66

Tabela 3.22 - Resumo dos deslocamentos e tensões máximas obtidas no Cosmos

Modelos desenvolvidos no Cosmos						
	Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máximos em zz (mm)	Deslocamento mínimos em zz (mm)	Variação dos deslocamentos em zz Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
Avental Móvel	1,3	0,031123	-0,01861	0,049733	7,4	263,8
	3	0,041806	0,035251	0,006555	5,275	182
Avental Fixo	1,3	0,018618	-0,032332	0,05095	7,7	257,4
	3	0,0069559	-0,018708	0,0256639	5,35	151,1

Para a validação dos resultados obtidos no Cosmos, foi construída uma tabela comparativa dos erros obtidos em termos de deslocamentos, das modelações em Cosmos, relativamente as modelações em Ansys (Tabela 3.23).

Tabela 3.23 - Erros dos deslocamentos em zz dos modelos efectuados no Cosmos

	Comprimento da carga distribuída (m)	Erro dos deslocamentos máximos em zz (%)	Erro dos deslocamentos mínimos em zz (%)	Erro de Δz (%)
Avental Móvel	1,3	33,63399864	33,99092807	18,1821173
	3	25,92841956	18,43633587	50,4197867
Avental Fixo	1,3	9,70464135	8,304023046	0,947059756
	3	24,16571273	3,341987516	5,908599292

Na análise da Tabela 3.23 temos que atender ao facto que os valores dos erros mais importantes a considerar são os erros da variação do deslocamento em zz, pois são estes os responsáveis pela variação do ângulo de quinagem ao longo do comprimento da chapa. Em termos de variações de deslocamentos, os valores são próximos entre os dois softwares de elementos finitos. Existe apenas um valor não muito aceitável em termos de erro, que é o valor obtido para o avental móvel sujeito a carga máxima distribuída em 3m. Mesmo assim pode ser justificado, devido a factores de escala, visto que se tratam de deslocamentos muito reduzidos, ou diferenças de refinamento entre os softwares usados. No global, os modelos efectuados no Ansys, validam as soluções para a compensação de deformações obtidas no Cosmos.

3.5 - Modelação da quinadora

Depois de determinada a geometria que os aventais da quinadora deverão ter para que seja feita a compensação de deformações, é necessário confirmar se o estudo desenvolvido para os aventais móvel e fixo, tem validade quando comparado com um modelo que inclua a estrutura da quinadora.

A estrutura da quinadora é constituída pelos aventais, montantes, vigas de travamento, vigas de reforço lateral, cilindros hidráulicos e guias do avental móvel. Os restantes componentes têm pouca influência no comportamento da quinadora, e são apenas necessários para o funcionamento da máquina. Na modelação da quinadora, alguns componentes foram ligeiramente simplificados a nível geométrico. Foi também utilizado um plano de simetria no modelo para possibilitar a análise de apenas metade da estrutura, pois possibilita uma modelação mais rápida e com menos custos computacionais. Na Figura 3.48 temos a representação da quinadora utilizada para a modelação.

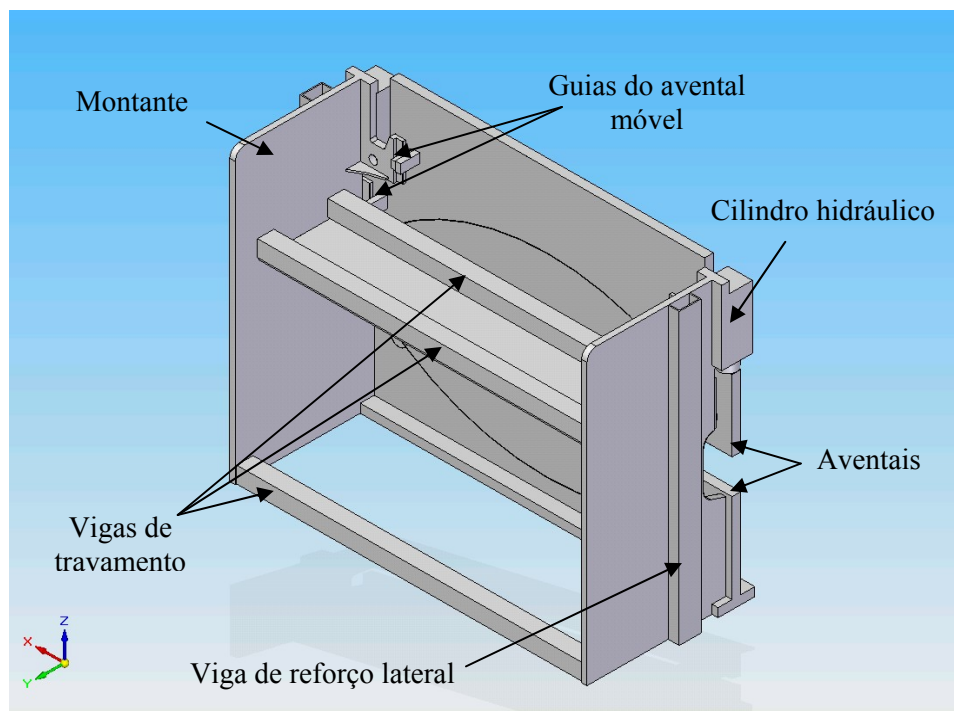


Figura 3.48 - Elementos da quinadora usados na modelação em Cosmos

Na Figura 3.49 é mostrada a implementação das condições de fronteira usadas na modelação da quinadora. Podemos reparar na condição de deslocamento nulo em xx que assegura a condição de simetria no plano de divisão da quinadora.

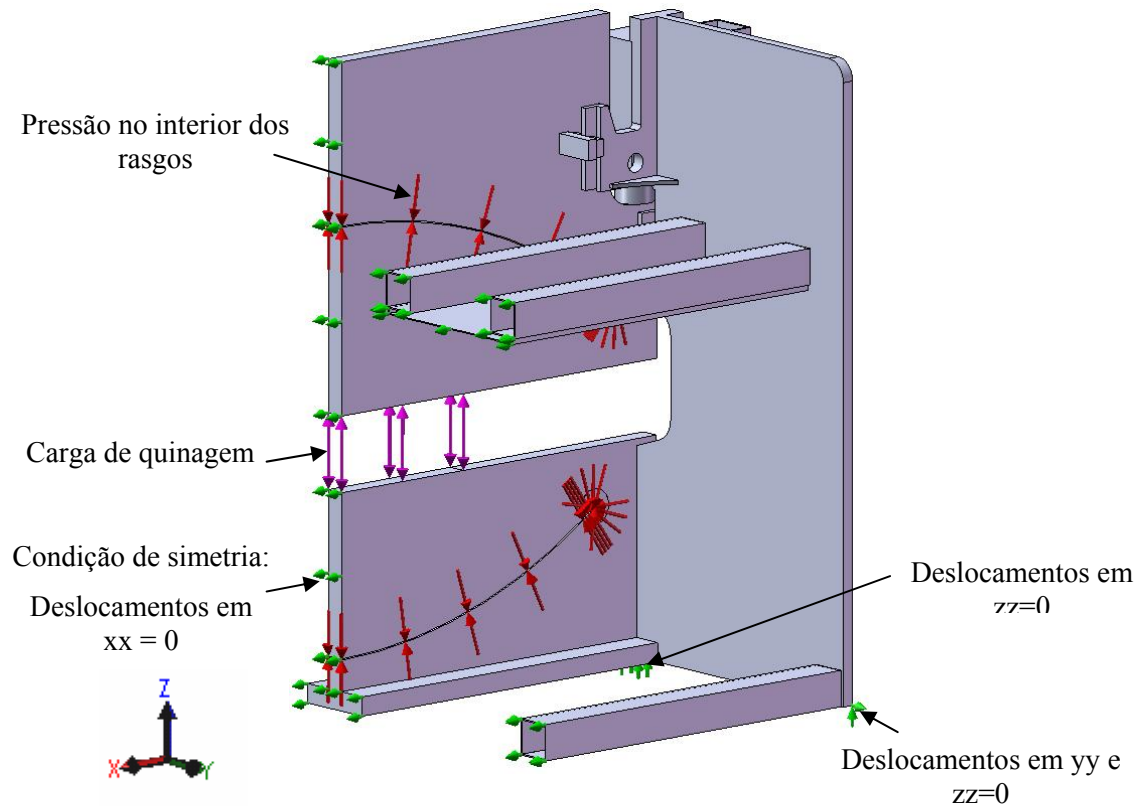


Figura 3.49 - Condições de fronteira usadas para a modelação em Cosmos

Na Figura 3.50 são mostradas as guias do avental móvel, onde foram implementadas condições de não penetração entre as faces dos seus elementos. A condição de não penetração entre elementos, assegura que os elementos se deformem sem penetrarem nos planos onde existem estas condições.

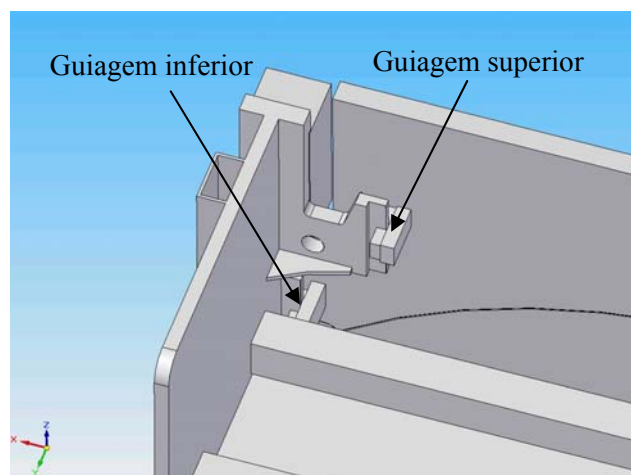


Figura 3.50 - Condições de fronteira entre elementos da guiam do avental móvel

A guiagem superior assegura que o avental móvel não pode deslocar-se na direcção yy. Na guiagem inferior temos um tipo de guiamento que restringe o avental de se deslocar nas direcções xx e yy. Existe também outra condição de não penetração da haste do cilindro hidráulico no avental móvel na direcção de descida deste.

3.5.1 - Modelação 1

A modelação 1 corresponde, a um modelo da quinadora cujos aventais foram desenvolvidos no subcapítulo 3.3. Pretende-se, portanto, verificar se o estudo anteriormente feito em cada avental é valido quando integrado na quinadora.

A malha de elementos finitos criada para a quinadora, tem elementos de malha com tamanho igual às malhas dos modelos anteriormente desenvolvidos para os aventais. A malha criada tem então, 32186 elementos tetraédricos de 4 nós, de $60 \pm 3\text{mm}$ de lado (Figura 3.51).

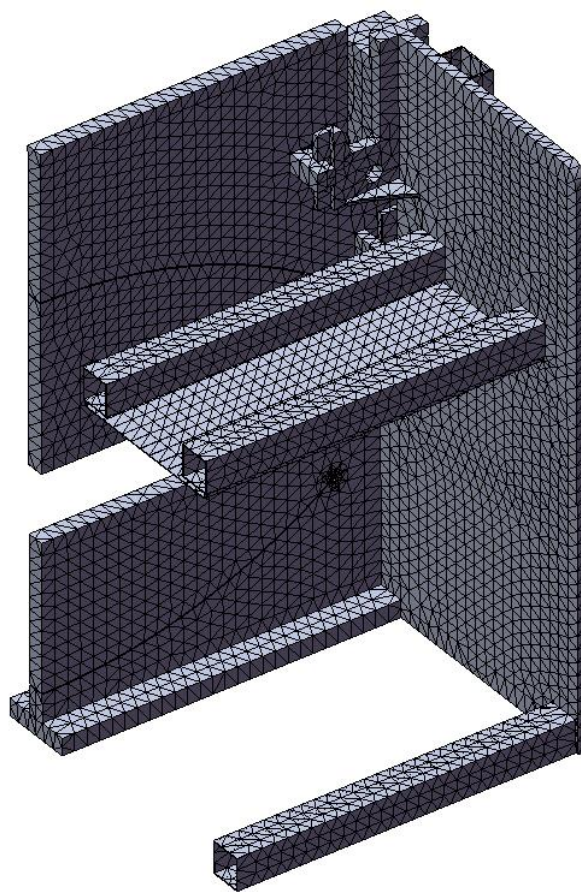


Figura 3.51 - Malha de elementos finitos da quinadora usada na modelação em Cosmos

Depois de definidas todas as condições de fronteira, tipos de ligações entre elementos e solicitações na quinadora, em conformidade com a análise dos modelos anteriores, foram obtidos os valores para deslocamentos máximos e mínimos nos comprimentos de quinagem e tensões máximas de Von Mises em cada avental da quinadora.

Nas Tabelas 6.24 e 6.25 são apresentados os resultados para o avental móvel, nas Tabelas 6.26 e 6.27 são dados os valores obtidos para o avental fixo. Nos Anexos J e K são mostrados os resultados pormenorizados dos deslocamentos em zz nos comprimentos de quinagem dos aventais.

Tabela 3.24 - Resultados obtidos no avental móvel para uma carga de 100 toneladas

Resultados no avental móvel para uma carga de 100 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1	0,61582	0,57282	0,043	5,8	327,92

Tabela 3.25 - Resultados obtidos no avental móvel para cargas de 130 toneladas

Resultados no avental móvel para cargas de 130 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1,3	0,78163	0,72031	0,06132	7,4	410,74
1,5	0,79692	0,73019	0,06673	7,175	388,45
2	0,78596	0,72258	0,06338	6,75	350,17
2,5	0,76522	0,72665	0,03857	6,25	307,4
3	0,82308	0,76647	0,05661	5,275	221,47

Tabela 3.26 - Resultados obtidos no avental fixo para uma carga de 100 toneladas

Resultados no avental fixo para uma carga de 100 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1	-0,24691	-0,31496	0,06805	6,2	389,08

Tabela 3.27 - Resultados obtidos no avental fixo para cargas de 130 toneladas

Resultados no avental fixo para cargas de 130 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1,3	-0,2966	-0,41425	0,11765	7,7	470,12
1,5	-0,26793	-0,4035	0,13557	7,5	451,03
2	-0,19056	-0,36492	0,17436	6,95	399,82
2,5	-0,11904	-0,32962	0,21058	6,2	331,3
3	-0,055559	-0,28951	0,233951	5,35	266

3.5.2 - Comparação dos resultados da modelação 1 em relação aos modelos individuais dos aventais

Com a análise da modelação 1, verificou-se que existem deformações na estrutura da quinadora que são responsáveis por piorar os resultados obtidos em termos de deslocamentos e tensões máximas, relativamente aos resultados obtidos na análise individual dos aventais da quinadora.

Podemos verificar através da Figura 3.52 que existem grandes deformações em termos de flexão nos montantes da quinadora. Estas deformações serão responsáveis, em grande parte, por piorarem os resultados obtidos a nível de compensação de deformações na quinadora.

Nas Tabelas 3.28 e 3.29 podemos comparar os resultados dos modelos individuais dos aventais da quinadora e os resultados do modelo da estrutura da quinadora.

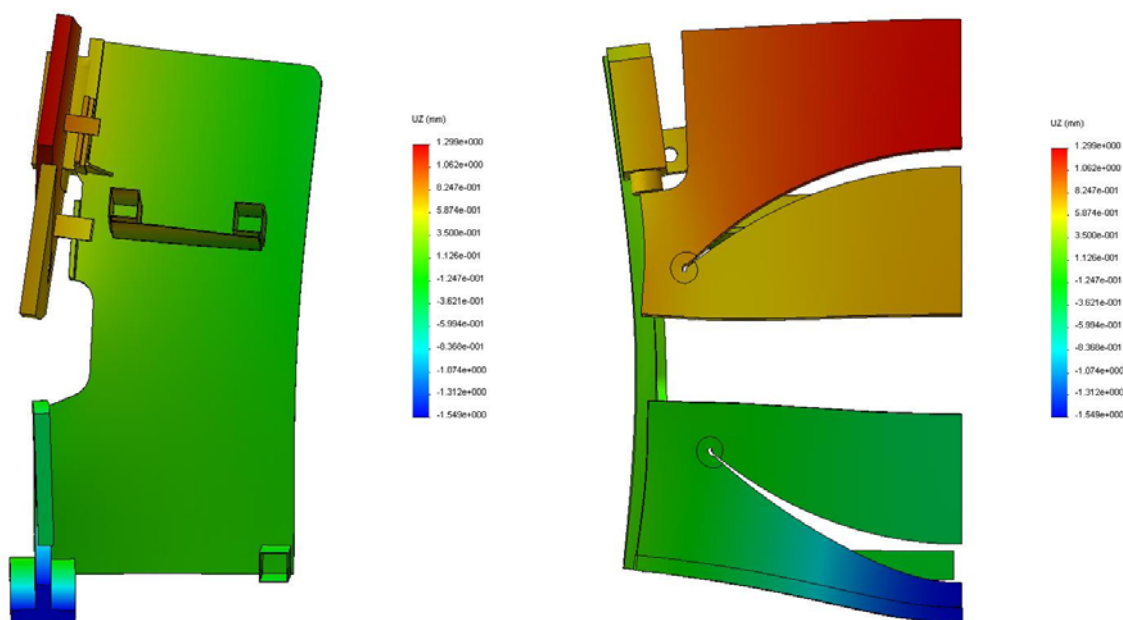


Figura 3.52 - Deslocamentos em zz na quinadora para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m (Factor de ampliação das deformações = 172,77×)

Tabela 3.28 - Comparação dos deslocamentos obtidos em zz através dos modelos da quinadora com os modelos individuais

Variação máxima dos deslocamentos em zz no comprimento de quinagem Δz (mm)				
	Avental móvel		Avental fixo	
Comprimento da carga máxima distribuída (m)	Modelo individual	Modelação 1	Modelo individual	Modelação 1
1	0,036186	0,0430	0,037936	0,06805
1,3	0,049733	0,06132	0,050950	0,11765
1,5	0,047547	0,06673	0,047622	0,13557
2	0,031049	0,06338	0,0218073	0,17436
2,5	0,0072736	0,03857	0,0108438	0,21058
3	0,006555	0,05661	0,0256639	0,233951

Tabela 3.29 - Comparação dos deslocamentos obtidos em zz através dos modelos da quinadora com os modelos individuais

Tensões máx. de Von Mises nos rasgos dos aventais (MPa)				
	Avental móvel		Avental fixo	
Comprimento da carga máxima distribuída (m)	Modelo individual	Modelação 1	Modelo individual	Modelação 1
1	219,2	327,92	213,5	389,08
1,3	263,8	410,74	257,4	470,12
1,5	254,8	388,45	247,4	451,03
2	222,5	350,17	220,8	399,82
2,5	188,9	307,4	184,5	331,3
3	182	221,47	151,1	266

Analisando as tabelas, reparamos que no avental fixo a variação máxima de deslocamentos em zz aumenta significativamente, passando estes da ordem das centésimas para as décimas de milímetro. Isto pode dever-se ao facto das pressões obtidas na compensação de deformações nos modelos individuais do avental fixo, serem pouco correctas.

Nos modelos individuais do avental fixo, foram consideradas condições de fronteira em que na face de ligação entre o avental e os montantes da quinadora são encastradas. O que realmente acontece, como se pode ver na Figura 3.52, é que nos montantes da quinadora existem grandes flexões, o que indica que as condições de fronteira consideradas no modelo individual do avental fixo podem ser pouco rigorosas. Quanto às tensões verificadas nos extremos dos rasgos dos aventais, podemos concluir que são inaceitáveis para o tipo de material de reforço usado nos aventais. Podemos constatar que houve um aumento não só no avental fixo, pelos motivos atrás referidos, mas também no avental móvel.

3.5.3 - Nova modelação individual do avental fixo da quinadora

Com a modelação 1, foi verificado que a modelação individual do avental fixo pode ser pouco rigorosa nas condições de fronteira consideradas. A explicação para esta situação é que o avental fixo tem um comportamento mais semelhante a uma viga simplesmente apoiada, pois o efeito da ligação deste aos montantes é pouco significativo. Para confirmar este aspecto foi feita uma nova modelação do avental fixo, considerando que este está apenas simplesmente apoiado, determinando de novo, as pressões no interior do rasgo que compensam devidamente as deformações de quinagem, e comparar os resultados obtidos com um modelo da quinadora.

As solicitações e condições de fronteira implementadas para o avental fixo foram as seguintes:

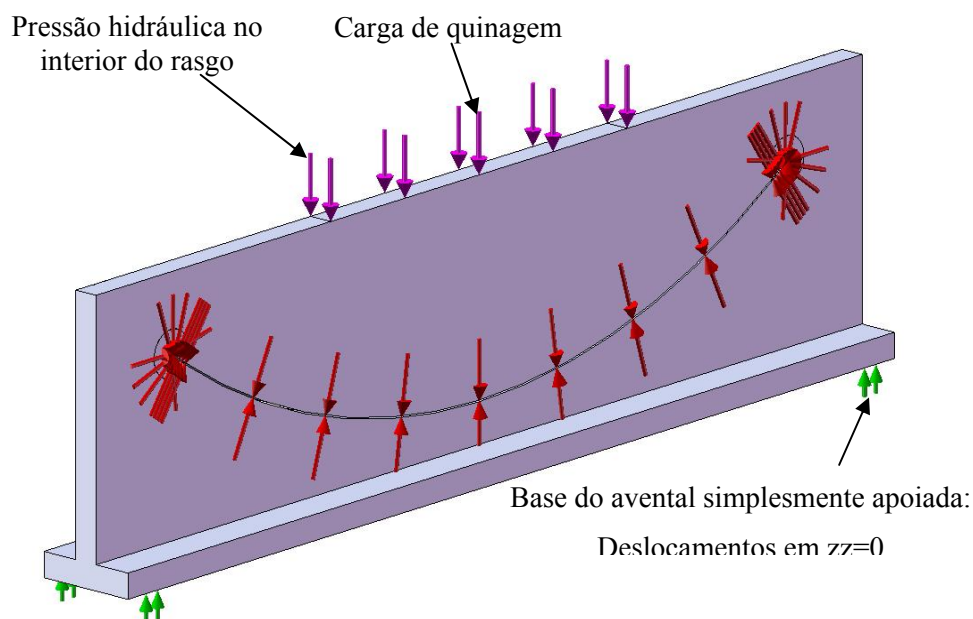


Figura 3.53 - Novas condições de fronteira para o avental fixo

Determinando novamente os valores de pressão que corrigem a deformação sofrida pelo avental fixo, tendo em conta que este se encontra simplesmente apoiado, chegou-se aos resultados apresentados nas Tabelas 3.30 e 3.31.

Tabela 3.30 - Resultados obtidos no avental fixo para uma carga de 100 toneladas

Resultados para uma carga de 100 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1	0,014987	-0,022166	0,037153	7,7	536,7

Tabela 3.31 - Resultados obtidos no avental fixo para cargas de 130 toneladas

Resultados para cargas de 130 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1,3	0,021924	-0,024732	0,046656	9,7	668,8
1,5	0,024608	-0,015069	0,039677	9,5	649,3
2	0,014092	0,010445	0,003647	8,9	592,9
2,5	0,016335	-0,048139	0,064474	8	510,5
3	0,081683	-0,10669	0,188373	7,3	462,3

3.5.4 - Modelação 2

Através da modelação 1 em que a pressão no interior do avental fixo não equilibrava correctamente as deformações de quinagem, procedeu-se novamente à sua modelação, desta vez com as pressões correctas para o avental fixo determinadas no modelo em que o avental é considerado como simplesmente apoiado.

Nas Tabelas 3.32 e 3.33 é possível observar os valores obtidos com a modelação da quinadora para o avental móvel. Nas Tabelas 3.34 e 3.35, são apresentados os resultados para o avental fixo. Nos Anexos L e M são apresentados os resultados pormenorizados dos deslocamentos em zz para os vários comprimentos de quinagem considerados.

Tabela 3.32 - Resultados obtidos no avental móvel para uma carga de 100 toneladas

Resultados do avental móvel para uma carga de 100 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1	0,60802	0,56503	0,04299	5,8	327,76

Tabela 3.33 - Resultados obtidos no avental móvel para cargas de 130 toneladas

Resultados do avental móvel para cargas de 130 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1,3	0,77123	0,70993	0,0613	7,4	410,52
1,5	0,78653	0,71983	0,0667	7,175	388,22
2	0,77581	0,71248	0,06333	6,75	349,96
2,5	0,75585	0,71736	0,03849	6,25	307,2
3	0,81292	0,7564	0,05652	5,275	221,25

Tabela 3.34 - Resultados obtidos no avental fixo para uma carga de 100 toneladas

Resultados do avental fixo para uma carga de 100 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1	0,0045804	-0,035762	0,0403424	7,7	544,27

Tabela 3.35 - Resultados obtidos no avental fixo para cargas de 130 toneladas

Resultados do avental fixo para cargas de 130 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1,3	0,01207	-0,041992	0,054062	9,7	676,94
1,5	0,018374	-0,031219	0,049593	9,5	657,86
2	0,015538	-0,0019625	0,0175005	8,9	601,32
2,5	0,0054138	-0,025806	0,0312198	8	517,07
3	0,07346	-0,054335	0,127795	7,3	467,14

Nas Tabelas 3.36 e 3.37 temos a comparação dos resultados obtidos através dos modelos individuais dos aventais e a modelação 2 da quinadora.

Analisando os valores que comparam os modelos desenvolvidos, podemos dizer que os modelos individuais dos aventais têm valores próximos da modelação 2, confirmando-se que o avental fixo pode ser considerado como simplesmente apoiado.

Tabela 3.36 - Comparação dos resultados obtidos através dos modelos individuais dos aventais e a modelação 2 em termos de variação máxima dos deslocamentos em zz

Variação máxima dos deslocamentos em zz no comprimento de quinagem Δz (mm)						
	Avental móvel			Avental fixo		
Comprimento da carga máxima distribuída (m)	Modelo individual	Modelação 2	Erros do modelo individual relativamente a modelação 2 (%)	Modelo individual (simplesmente apoiado)	Modelação 2	Erros do modelo individual relativamente a modelação 2 (%)
1	0,036186	0,04299	15,83	0,037153	0,0403424	7,91
1,3	0,049733	0,0613	18,87	0,046656	0,054062	13,70
1,5	0,047547	0,0667	28,72	0,039677	0,049593	20,00
2	0,031049	0,06333	50,97	0,003647	0,0175005	79,16
2,5	0,0072736	0,03849	81,10	0,064474	0,0312198	106,52
3	0,006555	0,05652	88,40	0,188373	0,127795	47,40

Tabela 3.37 - Comparação dos resultados obtidos através dos modelos individuais dos aventais e a modelação 2 em termos tensões máximas de Von Mises

Tensões máximas de Von Mises nos rasgos dos aventais (MPa)						
	Avental móvel			Avental fixo		
Comprimento da carga máxima distribuída (m)	Modelo individual	Modelação 2	Erros do modelo individual relativamente a modelação 2 (%)	Modelo individual (simplesmente apoiado)	Modelação 2	Erros do modelo individual relativamente a modelação 2 (%)
1	219,2	327,76	33,12	536,7	544,27	1,39
1,3	263,8	410,52	35,74	668,8	676,94	1,20
1,5	254,8	388,22	34,37	649,3	657,86	1,30
2	222,5	349,96	36,42	592,9	601,32	1,40
2,5	188,9	307,2	38,51	510,5	517,07	1,27
3	182	221,25	17,74	462,3	467,14	1,04

Constata-se, facilmente, que tanto nas extremidades dos rasgos do avental móvel como no avental fixo a tensão máxima admissível do material de reforço, que é de 265MPa, é substancialmente ultrapassada. Na Figura 3.54 temos uma representação da zona do avental fixo onde as tensões são superiores a esse valor, a figura diz respeito à situação de carga máxima de quinagem distribuída num comprimento de quinagem de 1,3m. Na Figura 3.55 temos os deslocamentos em zz obtidos para esse caso de carga.

Quanto a tensões obtidas, verificamos que existem maiores erros para os modelos do avental móvel do que nos modelos do fixo. Que podem dever-se a deformações dos montantes da quinadora que não são contabilizadas nos modelos individuais.

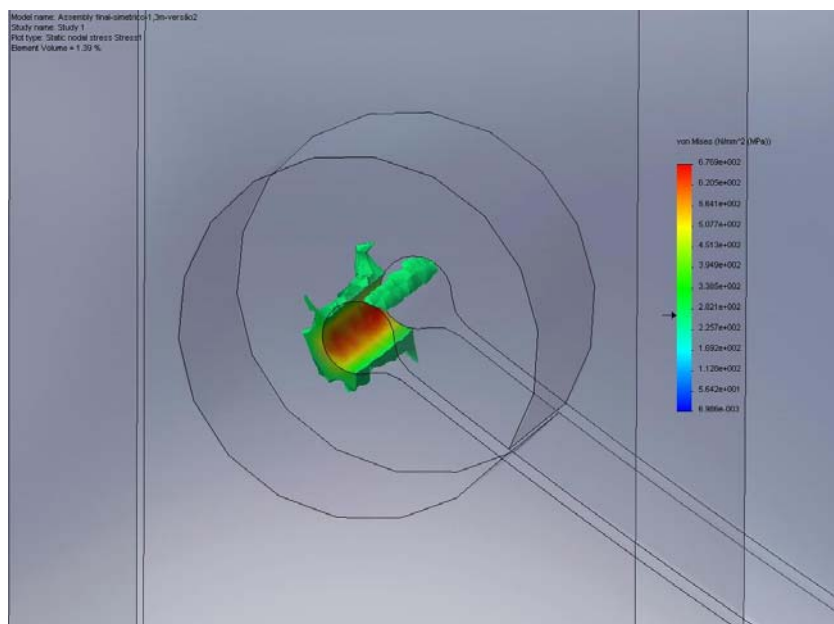


Figura 3.54 - Zona de tensões superiores a 265MPa na quinadora, para uma carga de quinagem de 130 toneladas distribuída em 1,3m

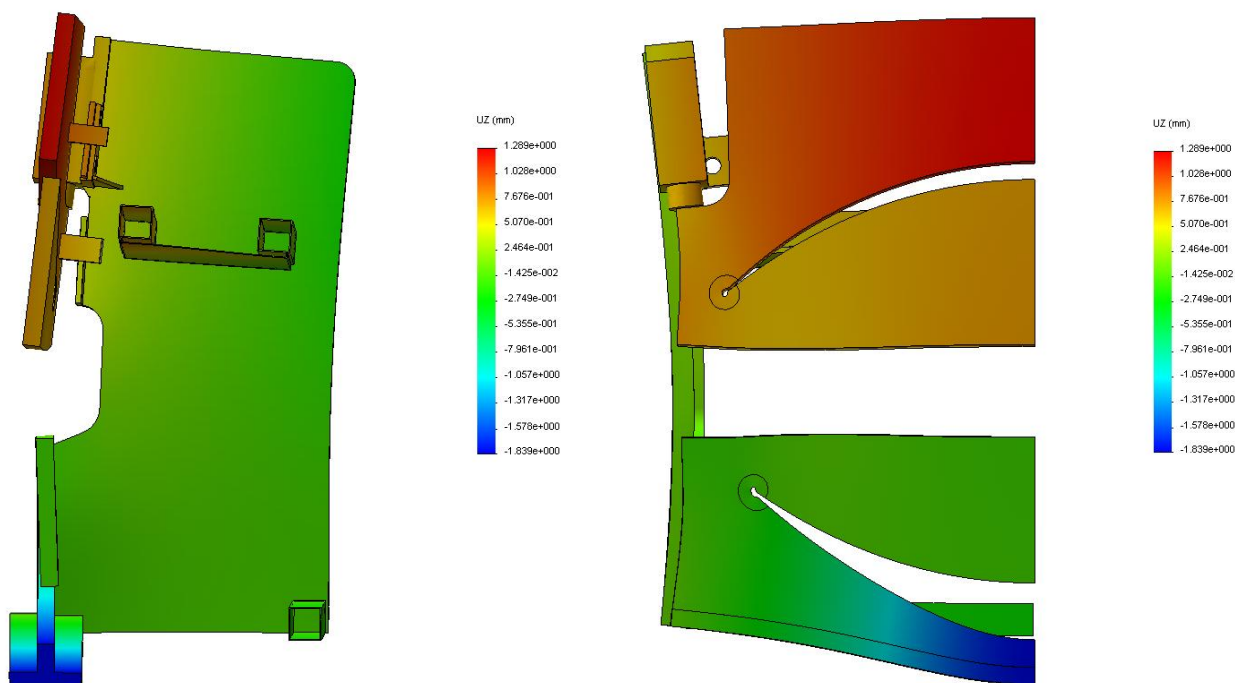


Figura 3.55 - Deslocamentos em zz na quinadora para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m (Factor de ampliação das deformações = 145,54 ×)

A Figura 3.56 resume todo o andamento dos deslocamentos em zz em função do comprimento de quinagem para a carga máxima. Na Figura 3.57 temos a pressão necessária no interior dos rasgos para que a compensação de deformações seja feita.

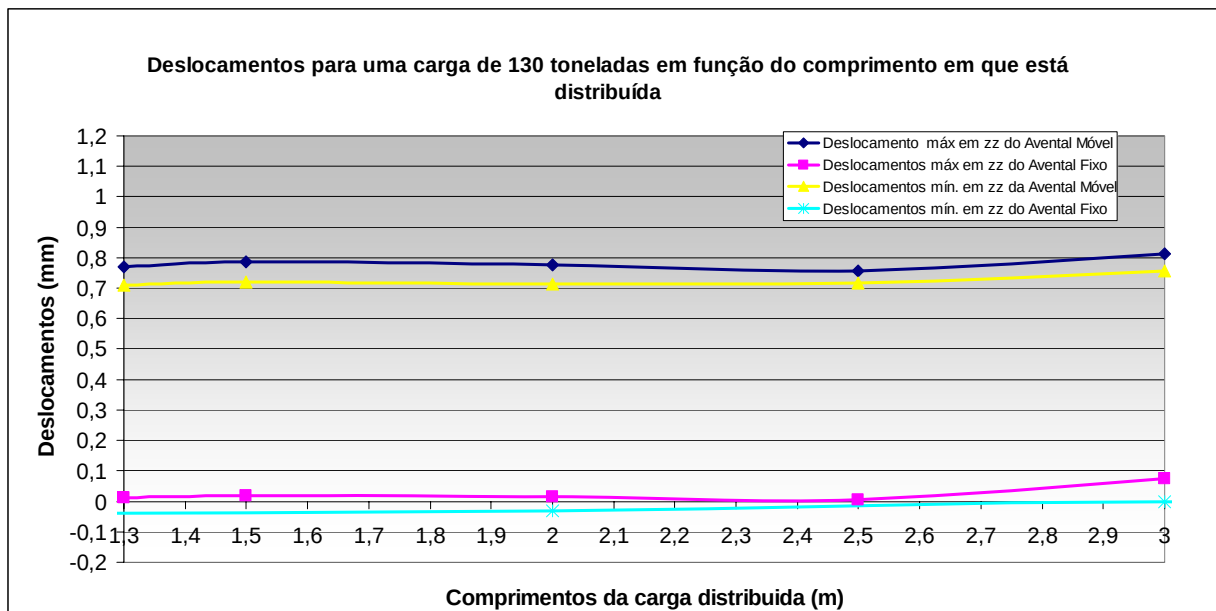


Figura 3.56 - Deslocamentos em zz em função do comprimento de quinagem para cargas de 130 toneladas

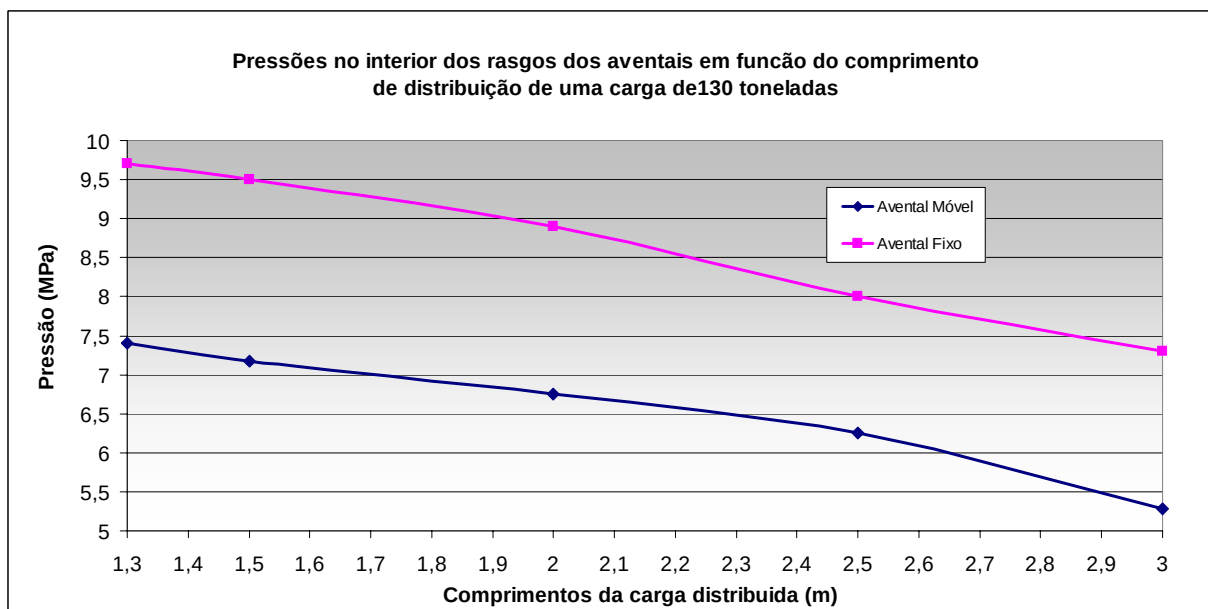


Figura 3.57 - Variação da pressão no interior dos rasgos dos aventais em função do comprimento de quinagem para cargas de 130 toneladas

3.5.5 - Modelação 3

Como foi verificado na modelação 1 e 2, existem tensões demasiado elevadas nas extremidades dos rasgos dos aventais. É, portanto, necessário efectuar alterações às geometrias dos rasgos dos aventais da quinadora de modo a que as tensões diminuam consideravelmente. Foram para isso, novamente, criados modelos individuais em elementos finitos dos aventais móvel e fixo da quinadora, e determinadas as geometrias apropriadas para os rasgos de pressão hidráulica. As principais alterações às geometrias dos rasgos dos aventais basearam-se na diminuição do comprimento dos rasgos, e num aumento do raio nos seus extremos. Nas Figuras 3.58 e 3.59 temos a representação das geometrias determinadas para os aventais móvel e fixo, respectivamente.

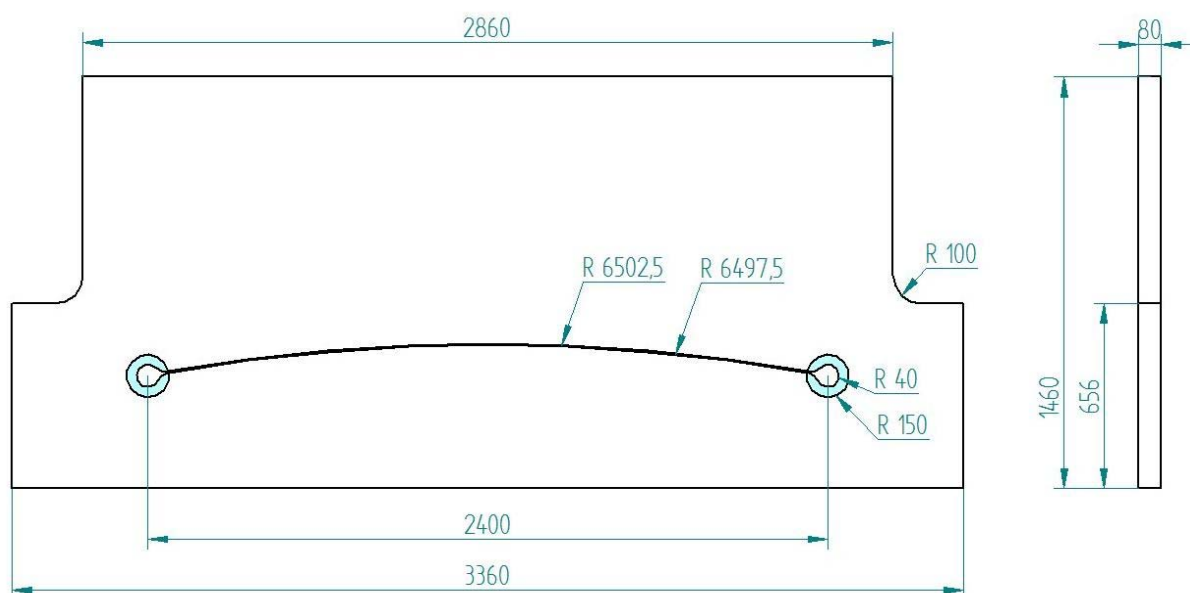


Figura 3.58 - Geometria final do avental móvel (Cotas em mm)

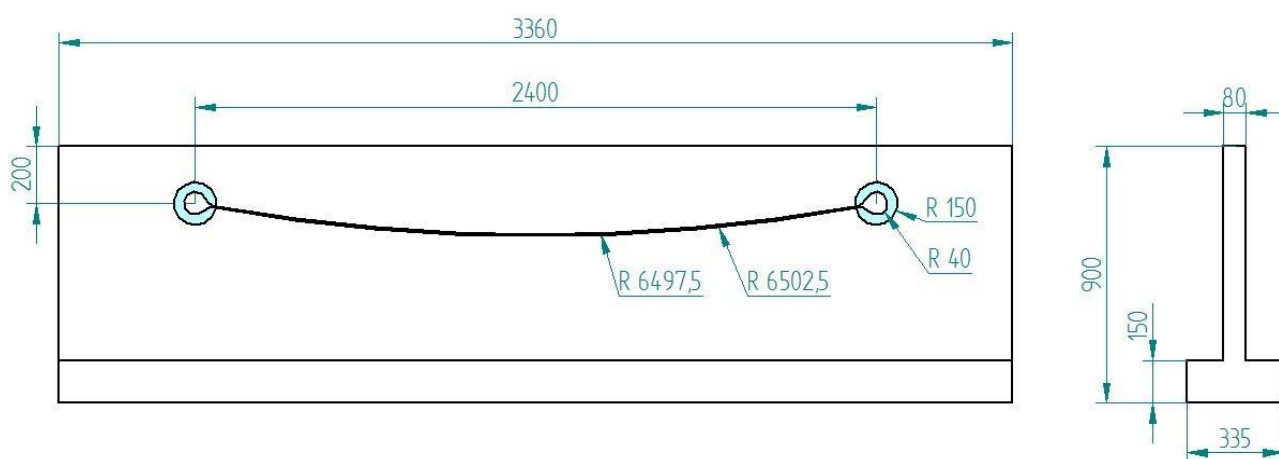


Figura 3.59 - Geometria final do avental fixo (Cotas em mm)

Depois de determinada a geometria dos aventais procedeu-se a uma nova modelação da quinadora. Todas as solicitações e condições de fronteiras tidas em conta anteriormente foram mantidas iguais relativamente a esta nova modelação.

A malha de elementos finitos gerada para este modelo contém 32880 elementos tetraédricos de 4 nós, com $60 \pm 3\text{mm}$ de lado (Figura 3.60).

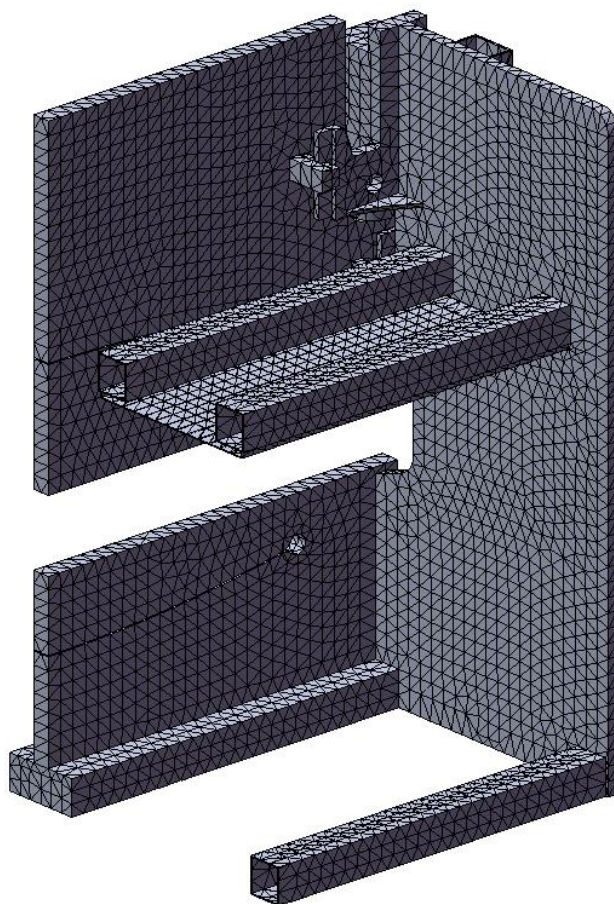


Figura 3.60 - Malha de elementos finitos da modelação da quinadora

Depois de criado o modelo da quinadora, foram determinadas as variações de deslocamentos em zz (direcção de penetração do punção na matriz) para vários comprimentos de quinagem. Nas Tabelas 3.38 e 3.39 temos os resultados obtidos para o avental móvel. As Tabelas 3.40 e 3.41 dizem respeito aos resultados do avental fixo.

Os resultados pormenorizados dos deslocamentos em zz para os comprimentos de quinagem considerados podem ser vistos nos Anexos N e O.

Tabela 3.38 - Resultados obtidos no avental móvel para uma carga de 100 toneladas

Resultados para uma carga de 100 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1	0,55705	0,52786	0,02919	7,85	180,67

Tabela 3.39 - Resultados obtidos no avental móvel para cargas de 130 toneladas

Resultados para cargas de 130 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1,3	0,73309	0,71009	0,023	9,7	214,48
1,5	0,73434	0,72784	0,0065	9,35	202,06
2	0,77766	0,72598	0,05168	8,42	171,1
2,5	0,81961	0,7376	0,08201	7,3	136,02
3	0,82649	0,75363	0,07286	6,2	109,28

Tabela 3.40 - Resultados obtidos no avental fixo para uma carga de 100 toneladas

Resultados para uma carga de 100 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1	0,071388	-0,042645	0,114033	7,96	208,74

Tabela 3.41 - Resultados obtidos no avental fixo para cargas de 130 toneladas

Resultados para cargas de 130 toneladas					
Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1,3	0,085069	-0,033203	0,118272	9,85	247,22
1,5	0,060068	-0,014562	0,07463	9,47	229,32
2	0,064806	-0,029655	0,094461	8,42	183,2
2,5	0,17345	-0,10025	0,2737	7,3	146,44
3	0,11303	-0,10022	0,21325	6,1	114,44

Na Figura 3.61 temos representado os deslocamentos em zz na quinadora para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m.

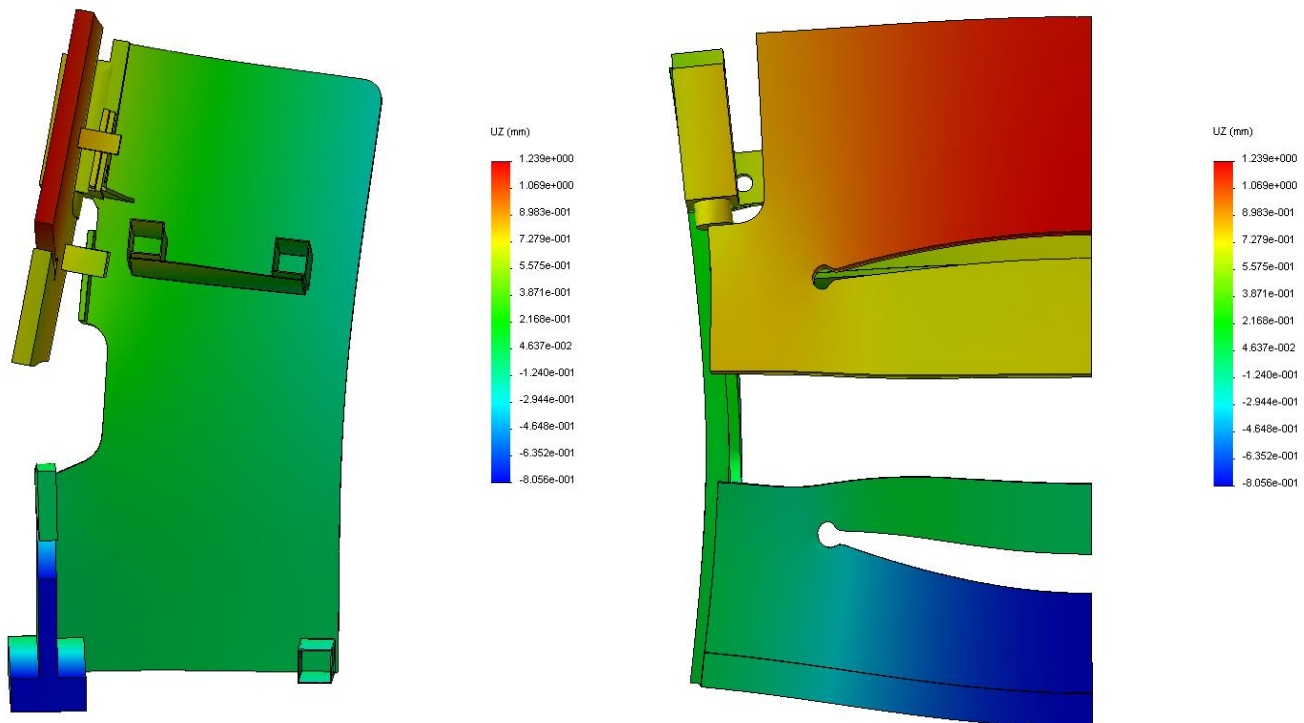


Figura 3.61 - Deslocamentos em zz na quinadora para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m (Factor de ampliação das deformações = 215,96 $\times$)

A tensão máxima a que a quinadora esta sujeita é de 247,22MPa e encontra-se localizada no interior do reforço do avental fixo. Como o material de reforço dos aventais pode suportar tensões até 265MPa, as tensões estão dentro dos limites de segurança.

Na Figura 3.62 temos a representação da região no avental fixo com tensões superiores à tensão máxima admissível para o aço da estrutura da quinadora, 160MPa. Podemos comprovar que as tensões superiores a esse valor estão circunscritas ao interior do reforço do avental que suporta tensões até 265MPa. O mesmo acontece para o avental móvel, sendo as tensões ainda mais baixas. Podemos concluir que a solução encontrada para os rasgos dos aventais da quinadora é segura em termos estruturais.

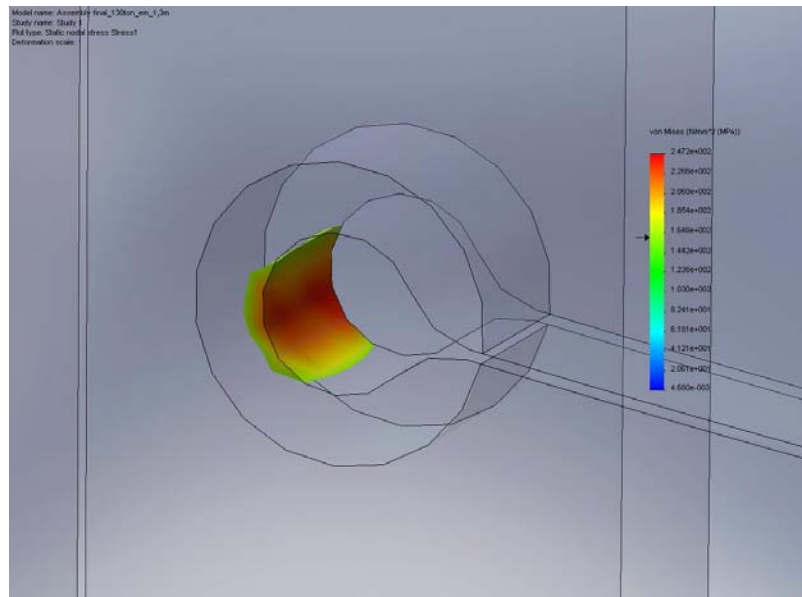


Figura 3.62 - Zona de tensões superiores a 160MPa no reforço do avental fixo, para uma carga de quinagem de 130 toneladas distribuída em 1,3m

No Figura 3.63 resumem-se os valores de deslocamentos em zz obtidos, em função do comprimento de quinagem para a carga máxima. A Figura 3.64 mostra a pressão necessária no interior dos rasgos para que a compensação de deformações seja feita. Podemos reparar que a pressão no interior dos dois rasgos é muito semelhante, o que pode ser útil para a simplificação do sistema hidráulico da quinadora.

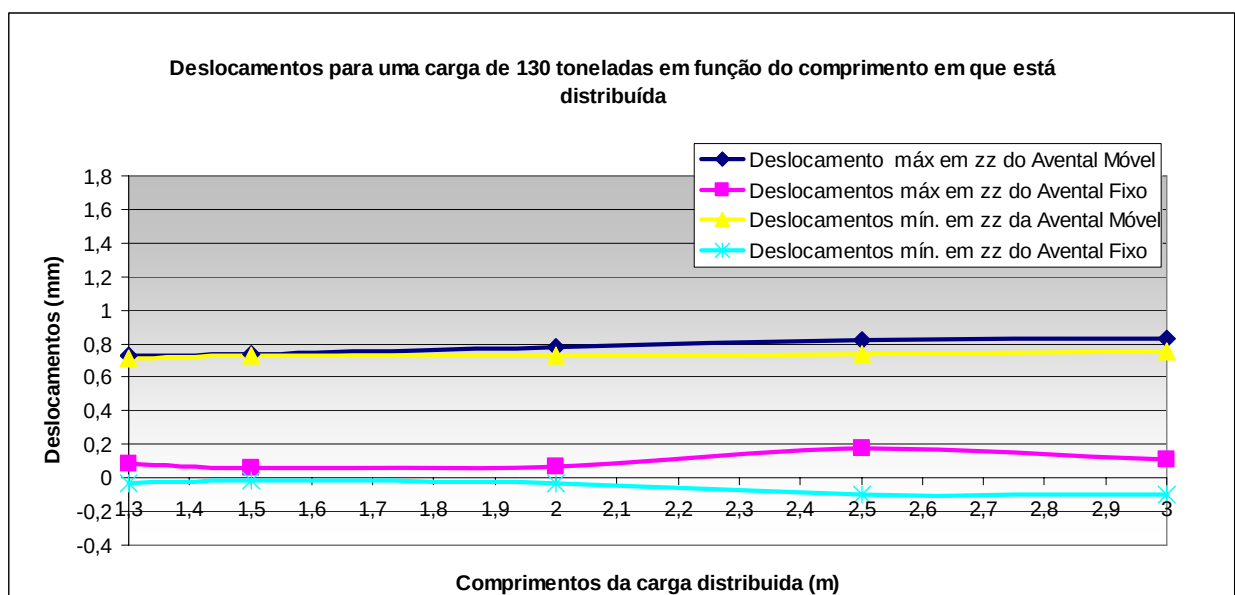


Figura 3.63 - Deslocamentos em zz em função do comprimento de quinagem tendo em conta uma carga de 130 toneladas

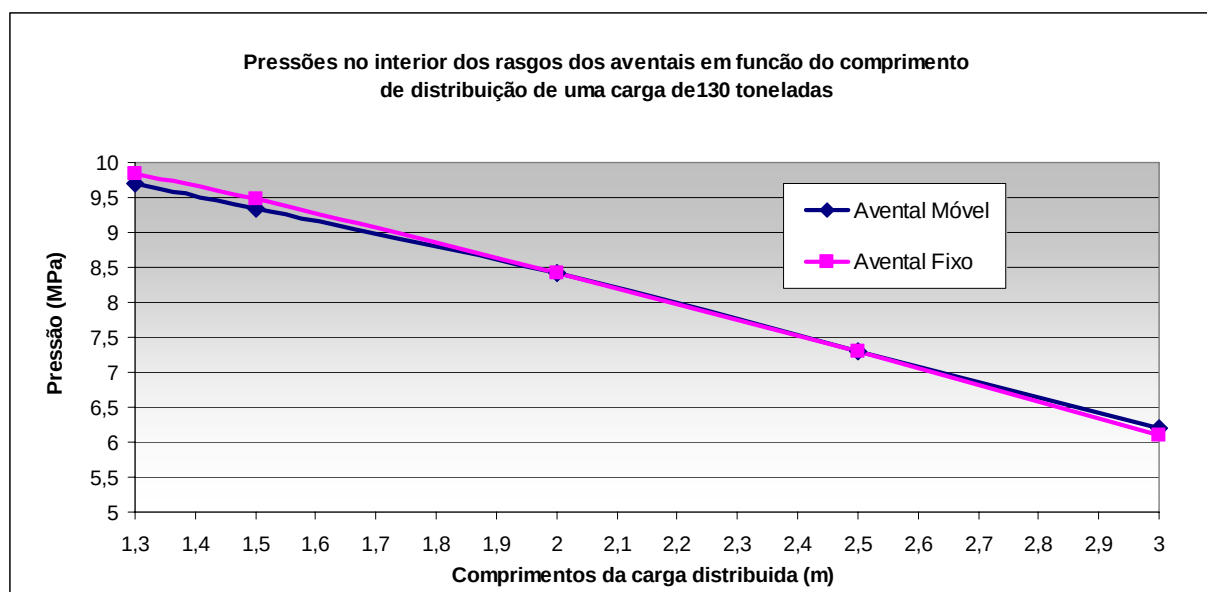


Figura 3.64 - Variação da pressão no interior dos rasgos dos aventais em relação aos comprimentos de quinagem em carga máxima

3.5.6 - Modelação da quinadora com ferramentas de quinagem

Depois de uma análise sobre as deformações dos modelos da quinadora foi decidido fazer algumas alterações ao modelo da quinadora, com vista a uma melhor tradução do comportamento da quinadora. Foi feita a inclusão de algumas ferramentas da quinadora, como a mesa, a matriz e o punção.

Na realidade, o punção quando está a quinar uma chapa tem tendência a provocar uma reacção na matriz, porque os montantes ao sofrerem flexão obrigam o punção a deslocar-se na direcção perpendicular ao plano dos aventais (Figura 3.65 (a)). No modelo anterior esta reacção não foi contabilizada. Outra diferença deste novo modelo, é que a carga de quinagem ao invés de ser aplicada nos aventais, como era feita nos modelos anteriores, é aplicada nos cilindros hidráulicos tornando o modelo mais realista (Figura 3.65 (b)).

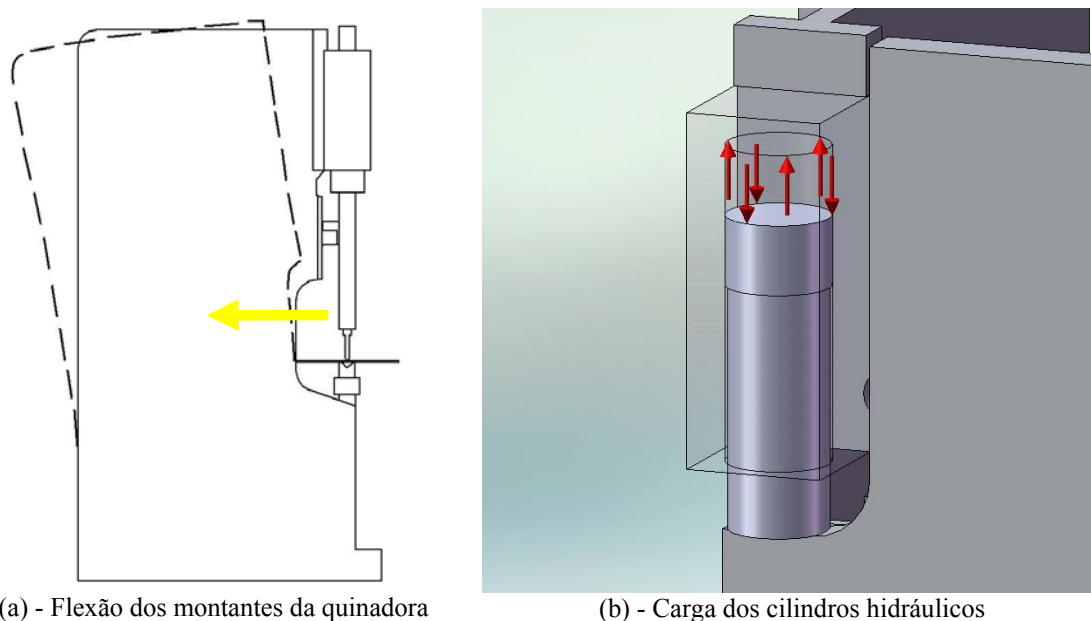


Figura 3.65 - Diferenças entre os modelos efectuados das quinadoras

Outra diferença a salientar entre os dois modelos efectuados, é que no modelo anterior desenvolvido os apoios onde está assente a quinadora não permitem que ela tenha movimentos em zz. Na realidade, o que acontece é que uma quinadora pode ter movimentos no sentido positivo do eixo zz.

Por exemplo, quando se efectuam quinagens descentradas do centro da máquina, existem esforços de torção na estrutura da quinadora responsáveis por o levantamento de um apoio da quinadora. Neste novo modelo desenvolvido é permitido deslocamentos no sentido positivo do eixo zz nos apoios.

Nesta nova modelação da quinadora foram geradas várias malhas de elementos finitos, uma por cada comprimento de quinagem em estudo. Podemos ver na Tabela 3.42 o número de elementos finitos usados nos modelos e na Figura 3.66 a malha de elementos finitos criada para um comprimento de quinagem de 1,3m.

Tabela 3.42 - Malhas de elementos finitos criadas

Comprimento da carga distribuída (m)	Numero de elementos finitos (Elementos tetraédricos de 4 nós, com de $60 \pm 3\text{mm}$ de lado)
1	34674
1,3	34818
1,5	35004
2	35364
2,5	35628
3	36181

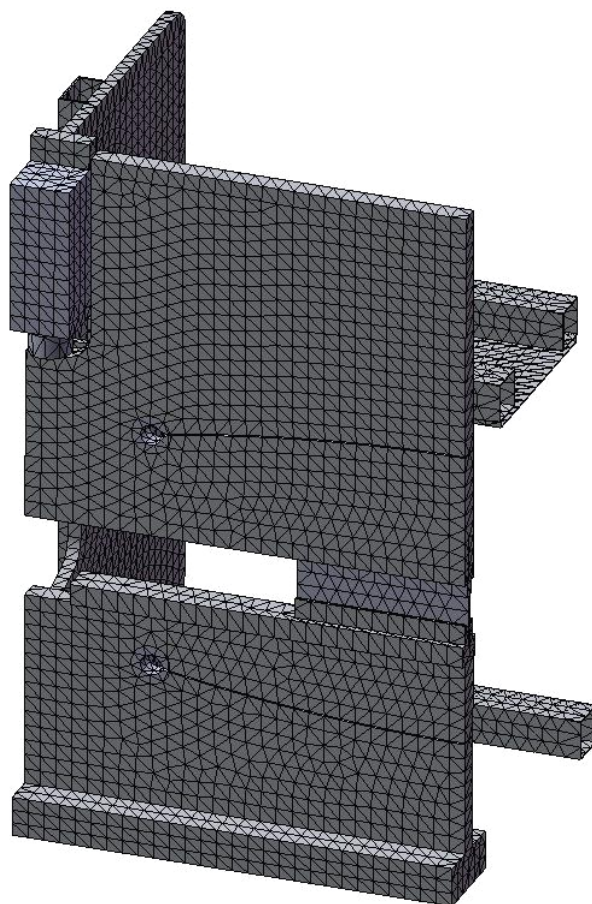


Figura 3.66 - Malha de elementos finitos para um comprimento de quinagem de 1,3m

Nas Tabelas 3.43 e 3.44 podemos ver os resultados das modelações efectuadas.

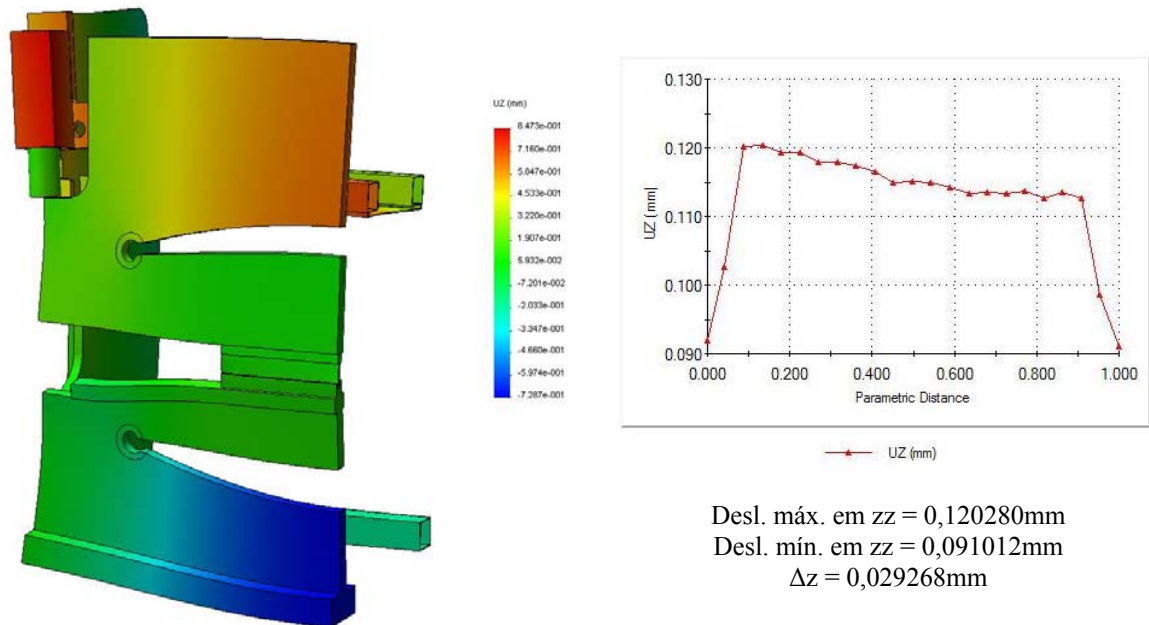
Tabela 3.43 - Resultados obtidos nos aventais para uma carga de 100 toneladas

Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Avental móvel		Avental fixo	
				Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1	0,13562	0,1296	0,00602	7,85	186,69	7,96	219,76

Tabela 3.44 - Resultados obtidos nos aventais para cargas de 130 toneladas

Comprimento da carga distribuída (m)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Avental móvel		Avental fixo	
				Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Tensões máx. de Von Mises (MPa) no rasgo do avental
1,3	0,12028	0,091012	0,029268	9,7	222,34	9,85	263,56
1,5	0,087475	0,063789	0,023686	9,35	209,37	9,47	246,6
2	0,0010114	-0,021416	0,0224274	8,42	175,82	8,42	200,69
2,5	-0,04664	-0,066014	0,019374	7,3	140,11	7,3	157,9
3	-0,049308	-0,072881	0,023573	6,2	117,67	6,1	127,68

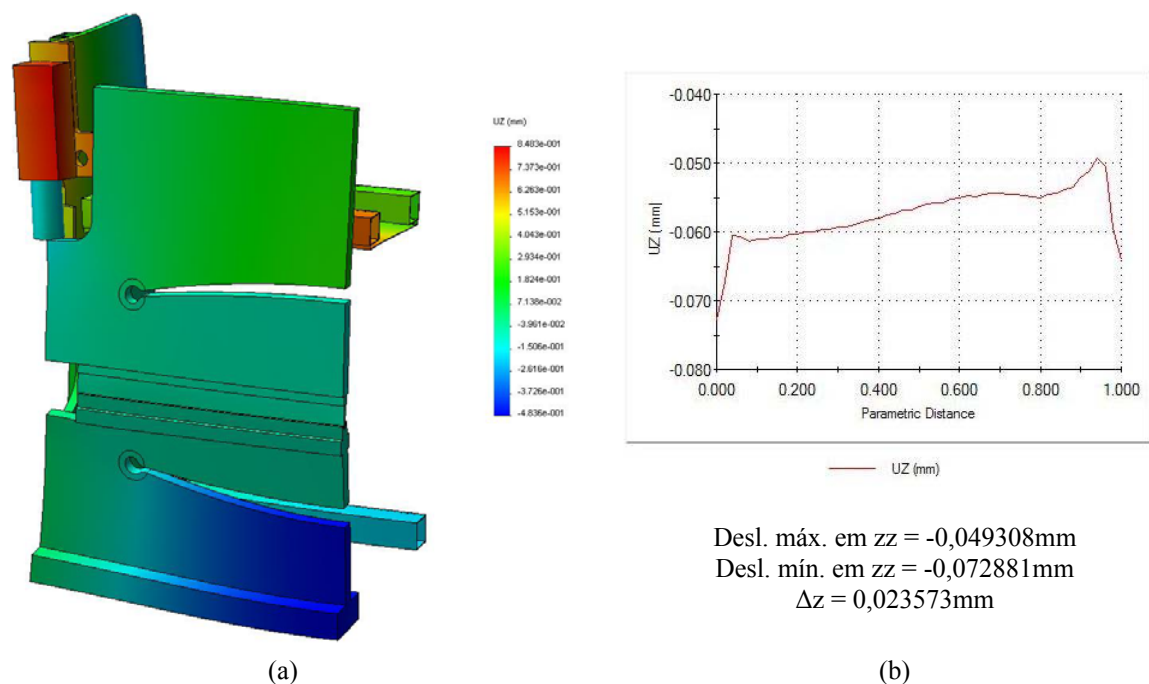
Nas Figuras 3.67 (a) e 3.68 (a) são apresentados os deslocamentos em zz obtidos na quinadora em carga máxima de quinagem, para comprimentos de 1,3m e 3m, respectivamente. As Figuras 3.67 (b) e 3.68 (b) dizem respeito aos gráfico dos deslocamentos em zz nos comprimentos de quinagem. Os resultados pormenorizados para os restantes comprimentos de quinagem podem ser vistos no Anexo P.



(a)

(b)

Figura 3.67 - Deslocamentos em zz para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m: a) Na estrutura da quinadora (Factor de ampliação das deformações = $262,511 \times$); b) Na linha de contacto do punção com a matriz



(a)

(b)

Figura 3.68 - Deslocamentos em zz para uma carga de 130 toneladas distribuída em 3m: a) Na estrutura da quinadora (Factor de ampliação das deformações = $258,439 \times$); b) Na linha de contacto do punção com a matriz

Na Figura 3.69 temos uma imagem retirada do Cosmos que mostra as zonas de tensões de Von Mises superiores a 160 MPa, que é a tensão máxima admissível para o aço SRt37. Podemos reparar que as tensões estão localizadas no interior dos reforços, que toleram tensões até 265 MPa. Como a tensão máxima de Von Mises verificada têm um valor de 263,6MPa e está localizada no reforço do avental fixo, a quinadora cumpre com os requisitos de segurança.

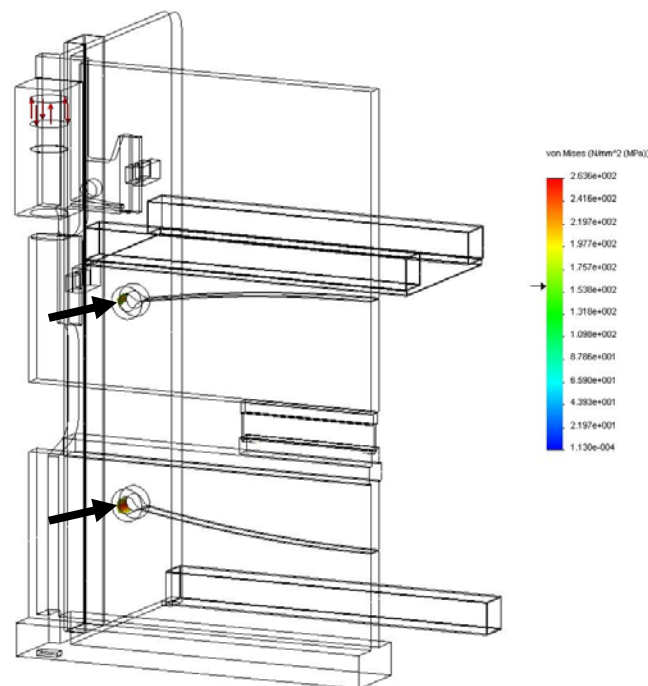


Figura 3.69 - Tensões máximas de Von Mises superiores a 160MPa na modelação da quinadora com ferramentas de quinagem para uma carga máxima distribuída em 1,3m

No Figura 3.70 temos resumido os valores dos deslocamentos em zz obtidos, em função do comprimento de quinagem para a carga máxima. As pressões necessárias no interior dos rasgos dos aventais, para a compensação de deformações de quinagem, mantiveram-se iguais ao modelo anterior (Figura 3.64).

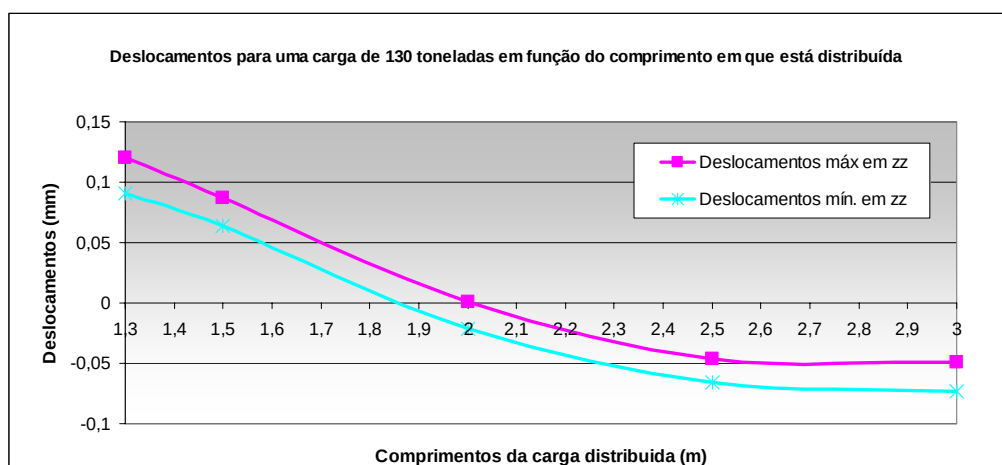


Figura 3.70 - Deslocamentos em zz em função do comprimento de quinagem tendo em conta uma carga de 130 toneladas

3.5.7 - Verificação das tensões máximas nos montantes da quinadora

Os montantes das quinadoras são, normalmente elementos, da estrutura das quinadoras onde aparecem tensões elevadas, devido a comportarem-se como peças sujeitas a flexão e tracção. Necessitam, por isso, de uma verificação cuidada no seu dimensionamento.

Neste trabalho foi feita uma verificação das tensões obtidas nos montantes da quinadora da modelação 3 e no modelo da quinadora com ferramentas de quinagem. A carga de quinagem é de 130 toneladas, distribuída em 1,3m. Foi, também, criado um modelo de apenas um montante da quinadora, sujeito a uma carga vertical de 65 toneladas na zona de ligação ao cilindro hidráulico, e outra carga de sentido oposto na ligação do montante ao avental fixo. Deste modo poderá ser feita uma comparação entre os modelos desenvolvidos. A malha de elementos finitos da modelação individual do montante é constituída por 19392 elementos tetraédricos de 4 nós, com de 60 ± 3 mm de lado.

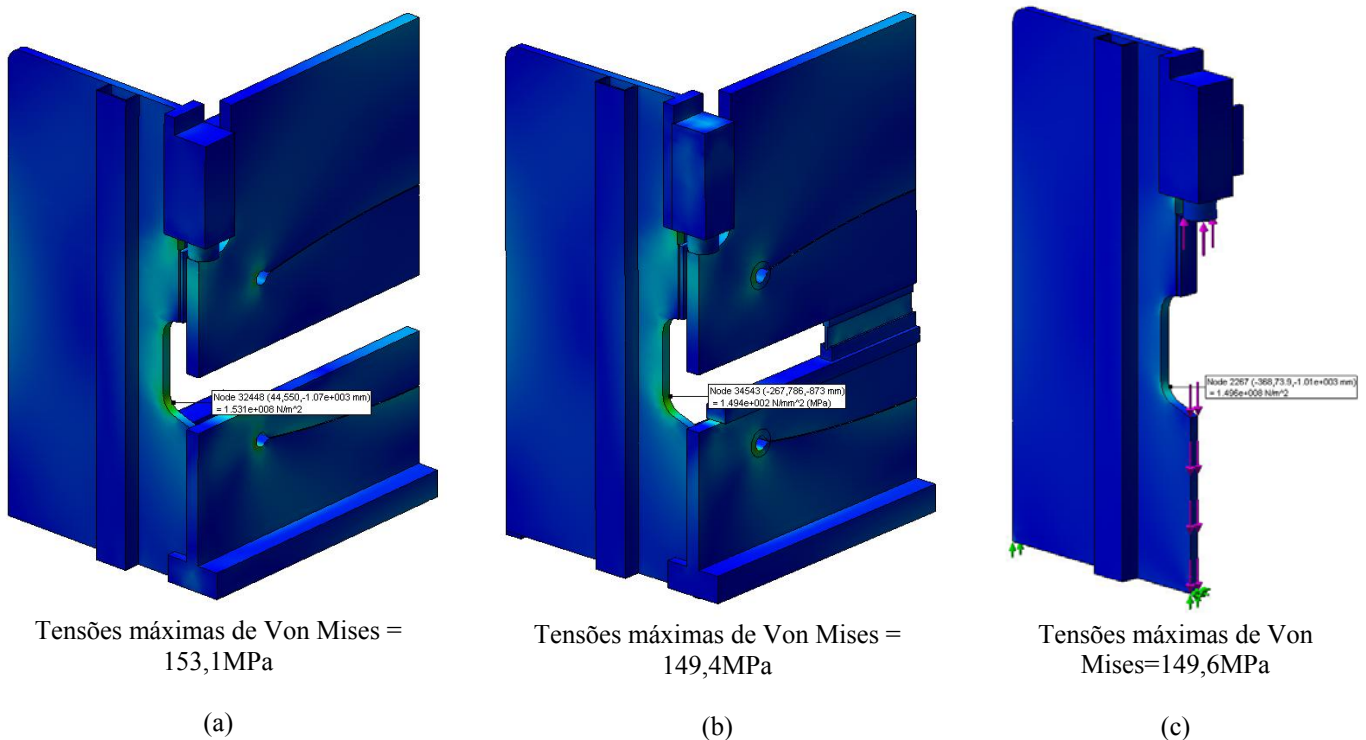


Figura 3.71 - Tensões verificadas nos montantes: a) Modelação 3; b) Modelo da quinadora com ferramentas de quinagem incluídas; c) Montante isolado

Podemos verificar através da Figura 3.71 que as tensões obtidas são muito próximas para os modelos efectuados. Podemos concluir que os modelos efectuados são válidos para a análise estrutural da quinadora.

4 - Resultados obtidos

4.1 - Determinação das variações angulares de quinagem

4.1.1 - Considerações teóricas

A compensação de deformações numa chapa tem por objectivo diminuir a variação do ângulo de quinagem numa peça dobrada. Quanto mais constante for o ângulo ao longo do comprimento de quinagem, melhor será a correcção. Para determinar a capacidade do sistema desenvolvido em compensar deformações numa quinadora, é necessário relacionar os deslocamentos máximos obtidos anteriormente pelos modelos de elementos finitos, com a variação angular correspondente no comprimento de uma chapa.

Através da Figura 4.1 podemos relacionar o ângulo de quinagem com a variação de penetração do punção na chapa (Rodrigues, 2005).

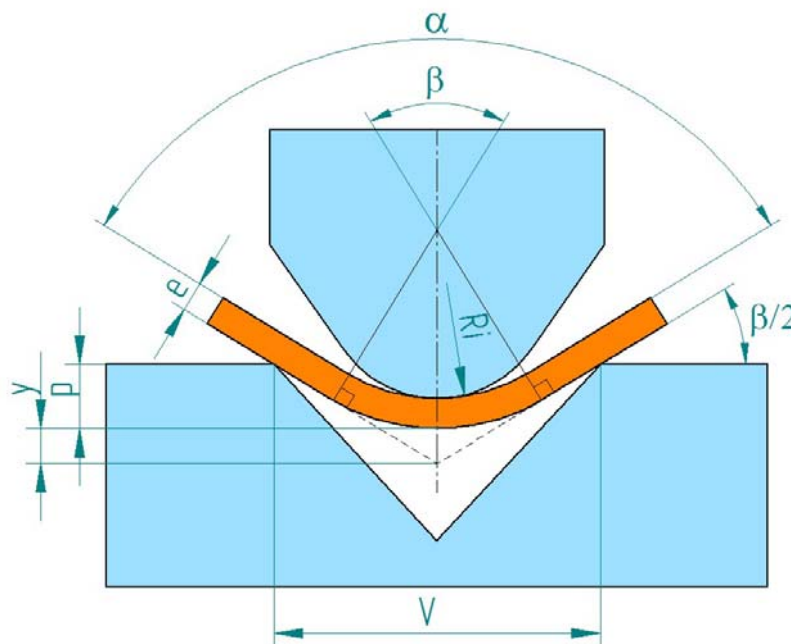


Figura 4.1 - Variação angular de uma chapa

Sabemos que a profundidade de quinagem pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$p = \frac{V}{2} \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) - y \quad (4.1)$$

sendo y a compensação da curvatura da chapa, a qual é dada pela seguinte expressão:

$$y = (Ri + e) \left(\frac{1 - \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)} \right) \quad (4.2)$$

A profundidade de quinagem é então dada por:

$$p = \frac{V}{2} \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) - (Ri + e) \left(\frac{1 - \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)} \right) \quad (4.3)$$

Como:

$$\alpha = 180^\circ + \beta \quad (4.4)$$

a profundidade de quinagem em função do ângulo de quinagem é dada por:

$$p = \frac{V}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - (Ri + e) \left(\frac{1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) \quad (4.5)$$

Derivando agora a expressão 4.5 obtemos:

$$\frac{\partial p}{\partial \alpha} = \frac{2R_i \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - V + 2e \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{4\text{sen}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (4.6)$$

A sensibilidade angular em função de penetração do punção no comprimento de quinagem é então igual a seguinte expressão:

$$S(^{\circ}/mm) = \frac{\partial \alpha}{\partial p} = \frac{4\text{sen}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\left[2R_i \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - V + 2e \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right]} \times \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad (4.7)$$

Para a obtenção da variação angular máxima num comprimento de quinagem, fica:

$$\Delta \alpha = \frac{720\text{sen}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\pi \left[2R_i \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - V + 2e \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right]} \times Flecha_{m\acute{a}xima} \quad (4.8)$$

Depois de sabermos como relacionar deslocamentos com variações angulares, é necessário determinar a força de quinagem requerida por uma quinadora. Para isso, consideremos os seguintes parâmetros:

- Material da chapa;
- Espessura da chapa;
- Comprimento de quinagem;
- Abertura do "vê" da matriz.

A Força requerida para uma quinagem livre é determinada segundo Bessa Pacheco (1992), através da seguinte expressão:

$$F = k \times \frac{\sigma_R e^2 l}{V} \quad (4.9)$$

Com k dado por:

$$k = 1 + 4 \times e/V \quad (4.10)$$

Sendo:

e – Espessura da chapa (mm);

l – Comprimento da chapa a quinar (mm);

V – Valor de abertura da matriz ("vê da matriz") (mm);

σ_R – Tensão de rotura nominal do material da chapa em kgf/mm^2 .

O V da matriz é determinado normalmente pela seguinte expressão:

$$\text{Para } e \leq 10mm, \text{ fica: } V = 8 \times e \quad (4.11)$$

$$\text{Para } e > 10mm, \text{ fica: } V = 10 \times e \quad (4.12)$$

É importante referir que quanto menor o "vê" da matriz, maior é a variação angular de uma chapa na quinagem.

O raio interno da chapa dobrada pode ser determinado por:

$$R_i = \frac{V}{6,4} \quad (4.13)$$

4.1.2 - Cálculos das variações angulares de quinagem

Conhecido o modo de cálculo da força de quinagem requerida por uma quinadora, é possível determinar as características que uma chapa deverá ter para ser quinada com uma determinada carga. A partir de agora, é possível, através das cargas de quinagem usadas nos modelos de elementos finitos, determinar o tipo de chapas que são possíveis quinar para esses valores e de seguida, calcular a variação angular que teriam.

É importante referir que, no cálculo de quinagem, o procedimento é ao contrário do descrito, pois calcula-se a carga necessária de acordo com o tipo de quinagem pretendida.

Por exemplo, para a determinação da variação angular de uma chapa de 1,3m com uma carga de quinagem de 130 toneladas é necessário definir um caso típico de quinagem para esse valor de carga. Utilizando, por exemplo, uma chapa de aço não ligado (RSt37), com $\sigma_R \cong 45 \text{ kgf/mm}^2$ e seguindo o critério $V = 8 \times e$, podemos determinar a espessura da chapa que corresponde a uma quinagem de 130 toneladas:

$$F = k \times \frac{\sigma_R e^2 l}{V} \Leftrightarrow 130000 = \left(1 + 4 \times \frac{e}{8 \times e}\right) \times \frac{45 \times e^2 \times 1300}{8 \times e} \Leftrightarrow e = 11,8519 \text{ mm}$$

Como o valor da espessura é maior que 10mm dever-se-á na prática utilizar um "vê" da matriz maior, seguindo o critério $V = 10 \times e$. Para efeitos deste estudo, até por motivos de interesse em testar soluções limites, vai ser considerado o caso de quinagem de uma chapa de 12mm com um "vê" dado por $V = 8 \times e$. O "vê" da matriz fica então igual a:

$$V = 8 \times e = 96 \cong 100 \text{ mm}$$

O raio interior da chapa é igual a:

$$R_i = \frac{V}{6,4} = \frac{100}{6,4} = 15,625 \cong 16 \text{ mm}$$

Determinados os valores anteriores, apenas será necessário conhecer o valor da flecha máxima no comprimento de quinagem, para determinar a variação angular da chapa quinada. Se pretendermos um ângulo de quinagem de 90°, obtém-se uma variação angular:

$$\Delta\alpha = \left| \frac{720 \times \sin^2\left(\frac{90}{2}\right)}{\pi \left[2 \times 16 \times \cos\left(\frac{90}{2}\right) - 100 + 2 \times 12 \times \cos\left(\frac{90}{2}\right) \right]} \right| \times Flecha_{m\acute{a}xima}$$

Determinando, por exemplo, a variação angular obtida na modelação da quinadora com ferramentas de quinagem, para uma carga de 130 toneladas distribuída em 1,3m, fica:

$$Flecha_{m\acute{a}xima} = \Delta Z_{m\acute{a}x} = 0,0293\text{mm}$$

A variação angular é então igual:

$$\Delta\alpha = \left| \frac{720 \times \sin^2\left(\frac{90}{2}\right)}{\pi \left[2 \times 16 \times \cos\left(\frac{90}{2}\right) - 100 + 2 \times 12 \times \cos\left(\frac{90}{2}\right) \right]} \right| \times 0,0293 = 0,0555^\circ$$

Repetindo agora os cálculos, para uma chapa feita de um aço inoxidável, $\sigma_R \cong 80\text{kgf/mm}^2$, seguindo o critério, $V = 8 \times e$, fica:

$$F = k \times \frac{\sigma_R e^2 l}{V} \Leftrightarrow 130000 = \left(1 + 4 \times \frac{e}{8 \times e} \right) \times \frac{80 \times e^2 \times 1300}{8 \times e} \Leftrightarrow e = 6,6667 \cong 6,5\text{mm}$$

O V da matriz fica:

$$V = 8 \times e \Leftrightarrow V = 8 \times 6,5 = 52 \cong 50mm$$

O raio interior da chapa é igual a:

$$R_i = \frac{V}{6,4} = \frac{50}{6,4} = 7,8125 \cong 8mm$$

Para um ângulo de quinagem de 90° , obtém-se uma variação angular:

$$\Delta\alpha = \left| \frac{720 \times \sin^2\left(\frac{90}{2}\right)}{\pi \left[2 \times 8 \times \cos\left(\frac{90}{2}\right) - 50 + 2 \times 6,5 \times \cos\left(\frac{90}{2}\right) \right]} \right| \times 0,0293 = 0,1137^\circ$$

4.2 - Comparação de resultados das modelações da quinadora

Para que possa ser feita uma comparação entre as modelações da quinadora é necessário determinar a variação máxima dos deslocamentos em zz no comprimento de quinagem para cada modelação, ou seja determinar a flecha máxima.

No caso das modelações 1, 2 e 3 a flecha máxima é dada pela soma das variações máximas dos deslocamentos em zz nos dois aventais da quinadora. Na Tabela 4.1 temos resumido as flechas máximas obtidas nas modelações da quinadora.

Tabela 4.1 - Flechas máximas obtidas nos modelos da quinadora

	Comprimento da carga distribuída (m)	ΔZ do avental móvel (mm)	ΔZ do avental fixo (mm)	Flecha máxima (mm)
Modelação 1	1,3	0,06132	0,11765	0,17897
	1,5	0,06673	0,13557	0,2023
	2	0,06338	0,17436	0,23774
	2,5	0,03857	0,21058	0,24915
	3	0,05661	0,23395	0,29056
Modelação 2	1,3	0,0613	0,05406	0,11536
	1,5	0,0667	0,04959	0,11629
	2	0,06333	0,0175	0,08083
	2,5	0,03849	0,03122	0,06971
	3	0,05652	0,1278	0,18432
Modelação 3	1,3	0,023	0,11827	0,14127
	1,5	0,0065	0,07463	0,08113
	2	0,05168	0,09446	0,14614
	2,5	0,08201	0,2737	0,35571
	3	0,07286	0,21325	0,28611
Modelação da quinadora com ferramentas de quinagem	1,3	---	---	0,02927
	1,5	---	---	0,02369
	2	---	---	0,02243
	2,5	---	---	0,01937
	3	---	---	0,02357

Na Figura 4.2 temos a comparação das flechas máximas para cada modelação efectuada em função do comprimento de quinagem em carga máxima. Podemos constatar que existe uma maior compensação de deslocamentos no modelo da quinadora com ferramentas de quinagem. A Figura 4.3 representa as tensões máximas de Von Mises obtidas nos aventais móveis dos modelos efectuados em função do comprimento de quinagem.

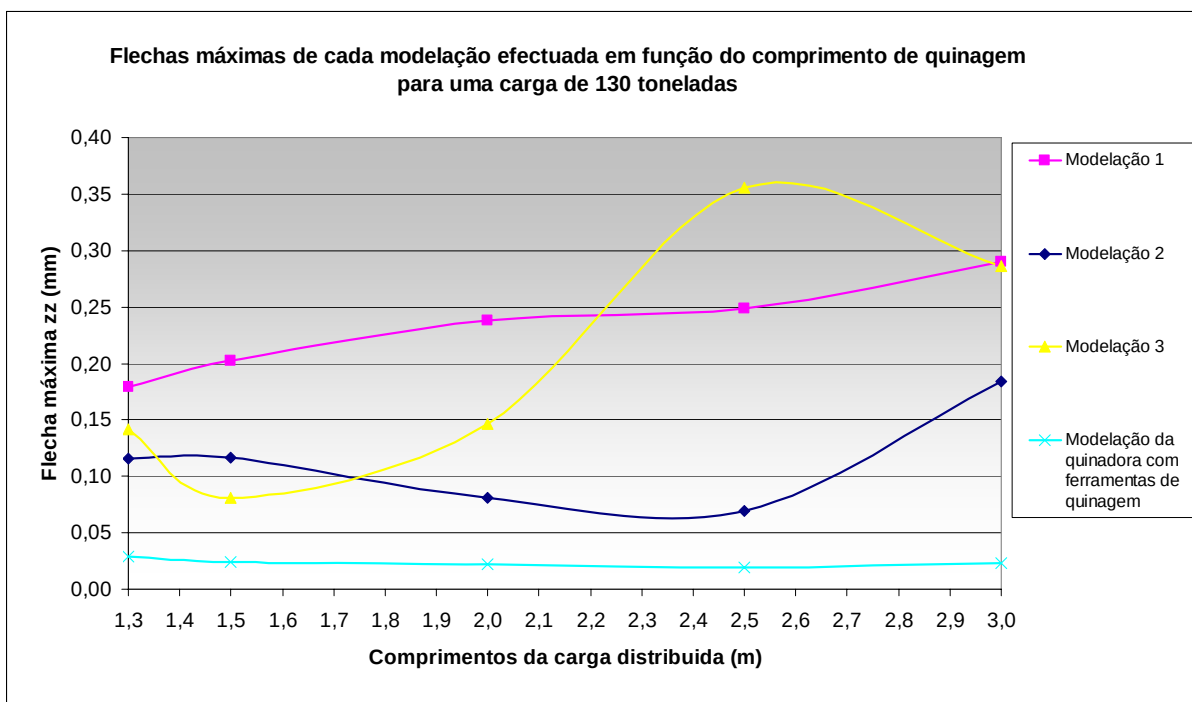


Figura 4.2 - Flechas máximas obtidas com as modelações da quinadora

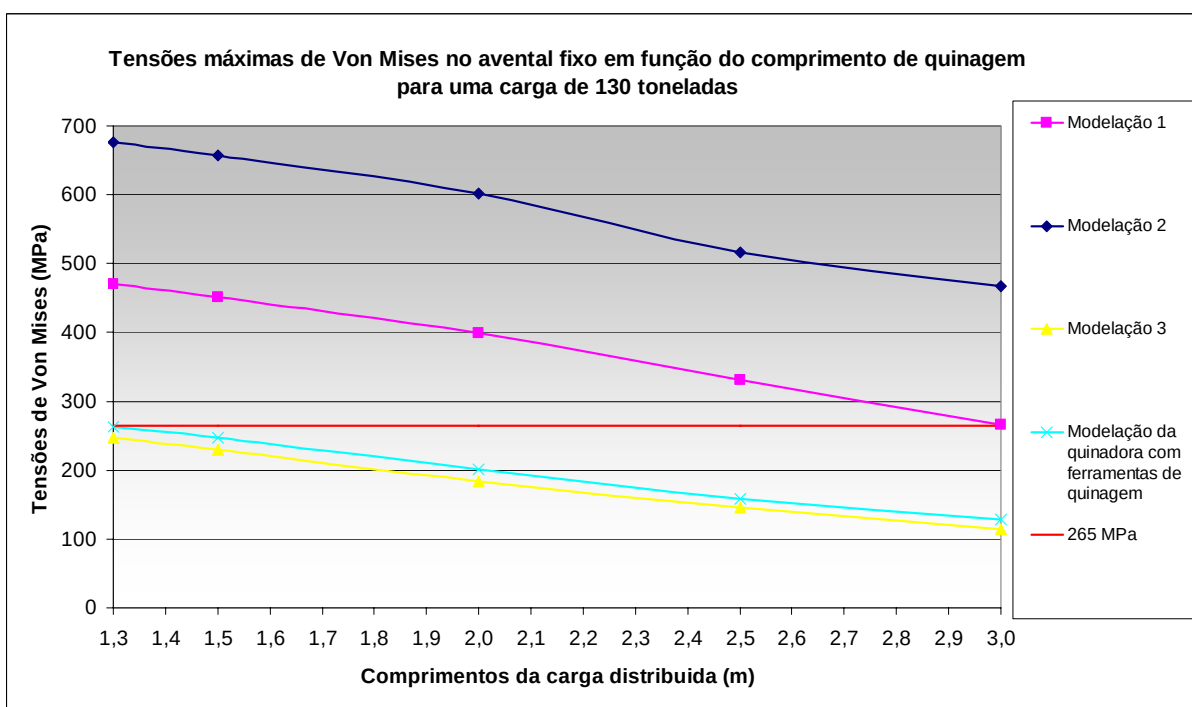


Figura 4.3 - Tensões máximas de Von Mises obtidas no avental fixo dos modelos da quinadora

Podemos verificar através da Figura 4.3 que a modelação 3 e a modelação da quinadora com ferramentas de quinagem são as únicas que oferecem garantias de segurança estrutural por as tensões máximas de Von Mises no avental fixo encontrarem-se abaixo de 265MPa.

Embora a modelação 3 e modelação da quinadora com ferramentas de quinagem tenham uma solução estrutural igual para a compensação de deformações, os valores das flechas máximas obtidas nos dois modelos são distintos. Como a modelação da quinadora com ferramentas de quinagem foi a modelação desenvolvida mais completa em termos de tradução do comportamento de uma quinadora, os resultados por ela obtidos deverão ser considerados os mais correctos para determinar o nível de precisão da compensação de deformações de quinagem.

Na Tabela 4.2 são apresentadas as variações angulares de um ângulo de quinagem de 90°, determinadas para o modelo da quinadora com ferramentas de quinagem. A tabela contém ainda valores determinados para a espessura da chapa, abertura do "vê" da matriz e raio interno da chapa, para se obter uma força de quinagem próxima da usada nos modelos de elemento finitos.

Tabela 4.2 - Variações angulares de um ângulo de quinagem de 90° em carga máxima para a modelação da quinadora com ferramentas de quinagem

Comprimento de quinagem	Aço não ligado (RSt37)				Aço inox			
L (m)	Espessura (mm)	V (mm)	Ri (mm)	Variação angular (°)	Espessura (mm)	V (mm)	Ri (mm)	Variação angular (°)
1,3	12	100	16	0,0555	6,5	50	8	0,1137
1,5	10	80	13	0,0572	6	50	8	0,0899
2	8	64	10	0,0667	4	32	5	0,1334
2,5	6	50	8	0,0735	3	25	4	0,1470
3	5	40	6,5	0,1138	3	25	4	0,1789

5 - Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

5.1 - Conclusões sobre o trabalho desenvolvido

Os resultados do trabalho desenvolvido são encorajadores e indicam, que é possível uma compensação de deformações tendo por base o sistema inovador idealizado. Em termos de objectivos, podemos afirmar que o estudo realizado obteve bons resultados, pois validou a solução idealizada para a compensação de deformações e demonstrou que a sua implementação pode constituir uma mais valia em relação às soluções existentes, principalmente por a compensação de deformações ser automática, sem necessidade de ajustamentos de parâmetros de quinagem.

Foi verificado, durante o estudo realizado, que quando se torna os rasgos dos aventais mais curvos, diminuindo o seu raio, e lhes é aumentado o comprimento, há uma tendência para uma melhor compensação de deformações, principalmente em comprimentos de quinagem maiores. Existe, contudo, uma grave implicação no aumento do comprimento do rasgo: as tensões nos extremos dos rasgos tendem a aumentar, funcionando na razão inversa da melhoria de compensação de deformações.

A obtenção de tensões elevadas nos modelos desenvolvidos foi um impeditivo para que a correcção de deformações fosse mais precisa. No avental fixo verificaram-se maiores dificuldades na diminuição de tensões, o que levou à utilização de um comprimento de rasgo mais pequeno do que o desejado. Devido a este facto, foram normalmente obtidos desvios maiores para comprimentos de quinagem maiores, embora os resultados finais mostrem uma grande proximidade de valores para todos os comprimentos estudados.

Outro problema a salientar é que existe uma dependência em termos de pressões nos dois rasgos dos aventais, nem sempre proveitosa em termos de compensação de deformações. A pressão usada no rasgo do avental móvel depende sempre da pressão introduzida no rasgo do avental fixo, o que limita a compensação feita pelo avental móvel, e a utilização de uma geometria diferente para o seu rasgo. Verificou-se, também, durante o estudo que é possível uma compensação de deformações muito precisa do avental móvel, devido ao tipo de ligações à estrutura da quinadora, e à sua elevada inércia, pois não têm limitações de altura. O mesmo não sucede no avental fixo, que está delimitado entre o chão e a mesa onde se dobra a chapa, que tem de ter uma altura ergonómica, normalmente entre 800 a 950mm.

No subcapítulo 3.3, chegou-se a uma solução não muito correcta para a compensação de deformações no avental fixo, pois considerou-se que os montantes da quinadora tinham uma rigidez capaz de não permitir deslocamentos na zona de soldadura ao avental, o que foi verificado como errado no subcapítulo 3.5. Poder-se-á considerar a zona de ligação do avental fixo aos montantes da estrutura como uma ligação elástica, pois a solução encontrada ao considerar o avental como apenas simplesmente apoiado, traduziu-se numa boa aproximação à realidade, como os resultados o comprovaram.

Quanto aos modelos da estrutura completa da quinadora, chegaram-se a resultados interessantes, não só em termos de correcção de deformações, mas também como modelo que tenta traduzir o real comportamento de uma quinadora, embora necessitando de um maior aprofundamento, pois o comportamento de uma quinadora é de difícil comprovação.

Em conclusão final, é importante referir que o projecto realizado foi muito importante em termos académicos, pois permitiu um aprofundamento dos conhecimentos em termos de modelação em elementos finitos e projecto de máquinas, e teve como mais valia o facto de ser realizado num ambiente fabril, que foi fundamental para a compreensão da realidade da empresa.

Por falta de tempo não foi possível efectuar um estudo económico da solução estudada, que seria importante na validação da aplicabilidade do sistema desenvolvido relativamente às soluções existentes no mercado.

5.2 - Perspectivas de trabalho futuro

O estudo desenvolvido demonstrou que a solução encontrada poderá ter viabilidade para ser implementada, embora o trabalho realizado possa ainda ser alvo de algum aprofundamento para comprovar os resultados obtidos. A futura construção de um protótipo seria importante para perceber até que ponto a solução encontrada compensa convenientemente as deformações. Todavia só se deverá partir para a sua construção depois de uma análise económica apropriada.

As limitações impostas pelo tipo de quinadora, onde vai ser incorporado o sistema de compensação de deformações desenvolvido, restringiram de certo modo a solução estudada, pois é necessário respeitar certas condições iniciais da quinadora, como os apoios, comprimento máximo de quinagem, ou a carga máxima de quinagem. Se os propósitos do estudo desenvolvido fossem o inverso, ou seja, delimitar as características da máquina de modo a melhor servirem os requisitos do sistema de compensação idealizado, os resultados poderiam, eventualmente ter sido melhores, embora uma quinadora com muitas limitações em termos de quinagem pode ser pouco interessante em termos comerciais.

Durante o desenvolvimento do estudo foi verificado que a compensação de deformações no avental fixo é menos precisa do que o avental móvel, devido, principalmente a diferenças de inércia entre os dois aventais. Um modo possível de contornar a questão seria aumentar a inércia do avental fixo através da inclusão de um fosso no chão, para que permita aumentar a altura do avental. Também foi verificado que o tipo de apoios, e a distância que os separa, tem uma grande influência nas tensões obtidas no avental fixo da quinadora, o que limita a utilização de geometrias diferentes para os rasgos e, conseqüentemente, a compensação de deformações. Seria importante um estudo mais detalhado sobre o tipo de apoios e ligações entre elementos das quinadoras.

Uma alteração possível à solução desenvolvida, consiste no controlo da compensação de deformações em cada avental por intermédio de um sistema hidráulico de modo independente. Seria, assim, possível que os aventais tivessem a geometria mais apropriada para a correcção de deformações, e que as pressões introduzidas nos rasgos fossem optimizadas de acordo com o comportamento de cada avental.

Outra opção, ainda possível de ser estudada, é a integração do sistema desenvolvido com outro método de compensação de deformações existente.

Bibliografia

(Bystronic A, 2007) – Beyeler Xpert: Press brake for maximum repetition accuracy at the touch of a button, Bystronic, 2007

(Bystronic B, 2007) – Máquinas de dobra Hämmerle: A inigualável tecnologia de dobra em 3 pontos, Bystronic, 2007

(Buchfink, 2006) – Gabriela Buchfink, Fascination of Sheet Metal, TRUMPF GmbH + Co. KG, 2006

(TRUMPF A, 2006) – Technical information: Bending technology, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, 2006

(TRUMPF B, 2006) – Tool catalogue, TRUMPF Maschinem Austria GesmbH & CO. KG, 2006

(G. Coelho, 2005) – Pedro G. Coelho, Luís O. Faria, João B. Cardoso, Structural Analysis and Optimisation of Press Brakes, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005

(Rodrigues, 2005) – Jorge Rodrigues, Paulo Martins, Tecnologia Mecânica, Tecnologia da Deformação Plástica, Volume II, Aplicações industriais, Escolar Editora, 2005

(Willa, 2005) – Press Brake Productivity Guide, Willa, 2004

(E. J. Hearn, 1997) – E. J. Hearn, Mechanics of materials 1: an introduction to the mechanics of elastic and plastic deformation of solids and structural components – 3rd ed., Butterworth-Heinemann, 1997

(Gieck, 1996) – K. + R. Gieck, Manual de Fórmulas Técnicas, Nova tradução, Dinalivro, 1996

(Bessa Pacheco, 1992) – J. Bessa Pacheco, Utilização de Quinadoras e Guilhotinas, APTCP, Porto, 1992.

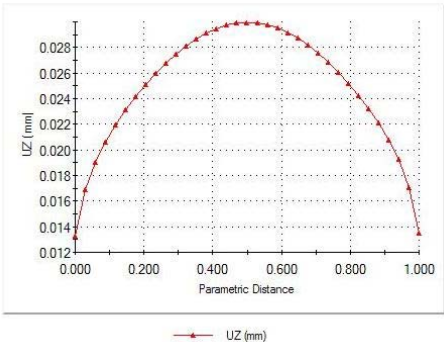
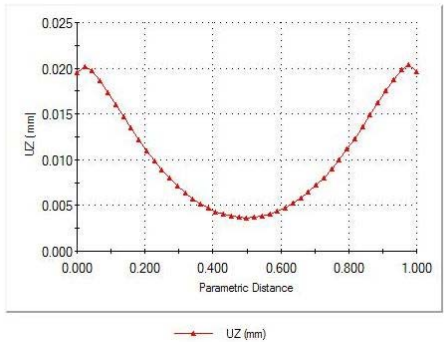
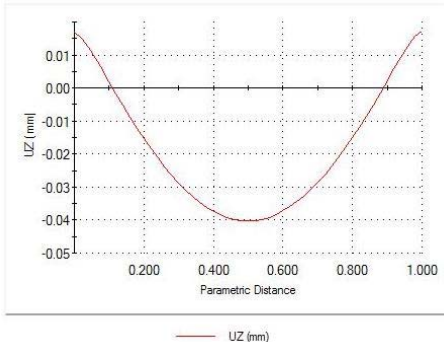
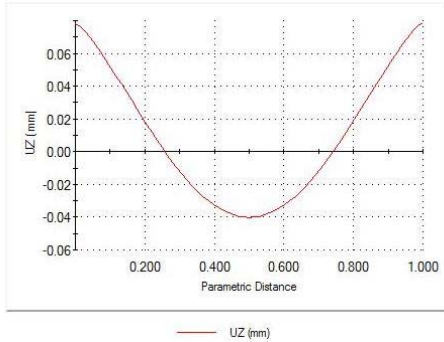
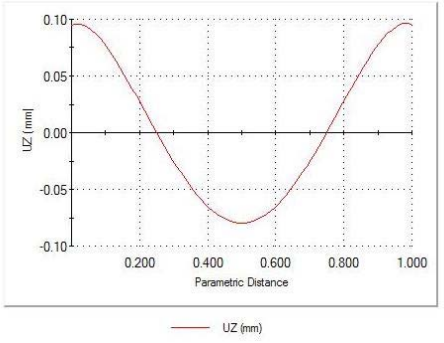
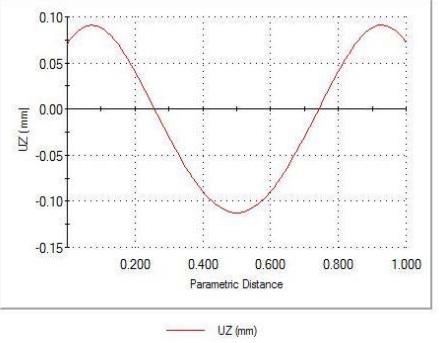
(Campos, 1984) – Pollerri Pires de Campos, Manual de corte e quinagem de chapa metálica Colecção Mecânica Geral, Edições CETOP, 1984

(RIFINDUS, 1974) – RIFINDUS, Un Attrezzo Nuovo per Lavorare Correttamente com la Pressa Piegatrice, Estrato da revista Italiana "Lamiera", No. 98, 1974

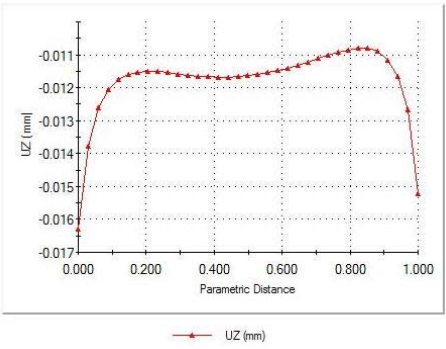
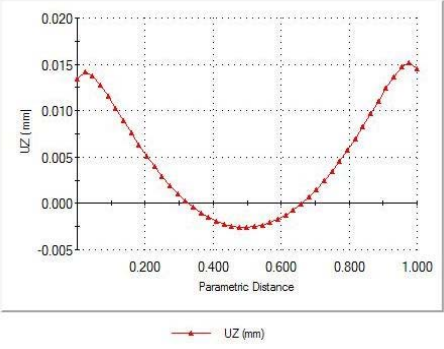
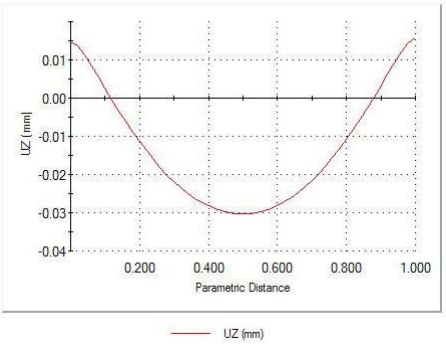
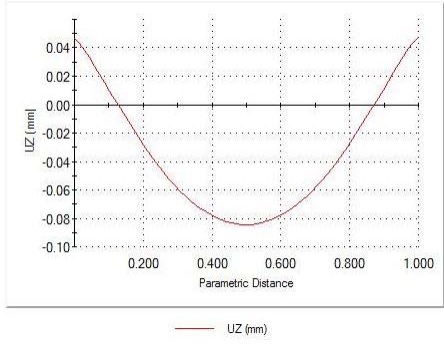
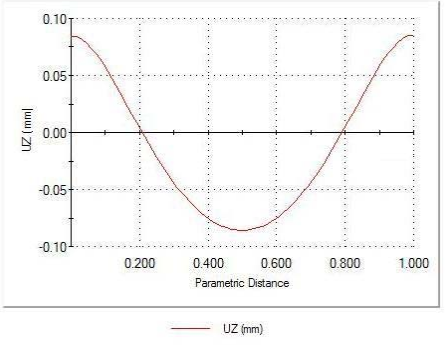
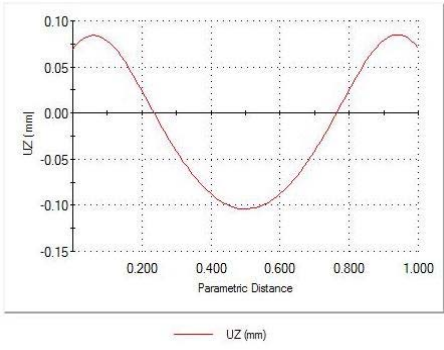
Sites da Internet consultados:

- <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.key-to-steel.com>
- <http://www.matweb.com>
- <http://www.metal-mart.com>
- <http://www.ramada.pt>
- <http://www.sciencedirect.com/>
- <http://www.thyssen.co.uk>
- <http://www.trumpf.com>
- <http://www.uspto.gov/patft/index.html>
- <http://www.wipo.int/pctdb/en/>

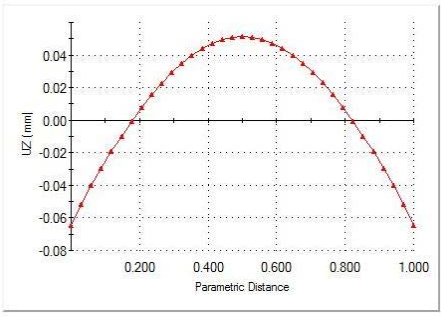
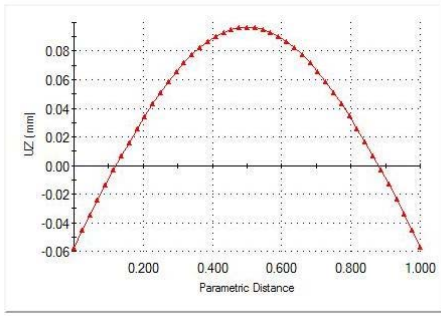
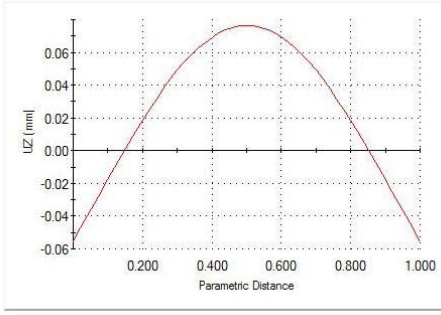
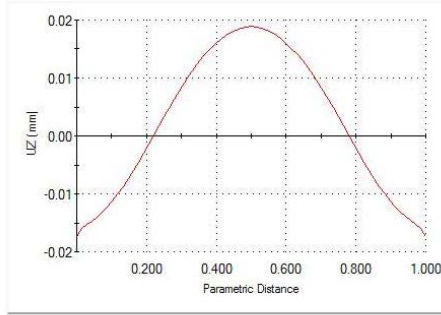
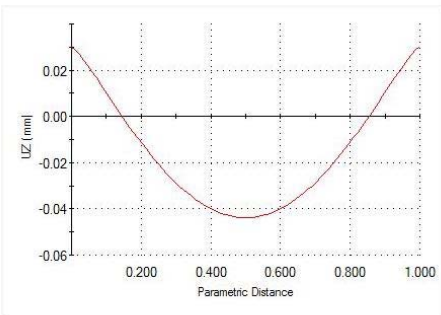
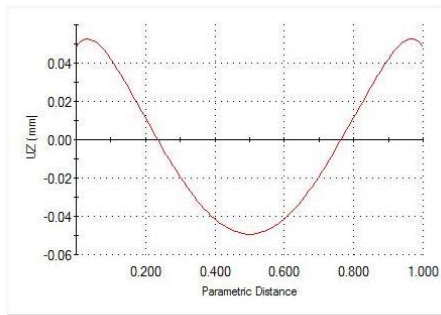
Anexo A - Deslocamentos em zz na modelação preliminar 1

Variação dos deslocamentos em zz para carga máxima de quinagem	
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 1m  Desl. máx. em zz = 0,029944mm Desl. mín. em zz = -0,013301mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,3m  Desl. máx. em zz = 0,020419mm Desl. mín. em zz = 0,0036684mm
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,5m  Desl. máx. em zz = 0,017303mm Desl. mín. em zz = -0,040207mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 2m  Desl. máx. em zz = 0,078525mm Desl. mín. em zz = -0,040171mm
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 2,5m  Desl. máx. em zz = 0,096418mm Desl. mín. em zz = -0,079847mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 3m  Desl. máx. em zz = 0,091076mm Desl. mín. em zz = -0,11264mm

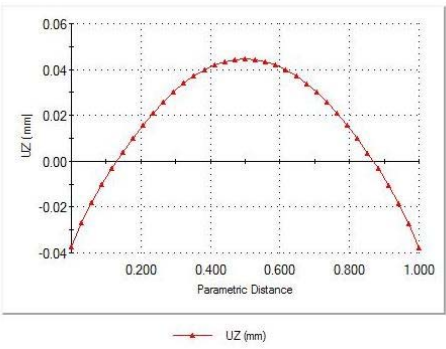
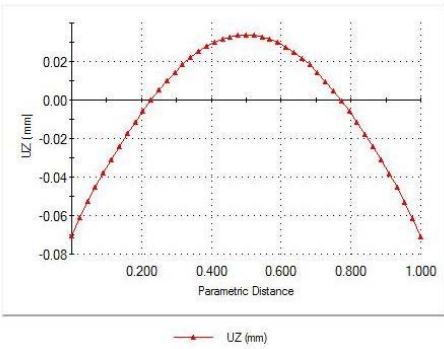
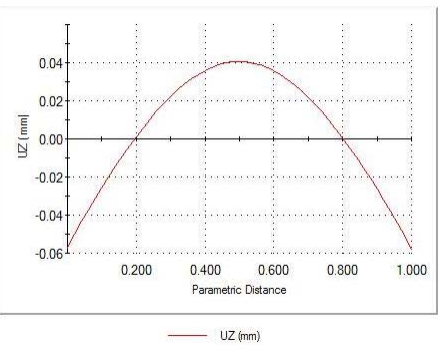
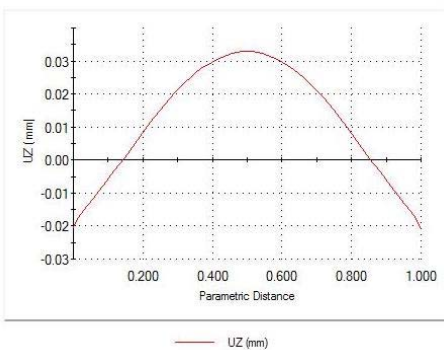
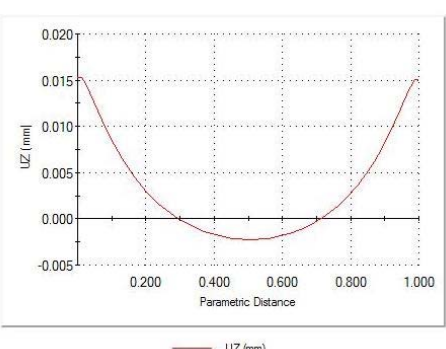
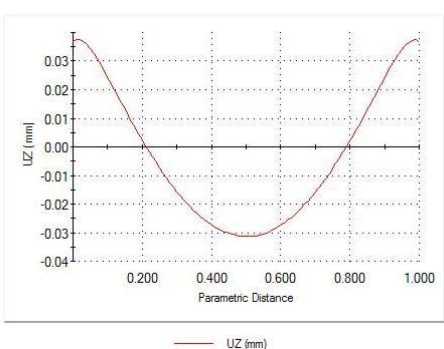
Anexo B - Deslocamentos em zz na modelação preliminar 2

Variação dos deslocamentos em zz para carga máxima de quinagem	
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 1m  Desl. máx. em zz = -0,010797mm Desl. mín. em zz = -0,016303mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,3m  Desl. máx. em zz = 0,015215mm Desl. mín. em zz = -0,002588mm
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,5m  Desl. máx. em zz = 0,015754mm Desl. mín. em zz = -0,03032mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 2m  Desl. máx. em zz = 0,047562mm Desl. mín. em zz = -0,084419mm
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 2,5m  Desl. máx. em zz = 0,085243mm Desl. mín. em zz = -0,085999mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 3m  Desl. máx. em zz = 0,084908mm Desl. mín. em zz = -0,10404mm

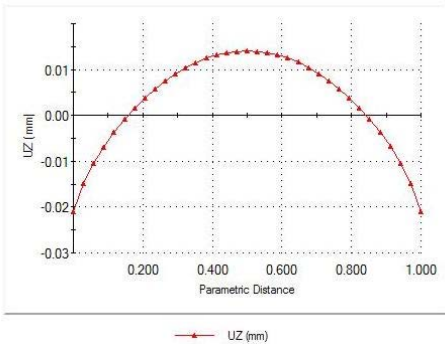
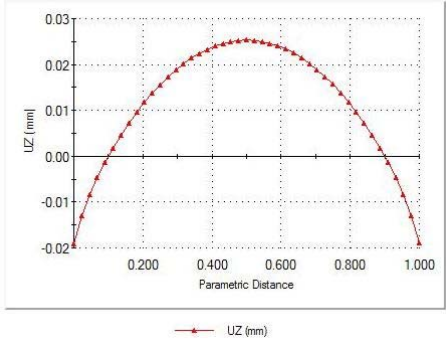
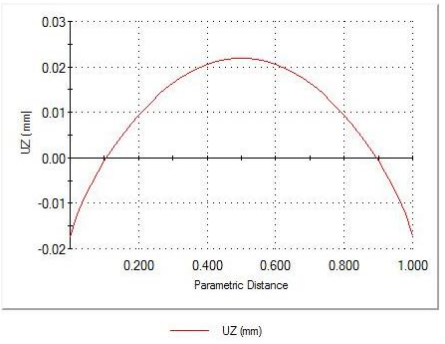
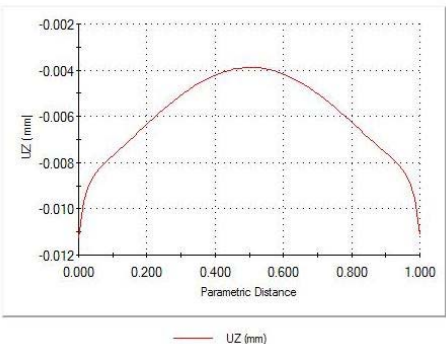
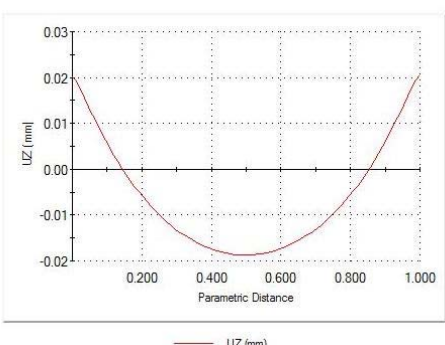
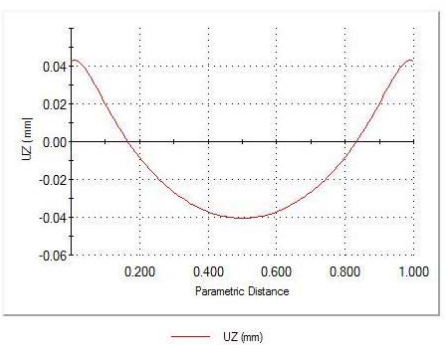
Anexo C - Deslocamentos em zz na modelação preliminar 3

Variação dos deslocamentos em zz para carga máxima de quinagem	
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 1m  Desl. máx. em zz = 0,051177mm Desl. mín. em zz = 0,064702mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,3m  Desl. máx. em zz = 0,096604mm Desl. mín. em zz = -0,057586mm
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,5m  Desl. máx. em zz = 0,07636mm Desl. mín. em zz = -0,055859mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 2m  Desl. máx. em zz = 0,018866mm Desl. mín. em zz = -0,017452mm
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 2,5m  Desl. máx. em zz = 0,03002mm Desl. mín. em zz = -0,043978mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 3m  Desl. máx. em zz = 0,052542mm Desl. mín. em zz = -0,049373mm

Anexo D - Deslocamentos em zz na modelação preliminar 4

Variação dos deslocamentos em zz para carga máxima de quinagem	
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 1m  Desl. máx. em zz = 0,044561mm Desl. mín. em zz = -0,037627mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,3m  Desl. máx. em zz = 0,033806mm Desl. mín. em zz = -0,071067mm
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,5m  Desl. máx. em zz = 0,040563mm Desl. mín. em zz = -0,05826mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 2m  Desl. máx. em zz = 0,032867mm Desl. mín. em zz = -0,020794mm
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 2,5m  Desl. máx. em zz = 0,015321mm Desl. mín. em zz = 0,0022365mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 3m  Desl. máx. em zz = 0,037634mm Desl. mín. em zz = -0,031396mm

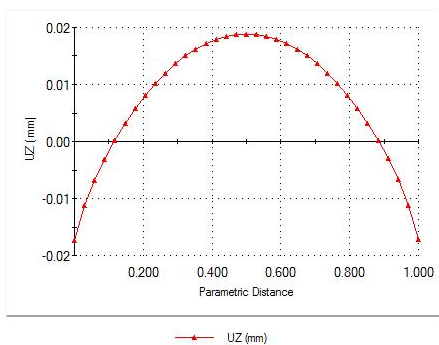
Anexo E - Deslocamentos em zz na modelação preliminar 5

Variação dos deslocamentos em zz para carga máxima de quinagem	
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 1m  Desl. máx. em zz = 0,014063mm Desl. mín. em zz = -0,020996mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,3m  Desl. máx. em zz = 0,02531mm Desl. mín. em zz = -0,019018mm
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,5m  Desl. máx. em zz = 0,021958mm Desl. mín. em zz = -0,017274mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 2m  Desl. máx. em zz = -0,003881mm Desl. mín. em zz = -0,011233mm
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 2,5m  Desl. máx. em zz = 0,020474mm Desl. mín. em zz = -0,018747mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 3m  Desl. máx. em zz = 0,042974mm Desl. mín. em zz = -0,040533mm

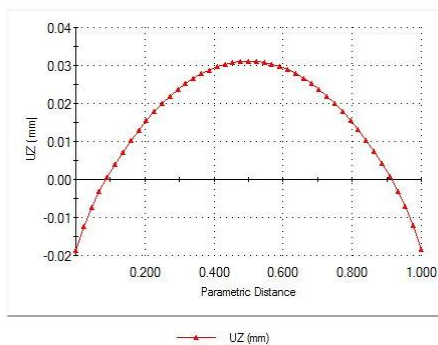
Anexo F - Deslocamentos em zz para o modelo do avental móvel

Variação dos deslocamentos em zz ao longo do comprimento de quinagem para o avental móvel

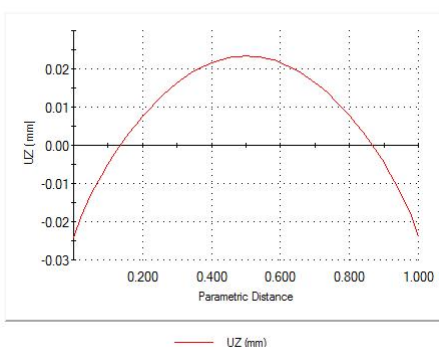
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 1m



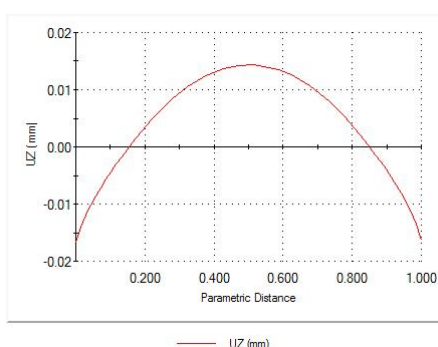
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,3m



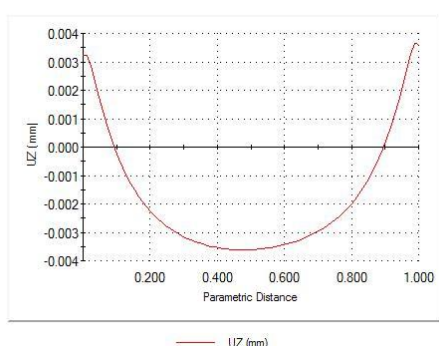
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,5m



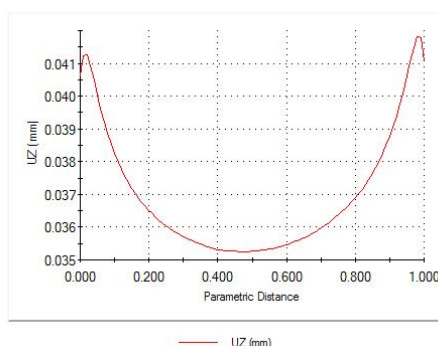
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 2m



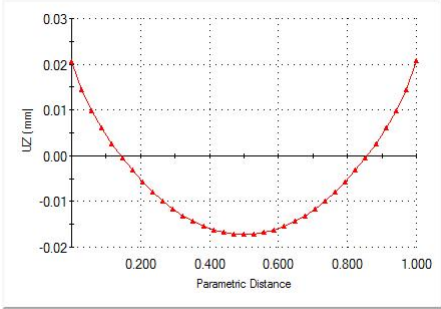
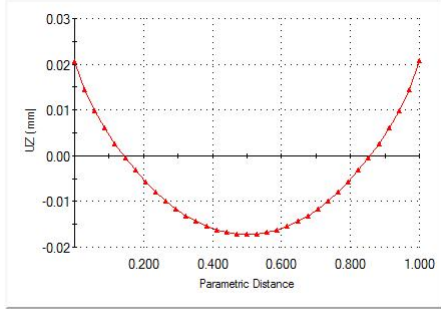
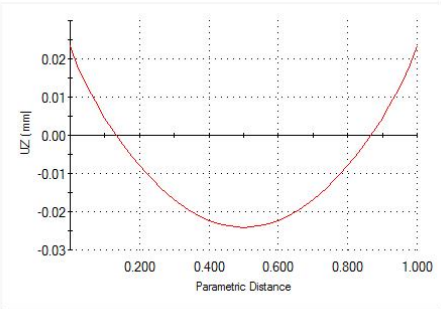
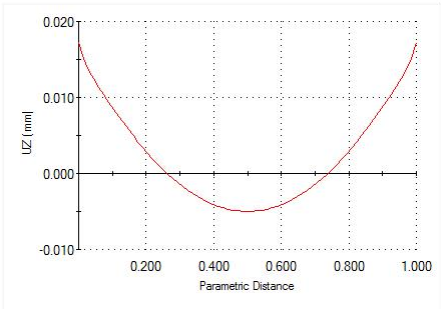
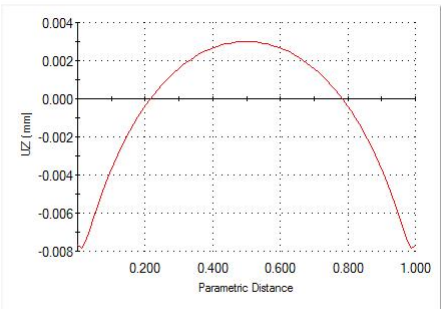
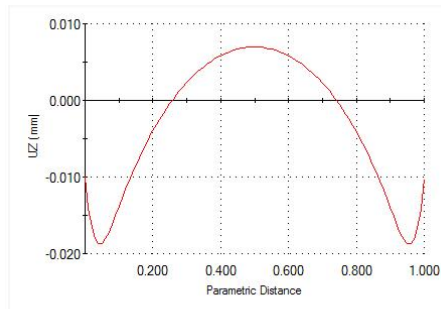
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 2,5m



Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 3m



Anexo G - Deslocamentos em zz para o modelo do avental fixo

Variação dos deslocamentos em zz ao longo do comprimento de quinagem para o avental fixo	
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 1m  Desl. máx. em zz = 0,020687mm Desl. mín. em zz = -0,017249mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,3m  Desl. máx. em zz = 0,020687mm Desl. mín. em zz = -0,017249mm
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,5m  Desl. máx. em zz = 0,023539mm Desl. mín. em zz = -0,024083mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 2m  Desl. máx. em zz = 0,015314mm Desl. mín. em zz = -0,0064933mm
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 2,5m  Desl. máx. em zz = 0,0030001mm Desl. mín. em zz = -0,0078437mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 3m  Desl. máx. em zz = 0,0069559mm Desl. mín. em zz = -0,018708mm

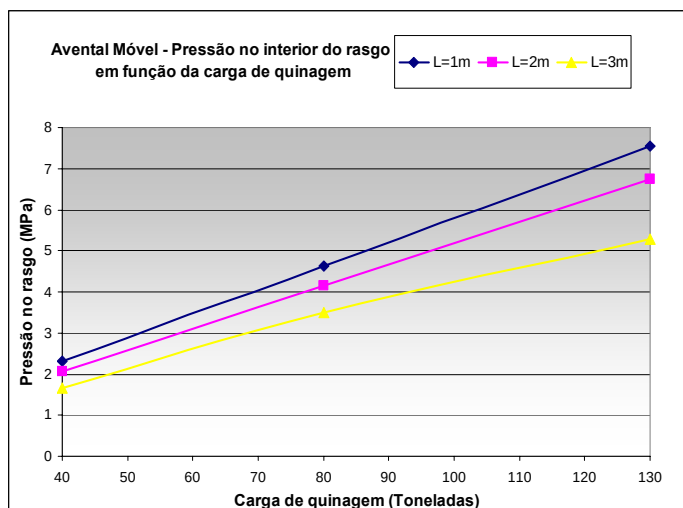
Anexo H - Resultados obtidos nos modelos dos aventais para diferentes cargas de quinagem

Avental Móvel (Volume inicial=1,3810784litros)							
Comprimento da carga distribuída (m)	Carga de quinagem (toneladas)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Volume do rasgo após deformação (litros)	ΔV (litros)
1	40	0,0075323	-0,0069419	0,0144742	2,32	0,01757	1,4056
	80	0,018597	-0,010625	0,029222	4,625	0,01788	1,4304
	130	0,02448	-0,022561	0,047041	7,54	0,01828	1,4624
2	40	0,0048594	-0,0048467	0,0097061	2,075	0,01751	1,4008
	80	0,0097189	-0,0096934	0,0194123	4,15	0,01777	1,4216
	130	0,014321	-0,016728	0,031049	6,75	0,0181	1,448
3	40	0,013041	-0,011746	0,024787	1,65	0,01743	1,3944
	80	0,01984	-0,023606	0,043446	3,5	0,01773	1,4184
	130	0,041806	0,035251	0,006555	5,275	0,01778	1,4224

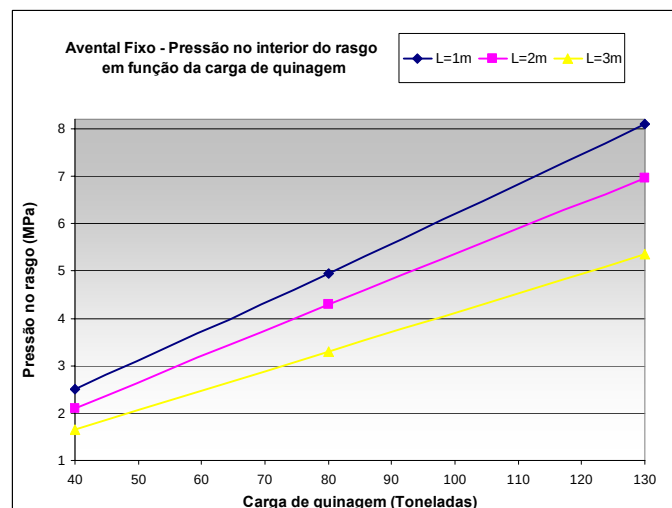
Avental Fixo (Volume inicial =1,259048litros)							
Comprimento da carga distribuída (m)	Carga de quinagem (toneladas)	Deslocamento máx. em zz (mm)	Deslocamento mín. em zz (mm)	Δz (mm)	Pressão no interior do rasgo (MPa)	Volume do rasgo após deformação (litros)	ΔV (litros)
1	40	0,0111	-0,0037527	0,0148527	2,5	0,01616	1,2928
	80	0,015137	-0,015373	0,03051	4,95	0,01657	1,3256
	130	0,032543	-0,01613	0,048673	8,1	0,01712	1,3696
2	40	0,0019209	-0,0076085	0,0095294	2,1	0,01606	1,2848
	80	0,012609	-0,00051486	0,0131239	4,3	0,01644	1,3152
	130	0,015314	-0,0064933	0,0218073	6,95	0,01687	1,3496
3	40	0,002746	-0,0056837	0,0084297	1,65	0,016	1,28
	80	0,005492	-0,011367	0,016859	3,3	0,01628	1,3024
	130	0,0069559	-0,018708	0,0256639	5,35	0,01662	1,3296

Anexo I - Variações de pressão e volume no interior dos rasgos dos modelos dos aventais em função da carga de quinagem

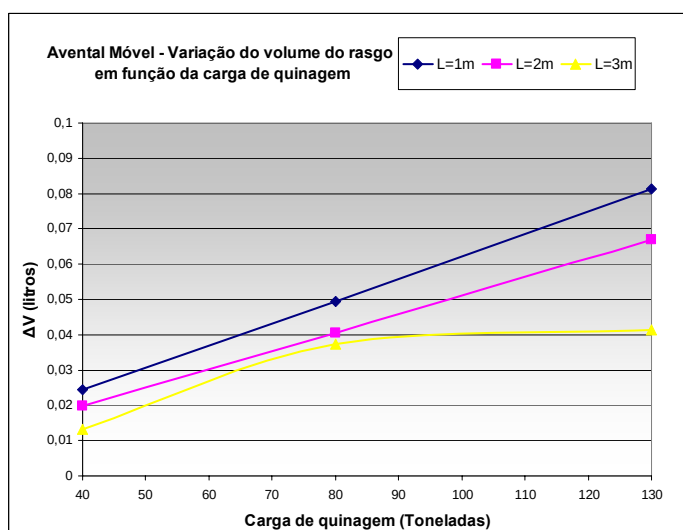
Avental móvel:



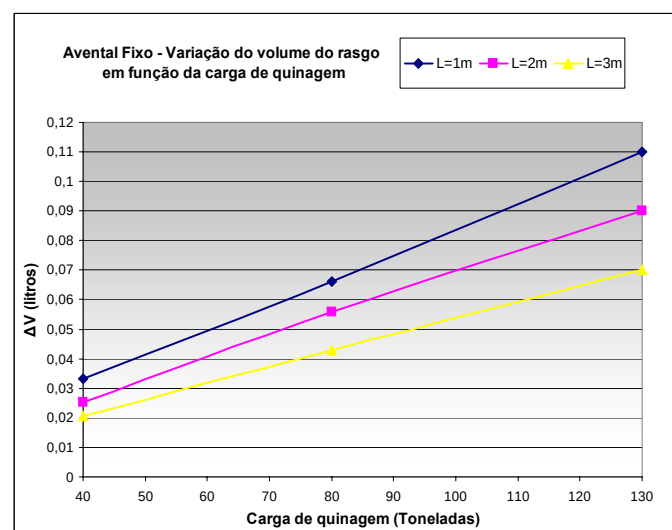
Avental fixo:



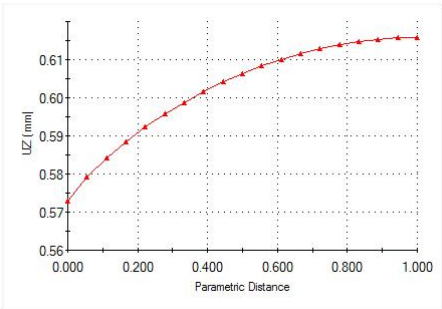
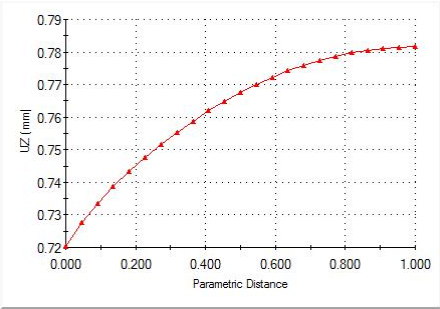
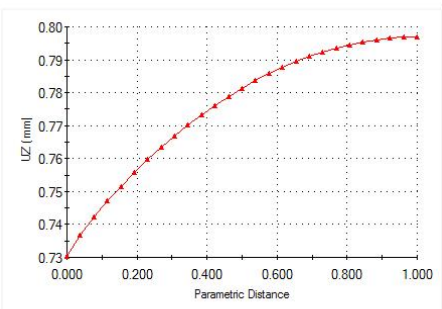
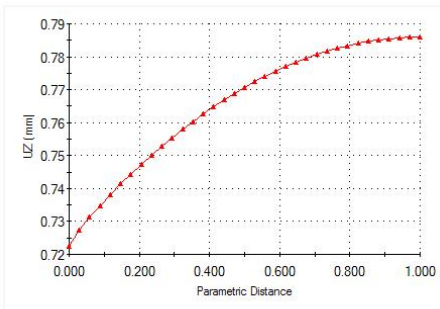
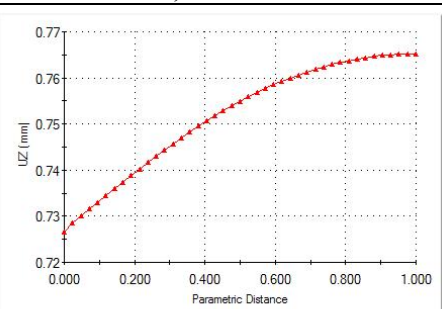
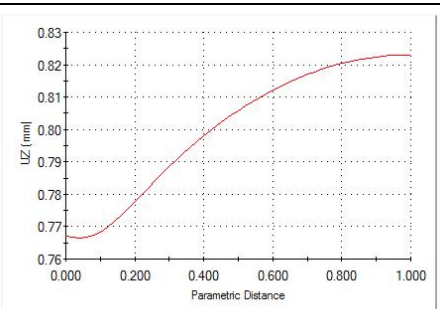
Avental móvel:



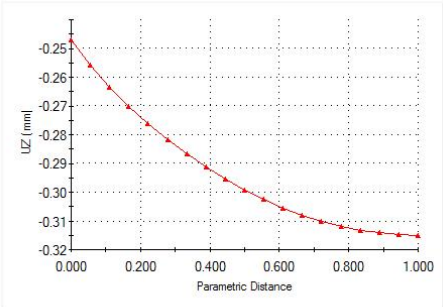
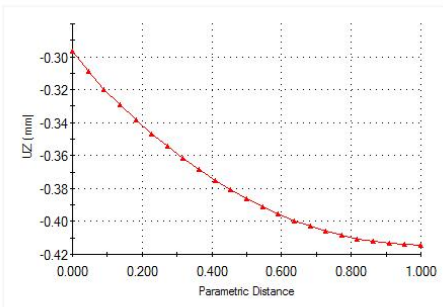
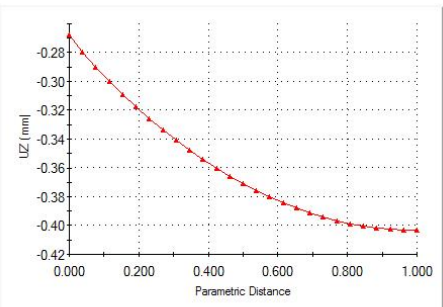
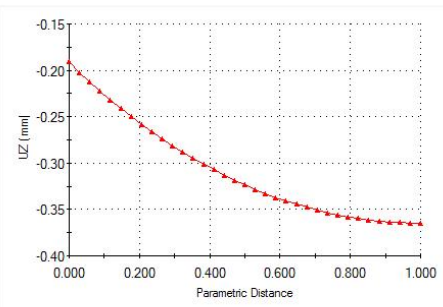
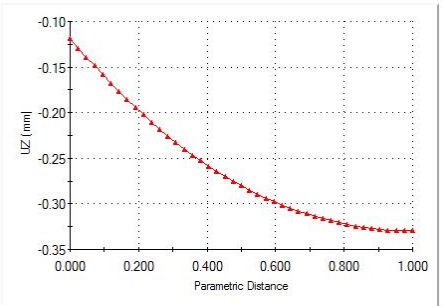
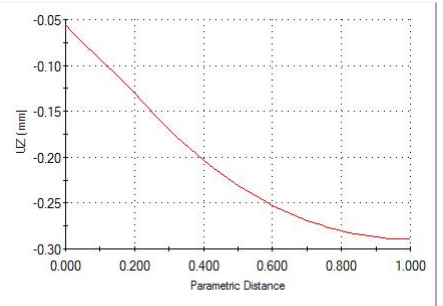
Avental fixo:



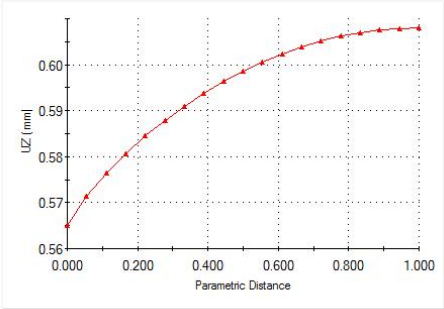
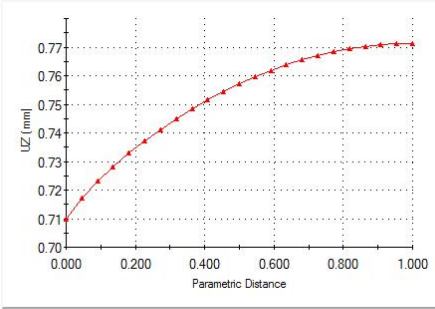
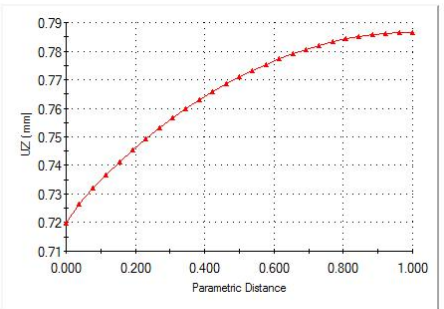
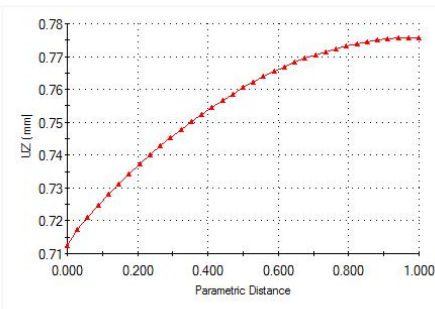
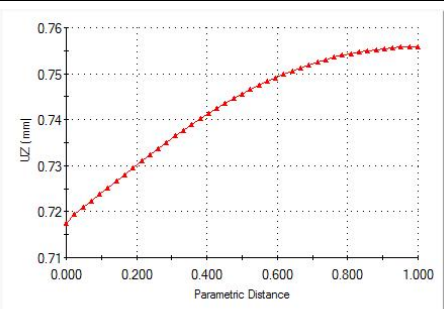
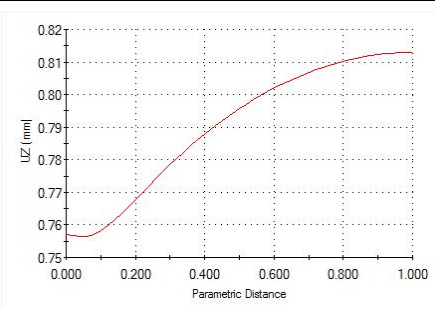
Anexo J - Deslocamentos em zz obtidos no avental móvel da modelação 1

Variação dos deslocamentos em zz ao longo do comprimento de quinagem para o avental móvel	
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 1m  Desl. máx. em zz = 0,61582mm Desl. mín. em zz = 0,57282mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,3m  Desl. máx. em zz = 0,78163mm Desl. mín. em zz = 0,72031mm
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,5m  Desl. máx. em zz = 0,79692mm Desl. mín. em zz = 0,73019mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 2m  Desl. máx. em zz = 0,78596mm Desl. mín. em zz = 0,72258mm
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 2,5m  Desl. máx. em zz = 0,76522mm Desl. mín. em zz = 0,72665mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 3m  Desl. máx. em zz = 0,82308mm Desl. mín. em zz = 0,76647mm

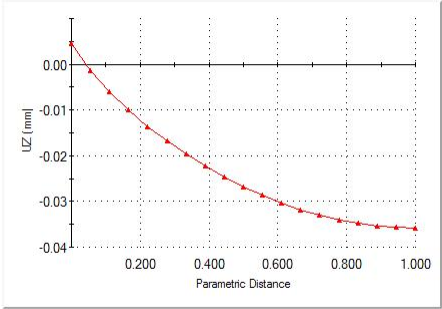
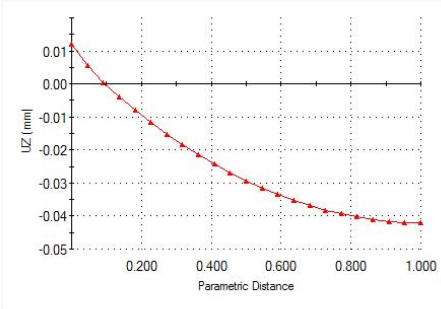
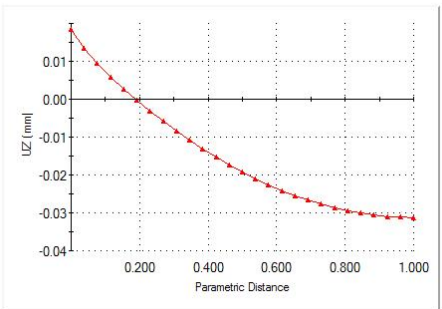
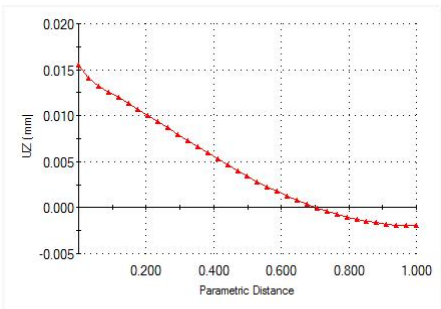
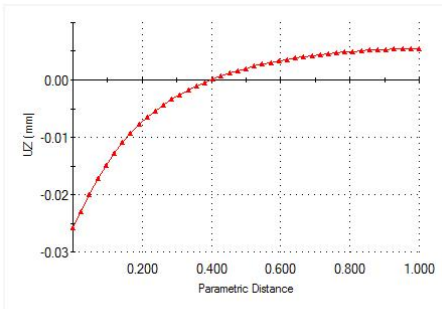
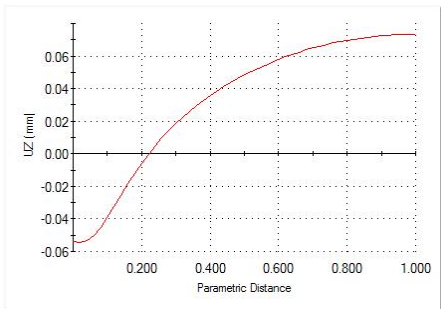
Anexo K - Deslocamentos em zz obtidos no avental fixo da modelação 1

Variação dos deslocamentos em zz ao longo do comprimento de quinagem para o avental fixo	
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 1m  Desl. máx. em zz = -0,24691mm Desl. mín. em zz = -0,31496mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,3m  Desl. máx. em zz = -0,2966mm Desl. mín. em zz = -0,41425mm
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,5m  Desl. máx. em zz = -0,26793mm Desl. mín. em zz = -0,4035mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 2m  Desl. máx. em zz = -0,19056mm Desl. mín. em zz = -0,36492mm
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 2,5m  Desl. máx. em zz = -0,11904mm Desl. mín. em zz = -0,32962mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 3m  Desl. máx. em zz = -0,05556mm Desl. mín. em zz = -0,28951mm

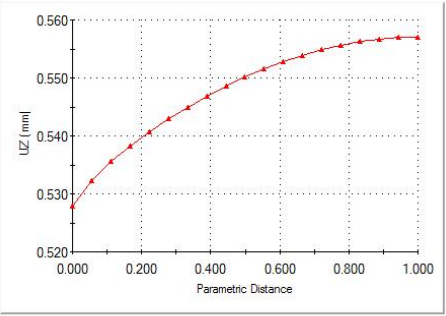
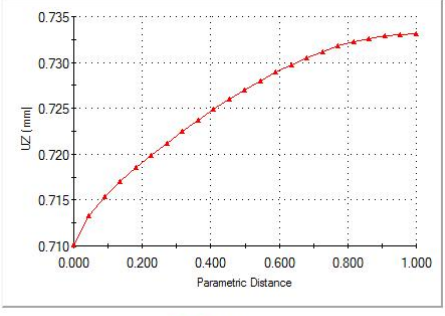
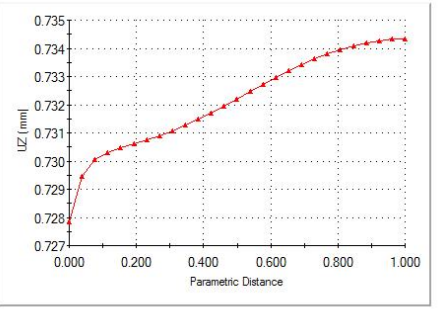
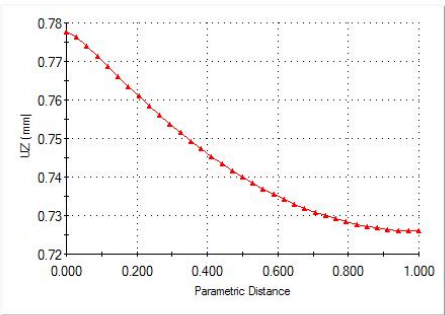
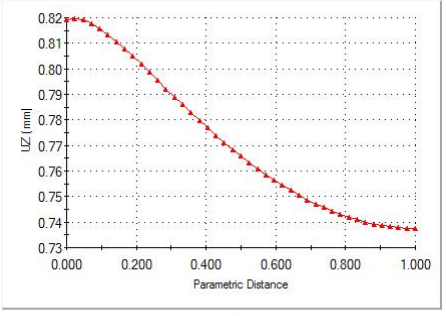
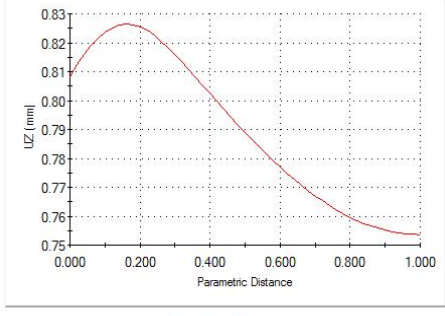
Anexo L - Deslocamentos em zz obtidos no avental móvel da modelação 2

Variação dos deslocamentos em zz ao longo do comprimento de quinagem para o avental móvel	
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 1m  Desl. máx. em zz = 0,60802mm Desl. mín. em zz = 0,56503mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,3m  Desl. máx. em zz = 0,77123mm Desl. mín. em zz = 0,70993mm
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,5m  Desl. máx. em zz = 0,78653mm Desl. mín. em zz = 0,71983mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 2m  Desl. máx. em zz = 0,77581mm Desl. mín. em zz = 0,71248mm
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 2,5m  Desl. máx. em zz = 0,75585mm Desl. mín. em zz = 0,71736mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 3m  Desl. máx. em zz = 0,81292mm Desl. mín. em zz = 0,7564mm

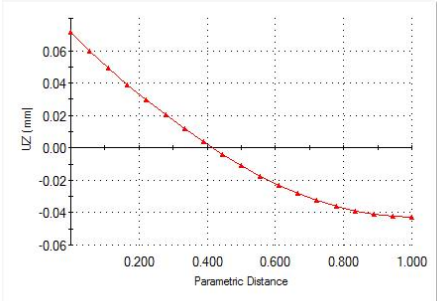
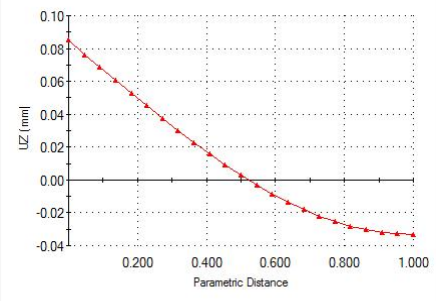
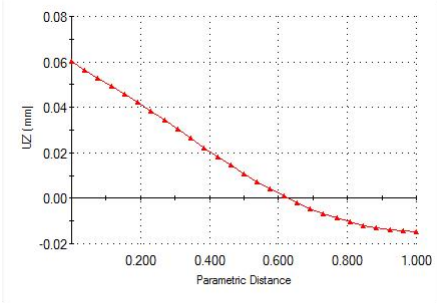
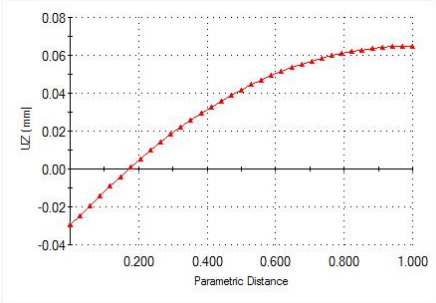
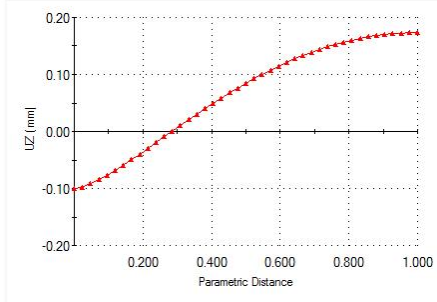
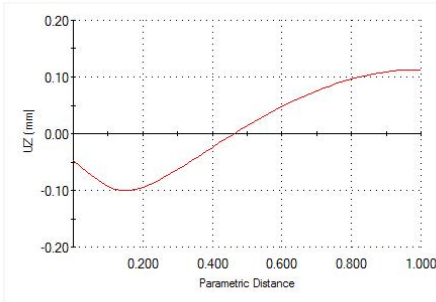
Anexo M - Deslocamentos em zz obtidos no avelal fixo da modelação 2

Variação dos deslocamentos em zz ao longo do comprimento de quinagem para o avelal fixo	
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 1m  Desl. máx. em zz = 0,0045804mm Desl. mín. em zz = -0,035762mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,3m  Desl. máx. em zz = 0,01207mm Desl. mín. em zz = -0,041992mm
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,5m  Desl. máx. em zz = 0,018374mm Desl. mín. em zz = -0,031219mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 2m  Desl. máx. em zz = 0,015538mm Desl. mín. em zz = -0,0019625mm
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 2,5m  Desl. máx. em zz = 0,0054138mm Desl. mín. em zz = -0,025806mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 3m  Desl. máx. em zz = 0,07346mm Desl. mín. em zz = -0,054335mm

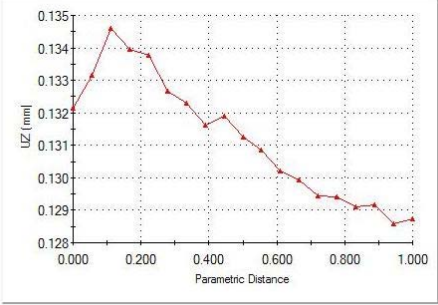
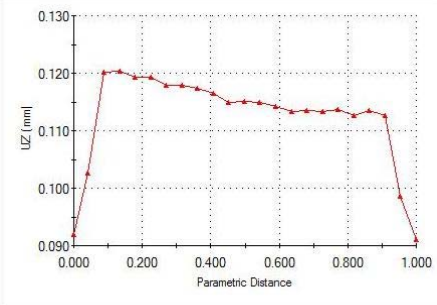
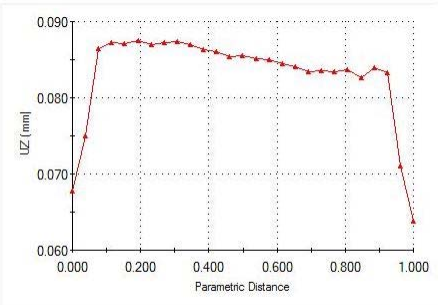
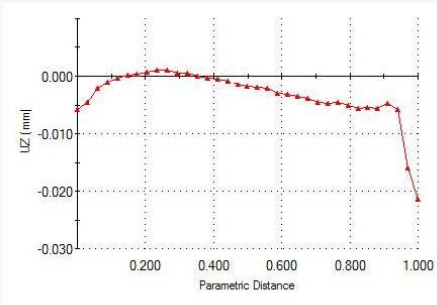
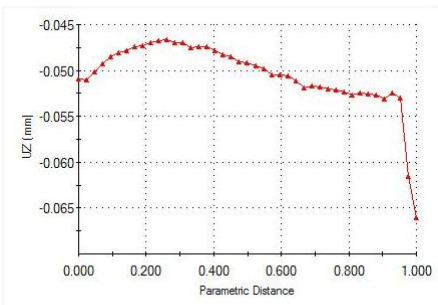
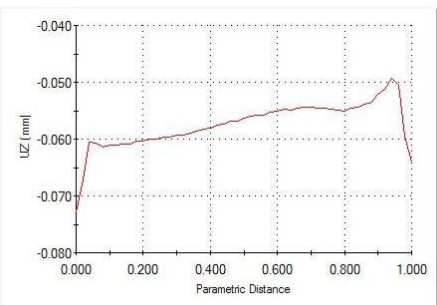
Anexo N - Deslocamentos em zz obtidos no avental móvel da modelação 3

Variação dos deslocamentos em zz ao longo do comprimento de quinagem para o avental móvel	
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 1m  Desl. máx. em zz = 0,55705mm Desl. mín. em zz = 0,52786mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,3m  Desl. máx. em zz = 0,73309mm Desl. mín. em zz = 0,71009mm
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,5m  Desl. máx. em zz = 0,73434mm Desl. mín. em zz = 0,72784mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 2m  Desl. máx. em zz = 0,77766mm Desl. mín. em zz = 0,72598mm
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 2,5m  Desl. máx. em zz = 0,81961mm Desl. mín. em zz = 0,7376mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 3m  Desl. máx. em zz = 0,82649mm Desl. mín. em zz = 0,75363mm

Anexo O - Deslocamentos em zz obtidos no avental fixo da modelação 3

Variação dos deslocamentos em zz ao longo do comprimento de quinagem para o avental fixo	
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 1m  Desl. máx. em zz = 0,071388mm Desl. mín. em zz = -0,042645mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,3m  Desl. máx. em zz = 0,085069mm Desl. mín. em zz = -0,033203mm
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,5m  Desl. máx. em zz = 0,060068mm Desl. mín. em zz = -0,014562mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 2m  Desl. máx. em zz = 0,064806mm Desl. mín. em zz = -0,029655mm
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 2,5m  Desl. máx. em zz = 0,17345mm Desl. mín. em zz = -0,10025mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 3m  Desl. máx. em zz = 0,11303mm Desl. mín. em zz = -0,10022mm

Anexo P - Deslocamentos em zz obtidos na modelação da quinadora com ferramentas de quinagem

Variação dos deslocamentos em zz ao longo do comprimento de quinagem	
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 1m  Desl. máx. em zz = 0,1356mm Desl. mín. em zz = 0,1296mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,3m  Desl. máx. em zz = 0,12028mm Desl. mín. em zz = 0,091012mm
Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 1,5m  Desl. máx. em zz = 0,087475mm Desl. mín. em zz = 0,063789mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 2m  Desl. máx. em zz = 0,0010114mm Desl. mín. em zz = -0,021416mm
Carga de quinagem de 100 toneladas distribuídas em 2,5m  Desl. máx. em zz = -0,04664mm Desl. mín. em zz = -0,066014mm	Carga de quinagem de 130 toneladas distribuídas em 3m  Desl. máx. em zz = -0,049308mm Desl. mín. em zz = -0,072881mm

