



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo e Projeto de um Arco de Proteção (ROPS) para Mini Trator Agrícola

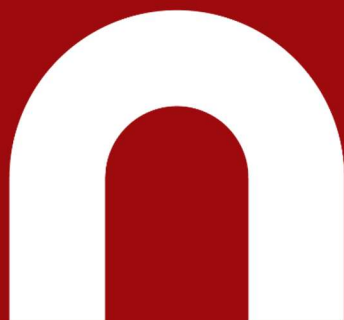
Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica
Especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos
Mecânicos

Autor

Mário Artur Coelho Valente

Orientador

Luís Manuel Ferreira Roseiro



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, abril de 2026

RESUMO

Os acidentes por capotagem de tratores agrícolas são uma das maiores causas de morte por acidente na indústria agrícola. Em Portugal ainda circulam inúmeros tratores de pequenas dimensões que, pelo seu ano de construção, não estão legalmente obrigados à montagem de uma estrutura que proteja o seu manobrador em caso de capotagem. Este projeto tem como objetivo a conceção de um arco de segurança para um mini trator agrícola que não está equipado de origem com sistema de proteção em caso de capotagem, nomeadamente um mini trator Kubota B7001E. O desenvolvimento do projeto seguiu o indicado na normalização existente e combina modelação geométrica, estudo numérico por elementos finitos e validação experimental. O trabalho propõe uma solução de ROPS (Roll Over Protection System) para o trator em estudo, mas que pode ser facilmente escalável para outros minis tratores.

Palavras-chave: Arco de Segurança; Mini trator; ROPS

ABSTRACT

Agricultural tractor rollover accidents are one of the leading causes of accidental death in the agricultural industry. In Portugal, numerous small tractors are still in circulation that, due to their year of manufacture, are not legally required to have a rollover protection structure. This project aims to design a safety arch for a mini agricultural tractor lacking a rollover protection system, namely a Kubota B7001E. The project's development followed established standards and combined geometric modelling, finite-element numerical analysis, and experimental validation. The work proposes a ROPS (Roll Over Protection System) solution for the tractor under study, but it can be easily scaled to other mini tractors.

Keywords: Safety arch; Mini tractor; ROPS

AGRADECIMENTO

Ao Professor Luís Roseiro pela disponibilidade, o incentivo e a paciência durante a realização deste projeto.

Ao Marco pela cedência da bancada e ajuda imprescindível na realização dos ensaios físicos.

ÍNDICES

Índice de texto

Índice de texto.....	iv
Índice de figuras.....	vi
Índice de Tabelas.....	ix
Lista de siglas, acrónimos e símbolos.....	x
Lista de siglas e acrónimos.....	x
Lista de símbolos.....	xi
Lista de Abreviaturas.....	xiii
1 Introdução	1
1.1 Introdução.....	1
Incentivo à adaptação de ROPS em França.....	2
Incentivo à aplicação de ROPS nos Estados Unidos da América (EUA).....	4
1.2 Definição de objetivos.....	5
2 Enquadramento Legal e Estado da arte.....	7
2.1 Legislação aplicável.....	7
2.2 Análise do Kubota B7001E no âmbito do regulamento 1322/2014 de 19 de setembro de 2014	9
2.3 Estudos e Projetos de ROPS para Tratores Agrícolas	12
3 Conceção e projeto do rops para o Kubota B7001E.....	14
3.1 Modelação 3D do Trator	14
3.2 Modelação 3D do ROPS.....	19
3.3 Modelo Numérico do ROPS.....	22
3.3.1 Modelo sem contacto no ponto de carregamento.....	24
3.3.2 Modelo com contacto no ponto de carregamento.....	25
3.3.3 Comparação dos modelos com e sem contacto	25
3.3.4 Discussão de Resultados.....	37
3.4 Testes experimentais ao ROPS.....	38
3.4.1 Bancada de testes.....	38
3.4.2 Instrumentação do ROPS com extensometria	42
3.4.3 Metodologia de Teste.....	43
3.4.4 1ª fase - Ensaio em regime elástico.....	44

3.4.5	2ª fase - Ensaio em regime plástico.....	52
3.5	Discussão Global dos resultados.....	54
3.5.1	Verificação de conformidade dos deslocamentos.	58
4	Conclusões.....	59
	Trabalhos Futuros	60
	Bibliografia	60

Índice de figuras.

Figura 1.1 – Extrato do documento “Réglementation des trateurs agricoles ou forestiers” emitido por Evelyne Simonnet, ministère de l’alimentation, de l’agriculture et de la pêche, Secrétariat Général - Service des affaires financières, sociales et logistiques – BML com as condições para a colocação no mercado francês de um trator usado. (Simonnet, 2009)	3
Figura 1.2 – Exemplo de certificado de conformidade. (Simonnet, 2009)	3
Figura 1.3 – Exemplo do CROPS proposto pelo NIOSH, para os tratores Ford da série 8N, num documento de uso e cópia livre (NIOSH, s.d.).....	5
Figura 1.4 – Imagem do mini trator Kubota B7001E.	6
Figura 3.1 – Malha 3D do trator agrícola obtido por fotogrametria.....	15
Figura 3.2 – Modelo 3D vetorial do trator agrícola Kubota B7000E.....	16
Figura 3.3 – Localização do SIP.	16
Figura 3.4 – Extrato do regulamento 1322/2014, vistas laterais da zona livre. (dimensões em milímetros)	17
Figura 3.5 – Extrato do regulamento 1322/2014, vista de cima da zona livre. (dimensões em milímetros)	17
Figura 3.6 – Sobreposição da zona livre sobre o modelo 3D.....	18
Figura 3.7 – Esboço conceptual da estrutura de proteção (1695mm x 728mm x 80mm).	19
Figura 3.8 – Planos de contacto.....	20
Figura 3.9 – Esboço da montagem da estrutura.....	22
Figura 3.10 – Vista dos dois modelos simplificados, modelo com contacto à esquerda e modelo sem contacto à direita.	23
Figura 3.11 – Gráficos de convergência de malha.	26
Figura 3.12 – Modelo para análise de elementos finitos correspondente à montagem no trator.	29
Figura 3.13 – Restrição dos graus de liberdade do modelo correspondente à montagem no trator.	29
Figura 3.14 – Modelo para análise de elementos finitos correspondente ao ensaio físico.	30
Figura 3.15 – Restrições de contacto e graus de liberdade.....	30

Figura 3.16 - Modelo ensaio com restrições de graus de liberdade e conjunto das forças aplicadas.	31
Figura 3.17 – Malha do modelo em modo <i>coarse</i>	31
Figura 3.18 – Detalhe da malha com limitação a $3mm$ da dimensão máxima dos seus elementos.	32
Figura 3.19 - Carregamento Lateral – Modelo do Ensaio – Distribuição dos deslocamentos resultantes (m).	32
Figura 3.20 - Carregamento Lateral – Modelo do Ensaio – Distribuição das tensões de von Mises (Pa).	33
Figura 3.21 - Carregamento Posterior – Modelo do Ensaio - Distribuição dos deslocamentos resultantes (m).	33
Figura 3.22 - Carregamento Posterior – Modelo do Ensaio - Distribuição das tensões de von Mises (Pa).	34
Figura 3.23 - Carregamento Lateral - Modelo do Trator – Distribuição das tensões de von Mises (Pa).	34
Figura 3.24 - Carregamento Lateral - Modelo do Trator - Distribuição dos deslocamentos resultantes (m).	35
Figura 3.25 - Carregamento Posterior - Modelo Trator – Distribuição das tensões de von Mises (Pa).	35
Figura 3.26 - Carregamento Posterior - Modelo Trator – Zonas com tensões de von Mises acima de $275 \times 10^6 Pa$	36
Figura 3.27 – Detalhe da ligação entre as bases e as placas de ligação – Zonas com tensões de von Mises superiores a $275 \times 10^6 Pa$	36
Figura 3.28 – Detalhe da ligação entre as bases e as placas de ligação – Zonas com tensões de von Mises superiores a $470 \times 10^6 Pa$	36
Figura 3.29 - Carregamento Posterior - Modelo Trator - Distribuição dos deslocamentos resultantes (m).	37
Figura 3.30 – Esquema da bancada de esticamento utilizada nos ensaios laboratoriais (dimensões em mm).	39
Figura 3.31 – Esquema da montagem para os ensaios de carga longitudinal.	40
Figura 3.32 – Esquema da montagem para o ensaio de carga lateral.	40
Figura 3.33 – Esquema da montagem para os ensaios de esmagamento.	41
Figura 3.34 – Pormenor da fonte para as medições de extensometria.	42
Figura 3.35 – Pormenor de uma da roseta montada sobre a base.	42
Figura 3.36 – Montagem do esticador e da balança na bancada de ensaio para o ensaio horizontal.	45

Figura 3.37 – Montagem da estrutura e colocação da cinta de tração no ensaio de carga lateral.....	45
Figura 3.38 – Montagem da estrutura para ensaio lateral.....	46
Figura 3.39 – Montagem da estrutura e da cinta de tração no ensaio de esmagamento.	46
Figura 3.40 – Deslocamentos, 1º carregamento horizontal posterior.....	48
Figura 3.41 – Deslocamentos, 2º carregamento horizontal posterior.....	48
Figura 3.42 – Gráfico de comparação das tensões de von Mises obtidas nos modelos numérico e experimental, carregamento horizontal posterior – roseta colada no suporte.	49
Figura 3.43 – Gráfico de comparação das tensões de von Mises obtidas nos modelos numérico e experimental, carregamento horizontal posterior – roseta colada na base.	49
Figura 3.44 – Deslocamento, 1º carregamento horizontal lateral.	50
Figura 3.45 – Deslocamento, 2º carregamento horizontal lateral.	51
Figura 3.46 - Gráfico de comparação das tensões de von Mises obtidas nos modelos numérico e experimental, carregamento horizontal lateral – roseta colada na base.	51
Figura 3.47 – Gráfico de comparação das tensões de von Mises obtidas nos modelos numérico e experimental, carregamento horizontal posterior – roseta colada no arco.	52
Figura 3.48 – Gráfico comparativo dos deslocamentos no carregamento horizontal posterior.....	55
Figura 3.49 – Gráfico comparativo dos deslocamentos do carregamento horizontal lateral.....	57
Figura 3.50 – Carregamento horizontal posterior, estimativa de deslocamentos....	57
Figura 3.51 – Carregamento horizontal lateral, estimativa de deslocamentos.....	58
Figura 3.52 – Simulação dos deslocamentos aplicados ao modelo 3D.	58

Índice de Tabelas.

Tabela 2.1 – Verificação do Kubota B7001E face ao regulamento 1322/2014.....	10
Tabela 3.1 – Deslocamentos medidos com estação total nos pontos de controle para o carregamento horizontal posterior.....	53
Tabela 3.2 - Deslocamentos medidos com estação total nos pontos de controle para o carregamento horizontal lateral.	54
Tabela 3.3 – Tabela comparativo dos deslocamentos do carregamento horizontal posterior.....	55
Tabela 3.4 - Tabela comparativo dos deslocamentos do carregamento horizontal lateral.	56

LISTA DE SIGLAS, ACRÓNIMOS E SÍMBOLOS

Lista de siglas e acrónimos.

CROPS	<i>Cost-Efective Rollover Protection Structure</i> – estrutura de proteção em caso de capotagem de baixo custo
FEM	<i>Finite Element Model</i> – modelo de elementos finitos
FEA	<i>Finite Element Analysis</i> – análise de elementos finitos
INE	Instituto Nacional de Estatística
ISEC	Instituto Superior de Engenharia de Coimbra
NIOSH	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i> – Instituto Nacional de segurança e saúde ocupacional
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i> – Administração de segurança e saúde ocupacional
<i>Retrofit</i>	Processo de modernização de um equipamento sem substituição integral do mesmo.
ROPS	<i>Roll Over Protection System</i> – estrutura de proteção em caso de capotagem
RVCR	<i>Regulation on Vehicle Construction Requirements</i> – Regulamento de Requisitos na Construção de Veículos
SAE	Society of Automotive Engineers – Sociedade de Engenheiros Setor Automóvel
SI	Sistema Internacional de Unidades

Lista de símbolos.

Alfabeto latino

a_h	Metade da regulação horizontal do banco (mm)
a_v	Metade da regulação vertical do banco (mm)
B	Largura mínima total do trator (mm)
B_o	Largura exterior máxima da estrutura de proteção (mm)
D	Deformação da estrutura no ponto e no eixo de aplicação da carga (mm)
D'	Deformação da estrutura para a energia calculada requerida (mm)
E_{il}	Entrada de energia que deve ser absorvida durante a aplicação da carga longitudinal (J)
E_{is}	Entrada de energia que deve ser absorvida durante a aplicação da carga longitudinal (J)
F	Força da carga estática (N)
$F-D$	Diagrama força/deformação
F_{max}	Carga estática máxima que intervém durante a aplicação, excluindo a sobrecarga (N)
F_v	Força de esmagamento vertical (N)
I	Momento de inercia de referência do trator (kgm^2)
L	Distancia entre eixos de referência do trator (mm)
M	Massa de referência do trator (kg)
MMA	Massa máxima admissível (kg)
rpm	Rotações por minuto

Alfabeto grego

ε_a	Extensão segundo e eixo a (%)
ε_b	Extensão segundo e eixo b (%)
ε_c	Extensão segundo e eixo c (%)
σ	Tensão (kPa)
ν	Coefficiente de Poisson
E	Módulo de Elasticidade Longitudinal (GPa)

Lista de Abreviaturas.

Desloc.	Deslocamento
Long.	Longitudinal
Trans.	Transversal
Vert.	Vertical

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo pretende contextualizar o panorama atual quanto à adaptação de sistemas de proteção em caso de capotagem em tratores agrícolas que, pela sua data de fabrico e entrada em serviço, não estão equipados com nenhum sistema similar.

1.1 Introdução

A implementação e o uso de sistemas de segurança em tratores agrícolas estão diretamente relacionados com o número de vítimas em acidentes com capotamento. Um estudo realizado nos Estados Unidos da América (EUA) demonstra uma diminuição do risco para o condutor de um trator que esteja equipado com um sistema de proteção em caso de capotagem. Neste País, desde 1976 que os tratores agrícolas devem estar com arco e cinto de segurança. (Groves & Reynolds, 2000) referem que recentemente, as únicas mortes associadas a capotagem de tratores que estavam equipados com *Roll Over Protection Systems* (ROPS), ocorreram nos casos em que o condutor não tinha colocado o cinto de segurança.

A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) refere para o Reino Unido uma média entre 35 e 45 mortes por ano até 1970 em acidentes com tratores agrícolas (OCDE, s.d.). A partir de 1970 o Reino Unido introduziu a obrigatoriedade de que todos os tratores novos fossem comercializados com arco de segurança, o que conduziu a uma redução para entre 20 a 35 mortes por ano. A partir de 1977 foi instituída a obrigatoriedade de instalar um sistema de arco de segurança em todos os tratores em serviço. Em consequência, houve uma redução para entre 4 a 8 mortos por ano, com a utilização do cinto de segurança (HSE, s.d.).

Em Portugal ainda circulam e operam legalmente inúmeros tratores agrícolas sem qualquer sistema de proteção do condutor em caso de capotagem. Em paralelo, verifica-se que o parque nacional de pequenos tratores agrícolas continua muito ativo com inúmeros pequenos tratores, importados, que são colocados no mercado de usados a preços muito competitivos. Uma parte considerável destes tratores não estão matriculados uma vez que não se destinam a circular fora da exploração agrícola onde operam. Estes pequenos tratores, pelas suas dimensões, versatilidade e baixo custo de aquisição e operação, são adequados às micro explorações agrícolas existentes. Uma parte significativa destas explorações é informal e estes pequenos tratores que operam não estão matriculados, pelo que se torna difícil obter números fidedignos relativamente ao parque em serviço.

Destes pequenos tratores são raras as unidades que estão equipados de origem com sistema de proteção em caso de capotagem. Nos casos em que o trator está equipado

com um sistema de proteção contra capotagem, geralmente é uma instalação do tipo caseiro, sem validação da sua eficácia.

Sendo um problema transversal a todos os países em que há uma mecanização da agricultura, a abordagem à redução do risco para o operador de um trator agrícola em caso de capotagem assumiu prioridades distintas. Em alguns países, houve desde muito cedo uma preocupação com o aumento da segurança dos tratores em serviço, como por exemplo a Suécia, pioneira na introdução do ROPS em 1959, tendo tornado obrigatória a sua instalação para todos os tratores agrícolas operados por funcionário desde 1965 e na generalidade dos tratores desde 1980. A Alemanha tornou o ROPS obrigatório em todos os tratores vendidos novos desde 1970 e a adaptação de um ROPS para todos os tratores em utilização a partir de 1977. Outros países agiram mais tarde e assumem atualmente iniciativas para implementar a instalação do ROPS nestes tratores. É o caso da França e da Itália, que têm uma abordagem similar e partilham a metodologia de adaptação de um ROPS, que aconselham aos atores do mercado, e dos EUA onde a adaptação de um ROPS é incentivada.

Em Portugal não se identificam, nem se constatam atualmente políticas de incentivo à adaptação de ROPS nos equipamentos mais antigos. De modo a perceber exemplos de políticas de incentivo à adaptação de ROPS, contextualizam-se os casos da França e dos EUA.

Incentivo à adaptação de ROPS em França.

Em França, a necessidade de cumprir a legislação existente relativa à segurança no trabalho levou a uma abordagem em favor da instalação de equipamentos de segurança contra capotagem em todos os tratores registados. O documento informativo “*Réglementation des trateurs agricoles ou forestiers*” (Simonnet, 2009) elenca as condições para colocação de um trator no mercado de usados. Na figura 1.1 apresenta-se um extrato desse mesmo documento.

Da sua leitura pode verificar-se que, mesmo os equipamentos mais antigos e que pela sua idade não estavam obrigados a estar equipados com um dispositivo ROPS devem, para poderem ser comercializados, ser postos em conformidade com o código do trabalho Francês (artigos R.4234-1 a R.4324-45). O artigo R.4324-31 do código do trabalho Francês obriga à proteção contra capotagem ou tombamento dos trabalhadores que operem equipamentos móveis. O que vem obrigar à instalação de um dispositivo ROPS e à emissão de um certificado de conformidade antes da comercialização de um equipamento usado do tipo trator agrícola.

A figura 1.2 apresenta uma minuta de um certificado de conformidade.

● 2 LA MISE SUR LE MARCHÉ DES TRACTEURS D'OCCASION

34

MISE SUR LE MARCHÉ D'OCCASION DES TRACTEURS EN PROVENANCE DE FRANCE					
Équivalence de conformité avec les prescriptions techniques applicables en fonction de la date de mise en service à l'état neuf et du maintien en conformité.					
Dates de mise en service à l'état neuf en France	Règles techniques appliquées lors de la mise en service à l'état neuf	Maintien en état de conformité ?	Équivalence de conformité avec R.4324-1 à R.4324-45	Obligation de mise en conformité avec les prescriptions techniques de R.4324-1 à R.4324-45	Obligation de mise en conformité avec les règles techniques du décret n°2005-1236 (pour une vente à un utilisateur)
Avant le 1er janvier 1976	Aucune		Non	Oui	
Entre le 1er janvier 1976 et le 31 décembre 1981	Arrêté du 15/06/975		Non	Oui	
Entre le 1er janvier 1982 et le 1er octobre 2005	Décret n° 80-1091 du 24/12/1980	Oui	Oui		
		Non	Non	Oui	
Entre le 2 octobre 2005 et le 1er juillet 2009	Décret n° 80-1091 du 24/12/1980	Oui	Oui		
		Non	Non	Oui	
	Décret n°2005-1236 du 30/09/2005	Oui			Oui
		Non			
Après le 2 juillet 2009	Décret n°2005-1236 du 30/09/2005	Oui			Oui
		Non			



Les tracteurs agricoles et forestiers à roues qui bénéficient lors de leur mise en service à l'état neuf de la réception européenne prévue par la directive 74/150/CEE modifiée (applicable depuis le 03/1989) ou la directive 2003/37/CE (depuis le 9 juillet 2003) et qui sont maintenus en état de conformité avec cette directive sont aussi considérés comme conformes aux dispositions du décret n°2005-1236.

Figura 1.1 – Extrato do documento “Réglementation des tracteurs agricoles ou forestiers” emitido por Evelyne Simonnet, ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche, Secrétariat Général - Service des affaires financières, sociales et logistiques – BML com as condições para a colocação no mercado francês de um trator usado. (Simonnet, 2009)

Exemple de certificat de conformité

CERTIFICAT DE CONFORMITÉ

Le responsable de la vente soussigné :

déclare que le tracteur agricole ou forestier d'occasion désigné ci-après :

est conforme aux dispositions techniques précisées ci-après qui lui sont applicables :

☐ (1) décret n°2005-1236 du 30 septembre 2005 (annexe II)

☐ (1) décret n°80-1091 du 24 décembre 1980

☐ (1) article R.233-15 à R.233-41 du code du travail

☐ (1) (2) :

Fait à le Signature :

Nom et Fonction :

(1) Cocher la case appropriée

(2) Nature, titre du ou des actes législatifs ou réglementaires s'il s'agit d'une réglementation d'un État membre de l'Espace Économique Européen considéré comme satisfaisant les objectifs de la réglementation française.

Réglementation des tracteurs agricoles ou forestiers - Octobre 2009

2 - La mise sur le marché des tracteurs d'occasion

Figura 1.2 – Exemplo de certificado de conformidade. (Simonnet, 2009)

Para facilitar a adaptação dos sistemas ROPS nos tratores em circulação, este país disponibiliza um software que, mediante a introdução das características do trator, fornece os elementos para o fabrico da estrutura de um ROPS. No entanto, este

sistema foi pensado para tratores de maiores dimensões do que o trator objeto deste projeto, não sendo possível a sua aplicação no espaço disponível entre rodas.

Incentivo à aplicação de ROPS nos Estados Unidos da América (EUA).

Tal como em França, nos Estados Unidos da América a abordagem passa pelo incentivo à instalação de equipamentos de proteção contra capotagem nos tratores que não estão atualmente equipados com este tipo de dispositivo de segurança. A *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) recomenda a adaptação de tratores que não disponham de origem qualquer sistema ROPS, indicando a montagem de um sistema de segurança de baixo custo desenvolvido em 2008 pelo *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH). Este sistema é designado como *Cost-Effective Rollover Protection Structure* (CROPS) e consiste num arco de segurança composto por tubos de secção retangular com ligações aparafusadas com placa de travamento e ligados ao eixo traseiro com uma abraçadeira composta por duas travessas aparafusadas entre si. Esta solução evita fragilizar a estrutura do equipamento com abertura de pontos de ancoragem. No entanto, tem a limitação da compatibilidade do eixo traseiro já que requer uma superfície plana para a eficácia da fixação. Os desenhos técnicos para a sua construção e montagem para quatro modelos de tratores antigos, mas que ainda são frequentes no parque de máquinas doméstico, são disponibilizados quer a particulares quer a empresas, que os pretendam comercializar, sendo destinadas apenas ao mercado interno. Estas soluções têm evoluído até um sistema retrátil de rearmamento automático, mas, tal como no sistema Francês, sempre destinadas a equipamentos de dimensões superiores àquelas do trator objeto deste projeto, que será enquadrado à frente. A figura 1.3 ilustra uma das soluções propostas cujos ensaios de validação seguiram a norma SAE J2194. Este projeto está disponível num documento de uso e cópia livre disponibilizado pelo NIOSH (NIOSH, s.d.).

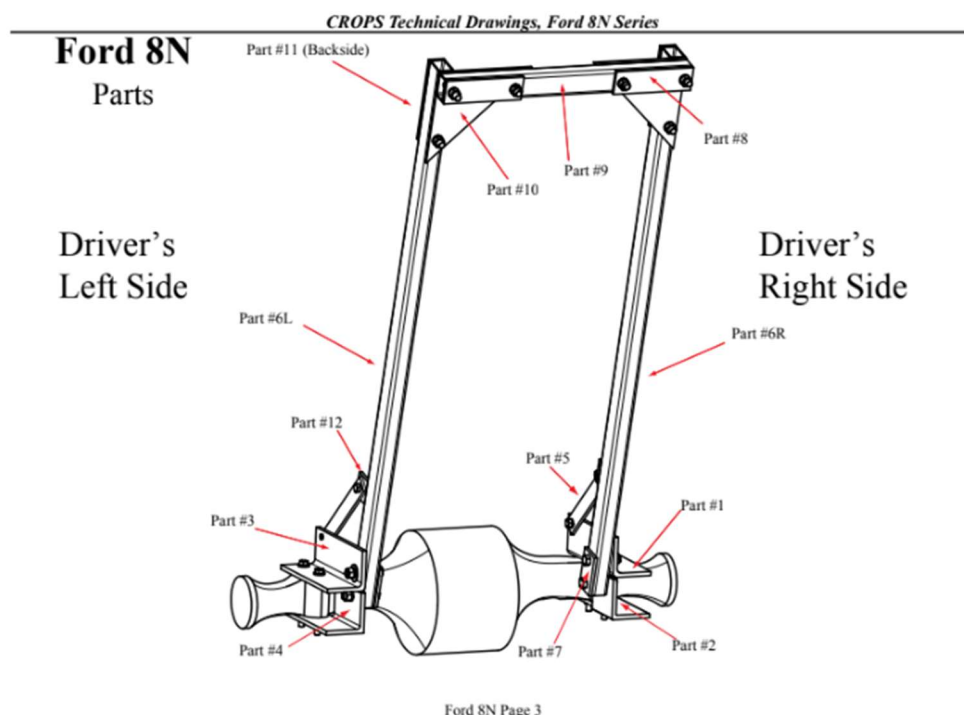


Figura 1.3 – Exemplo do CROPS proposto pelo NIOSH, para os tratores Ford da série 8N, num documento de uso e cópia livre (NIOSH, s.d.).

1.2 Definição de objetivos

Os exemplos atrás descritos, em implementação em França e nos EUA mostram uma abordagem interessante para a vulgarização da adaptação de ROPS nos tratores antigos que permanecem em serviço, uma vez que são soluções testadas e validadas ao longo dos anos em que foram implementadas. No entanto, nestas soluções a estrutura é composta por prumos verticais, soldados no caso Francês e aparafusados no caso Americano, concebidas para tratores de média dimensão, em que o espaço livre permite que sejam retos desde a parte superior da estrutura até a sua fixação no eixo. Ora, em tratores de pequena dimensão, também conhecidos por mini tratores, o espaço disponível não permite a implementação deste tipo de montagem. Identifica-se assim a necessidade de desenvolver soluções de ROPS para este tipo de tratores, particularmente muito utilizados em Portugal.

Este é o caso dos tratores das séries B5000/B6000/B7000 do fabricante KUBOTA, muito frequentes no parque nacional, sendo possível encontrar unidades no comércio de usados em perfeitas condições de funcionamento. As características técnicas das três séries são muito semelhantes variando essencialmente na capacidade da motorização e existência ou não de tração integral. Das três séries, a 7000 é a que está equipada com um motor de maior capacidade e que apresenta na sua versão de quatro rodas motrizes a maior massa de entre as três séries que partilham a mesma base.

O presente trabalho tem como objetivo conceber um equipamento de proteção em caso de capotagem para um mini trator que não está equipado de origem com qualquer tipo de sistema de segurança similar. Foi escolhido um trator B7000 como base para este projeto, dado ser o mais pesado das três séries. Entende-se que um ROPS validado para este modelo estará apto a ser montado nas outras séries 5000 e 6000.

O trator em análise é um Kubota B7001E. Trata-se de um micro trator de peso e dimensões reduzidas, mas com uma potência elevada para os tratores da mesma categoria. Está equipado com um motor diesel, de três cilindros, com de 762 cc de capacidade que produz 11.5 kW às 3000 rpm e 43 Nm às 1800 rpm . A versão *E* tem tração traseira, com uma caixa de três velocidades e uma caixa de redutoras. A tomada de força tem três velocidades, 540, 860 e 1000 rpm . No manual, aparece indicado o peso da versão de tração integral que é de 476 kg. Está equipado com um sistema de engate de três pontos com elevação hidráulica. A via dianteira é de 90 cm e a via das rodas traseiras é regulável com o reposicionamento das jantes no eixo através de um sistema de fixação com cavilha. A figura 1.4 apresenta o mini trator considerado. Importa referir que no caso particular desta unidade, já foi instalado um arco de segurança, mas de construção artesanal e com origem desconhecida.



Figura 1.4 – Imagem do mini trator Kubota B7001E.

O desenvolvimento deste trabalho de projeto assenta em quatro objetivos:

- Identificar a normalização e legislação aplicável ao projeto e construção de sistemas de proteção para tratores em caso de capotagem;
- Conceber um dispositivo de proteção em caso de capotagem, do tipo arco de segurança posterior, aplicável ao mini trator em análise;
- Avaliar o dispositivo de proteção de acordo com a normalização aplicável, com recurso a um modelo numérico de elementos finitos;
- Construir e avaliar experimentalmente o dispositivo de proteção de acordo com a normalização aplicável.

2 ENQUADRAMENTO LEGAL E ESTADO DA ARTE

Em Portugal os acidentes com tratores, e em particular a capotagem, continua a representar uma parte significativa das mortes acidentais na atividade agrícola. A Prevenção Rodoviária Portuguesa refere que dois em cada três acidentes em que ocorra capotamento do trator agrícola são mortais. A Guarda Nacional Republicana publicou numa nota informativa sobre o início da campanha “Campo Seguro” para o ano de 2025, indicando 40 mortes em 2023 derivadas de acidentes com tratores agrícolas em Portugal. Estes números colocam Portugal, juntamente com a Roménia, nos piores países europeus em mortes por acidentes com trator agrícola. Segundo a Confederação Nacional das Cooperativas Agrícolas e do Crédito Agrícola de Portugal (CONFAGRI), dos mais de 170000 tratores registados para atribuição de subsídio de gasóleo, cerca de metade terá mais de 50 anos, o que, como se enquadra à frente, os isenta da obrigação de instalar um dispositivo ROPS.

2.1 Legislação aplicável

A OCDE estabeleceu um procedimento normalizado entre os seus membros aderentes para o teste de tratores agrícolas e que estão definidos nos códigos que vêm sendo publicados desde 1959. Posteriormente houve a adesão do Brasil, China, Índia, Indonésia e África do Sul. Em 1966 foi publicado o Código 3 que harmoniza os ensaios dinâmicos de validação de estruturas ROPS e em 1983 foi publicado o código 4 que harmoniza os ensaios estáticos.

Em Portugal é obrigatório desde 1 de janeiro de 1994 que todos os tratores agrícolas comercializados novos estejam equipados com um sistema ROPS e desde 1996 esse sistema deve possuir marcação de conformidade CE.

Apesar de nos últimos anos terem existido vários programas de apoio à modernização dos equipamentos agrícolas, continuam em serviço inúmeros tratores agrícolas de pequenas dimensões, que são anteriores a 1994 e por isso não estão obrigados a instalar um arco de segurança. Alguns desses tratores não estão legalizados para circular na via pública ficando circunscritos ao interior da exploração agrícola. Foi feita uma pesquisa à legislação em vigor com enquadramento no desenvolvimento deste projeto.

Portaria 517-A/96 de 27 de setembro.

Esta portaria estipula no seu anexo V, que todos os tratores agrícolas homologados ou matriculados a partir de 1 de janeiro de 1994 devem cumprir com as diretivas 77/536; 79/662; 82/953; 86/298; 87/402; 88/413; 89/680; 89/681; 89/682. Estas diretivas foram posteriormente revogadas pela Regulamento (EU) 167/2013 de 5 de fevereiro - relativo à homologação e fiscalização do mercado de tratores agrícolas e florestais.

Decreto-Lei n.º 50/2005 de 25 de fevereiro.

Este Decreto-Lei transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2001/45/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 27 de junho, relativa às prescrições mínimas de segurança e de saúde para a utilização pelos trabalhadores de equipamentos de trabalho, e revoga o Decreto-Lei n.º 82/99, de 16 de março. Na alínea a) ponto 5 do artigo 23.º deste Decreto-Lei pode constatar-se que os tratores matriculados em anos anteriores a 1994 não estão obrigados à montagem de estruturas de proteção. O artigo 23.º deste Decreto-Lei refere no seu ponto 2 que “Os equipamentos de trabalho que transportem trabalhadores devem limitar os riscos de capotamento por meio de uma estrutura que os impeça de virar mais de um quarto de volta ou, se o movimento puder exceder um quarto de volta, por uma estrutura que garanta espaço suficiente em torno dos trabalhadores transportados ou outro dispositivo de efeito equivalente”. Nesse mesmo artigo, o ponto 5 indica que “A instalação das estruturas de proteção previstas no n.º 2 não é obrigatória: a) Quando o equipamento se encontra estabilizado durante a sua utilização ou quando a concepção do mesmo impossibilita o seu capotamento; b) Em tratores agrícolas matriculados antes de 1 de janeiro de 1994; c) Em outros equipamentos agrícolas e florestais para os quais não existam no mercado estruturas de proteção”.

Decreto-Lei n.º 103/2008 de 24 de junho.

Este decreto-lei estabelece as regras relativas à colocação no mercado e entrada em serviço das máquinas e respetivos acessórios.

Decreto-Lei n.º 81/2011 de 20 de junho.

O Decreto-lei n.º 81/2011 regula elementos e características dos tratores agrícolas ou florestais de rodas, transpõe as Diretivas números 2010/22/UE e 2010/52/UE, ambas da Comissão, de 15 de março e de 11 de agosto, e procede à segunda alteração ao Decreto-Lei n.º 3/2002, de 4 de janeiro, e à terceira alteração ao Decreto-Lei n.º 114/2002, de 20 de abril

Regulamento 167/2013 de 5 de fevereiro de 2013.

O regulamento 167/2013 estabelece as disposições técnicas e administrativas para homologação de veículos agrícolas. O artigo 4.º na sua alínea 3 define a categoria T3 como “tratores com rodas cuja massa sem carga em ordem de marcha é inferior ou igual a 600 kg” sendo nesta categoria que se enquadra o modelo objeto deste projeto. O artigo 18.º, alínea 2, obriga ao cumprimento das prescrições do regulamento nas estruturas ROPS na sua alínea “a” e cintos de segurança na sua alínea “j”. No anexo I os pontos n.º 37 e n.º 38, remetem para *Regulation on Vehicle Construction Requirements* (RVCR) relatório de ensaios alternativo ao do domínio de aplicação do código da OCDE, números 6 e 7, respetivamente, e que corresponde ao REG 1322/2014 de 19 de setembro 2014.

Regulamento 1322/2014 de 19 de setembro 2014.

Este regulamento envolve a construção de veículos agrícolas e florestais e os requisitos para a sua homologação. Os artigos 12º e 13º, que correspondem respetivamente ao ROPS montado à frente e montado atrás, remetem para os anexos IX e X. Este regulamento define as condições para a realização dos testes experimentais para validação das estruturas de proteção em caso de capotagem. Da análise à legislação em vigor, verifica-se que em Portugal não existe a obrigatoriedade de aplicação de um dispositivo de segurança em caso de capotagem para tratores agrícolas matriculados antes de 1994 ou no caso de equipamentos não matriculados que não disponham no mercado de um dispositivo a instalar.

Conclui-se também que, caso houvesse a obrigação de equipar o trator objeto de estudo com um sistema de proteção em caso de capotagem, a norma aplicável seria o Regulamento 1322/2014 de 19 de setembro de 2014.

2.2 Análise do Kubota B7001E no âmbito do regulamento 1322/2014 de 19 de setembro de 2014

Foi feita uma análise do trator objeto deste estudo na perspetiva do regulamento 1322/2014 de forma a determinar quais os pontos desse mesmo regulamento que se lhe aplicariam caso a data de construção obrigasse à instalação de um ROPS.

O nº2 deste regulamento especifica nas diferentes alíneas do ponto 2.1 que este se aplica a tratores de dois eixos equipados de duas rodas, com uma distância ao solo do eixo mais baixo tendo em conta o diferencial não superior a 600 *mm*, com via mínima do eixo de rodas de maiores dimensões inferior a 1150 *mm*, com massa sem carga, mas incluindo a estrutura de proteção superior a 400 *kg*.

Da análise às características do trator Kubota B7001E confirma-se que tem dois eixos equipados com duas rodas, validando assim o ponto 2.1, que a distância ao solo medida a partir do diferencial traseiro é de 230 *mm*, o que valida o ponto 2.1.1 e que a via mínima atrás é de 640 *mm*, o que valida o ponto 2.1.3.

O ponto 2.1.4 define que o regulamento 1322/2014 se aplica a tratores com a estrutura de proteção colocada atrás do Ponto índice do assento (SIP) o que corresponde à opção adotada, validando também este ponto.

A síntese desta verificação está exposta na tabela 2.1, mostrando que o trator em estudo cumpre todos os requisitos de aplicabilidade do regulamento 1322/2014 de 19 setembro de 2014 e em particular o constante do seu anexo X. Para a elaboração da referida tabela foram utilizados os valores de referência do regulamento e os valores fornecidos pelo fabricante no manual do utilizador.

Tabela 2.1 – Verificação do Kubota B7001E face ao regulamento 1322/2014.

Ponto	Condição	Existente	Conforme
2.1 - Mínimo de eixos com rodas	2	2	SIM
2.1.1 - Distância ao solo	< 600 mm	230 mm	SIM
2.1.2 - Via mínima	< 1150 mm	730 a 840 mm	SIM
2.1.3 – Massa	> 400 Kg	476 Kg	SIM
2.1.4 - Posição em relação ao SIP	Atrás do SIP	Atrás do SIP	SIM
2.2 – Ser máquina especial	Não	Não	SIM

Identificação e descrição dos ensaios de carga aplicáveis.

O regulamento 1322/2014 caracteriza no ponto 1.2 a estrutura de proteção em caso de capotagem como a estrutura que preserva uma “*zona livre suficientemente grande para proteger o condutor*”. Essa zona livre é definida no ponto 1.6 do regulamento e será detalhada mais à frente neste relatório.

Este regulamento prevê a realização alternativa de dois tipos de ensaio considerados equivalentes, um com características dinâmico e outro com características estáticas. Para este projeto optou-se pela realização de ensaios estáticos, que pretendem simular a solicitação da estrutura em caso de capotagem. Estes ensaios envolvem condições de resistência mecânica e de rigidez mecânica da estrutura de proteção e das suas fixações.

O procedimento de ensaio estático, que será descrito em pormenor mais à frente prevê a aplicação sequencial de cargas em locais pré-determinados da estrutura, num total de cinco condições.

Aplicação de carga na retaguarda da estrutura

Neste ensaio é feita a aplicação de carga sem atingir a rotura da estrutura, sendo avaliada a energia de deformação (E_{il}), que deve respeitar as duas condições presentes na equação (2.1),

$$E_{il} > 0.574 \times I \text{ e } E_{il} < 2.165 \times 10^{-7} M L^2 \quad (2.1)$$

Em que:

E_{il} é a entrada de energia que deve ser absorvida durante a aplicação de carga longitudinal;

M é a massa de referência do trator (kg);

L é a distância entre eixos de referência do trator (mm);

I é o momento de inércia de referência do trator em relação ao eixo das rodas traseiras qualquer que seja a massa dessas rodas (kgm^2).

Ensaio de esmagamento à retaguarda da estrutura

Neste ensaio é feita a aplicação de uma carga (F_v) sem atingir rotura da estrutura. O valor limite para esta carga é definido pela equação (2.2),

$$F_v = 20 M \quad (2.2)$$

Em que:

F_v é a força de esmagamento vertical (N);

M é a massa de referência do trator durante os ensaios de resistência (kg).

Aplicação de carga na parte frontal da estrutura

Neste caso a carga é aplicada sem atingir a rotura da estrutura, até ao valor limite obtido pela equação (2.3),

$$E_{il} = 500 + 0.5 M \quad (2.3)$$

Em que:

E_{il} é a energia que deve ser absorvida durante a aplicação de carga longitudinal (J);

M é a massa de referência do trator durante os ensaios de resistência (kg).

Aplicação de carga na parte lateral da estrutura

Neste ensaio é feita a aplicação de carga sem atingir a rotura da estrutura, sendo avaliada a energia de deformação (E_{is}), que deve respeitar o limite definido pela equação (2.4),

$$E_{is} > 1.75 \times M \quad (2.4)$$

Em que:

E_{il} é a entrada de energia que deve ser absorvida durante a aplicação de carga longitudinal;

M é a massa de referência do trator (kg);

L é a distância entre eixos de referência do trator (mm);

I é o momento de inércia de referência do trator em relação ao eixo das rodas traseiras qualquer que seja a massa dessas rodas (kgm^2).

Esmagamento na parte frontal da estrutura.

Este ensaio destina-se a estruturas do tipo quadro e por isso não é aplicável no caso da estrutura em estudo.

2.3 Estudos e Projetos de ROPS para Tratores Agrícolas

Nos últimos 25 anos tem-se observado nos tratores novos uma evolução no sentido da substituição das estruturas ROPS por cabines fixas com a mesma função (Rondelli, Capacci, Franceschetti, & Guarnieri, 2022). No entanto constata-se que a adoção de cabines, quando comparadas com o ROPS, provocam uma subida do centro de gravidade do trator o que tem uma influência negativa na sua estabilidade (Franceschetti, Rondelli, & Ciuffoli, 2019). Nos EUA um estudo mostrou que, quando o trator estava equipado com ROPS, as únicas mortes em caso de capotagem ocorreram quando o operador não utilizava cinto de segurança (Groves & Reynolds, 2000). Uma análise ao comportamento dos utilizadores demonstrou que a possibilidade de baixar o ROPS promove o seu uso inadequado, tendo sido identificados casos em que o sistema foi mantido em baixo para além do estritamente necessário (Monarca, et al., 2013).

Sabendo-se que o número de mortes em caso de capotagem de tratores agrícolas diminuiu com o aumento do número de tratores equipados com ROPS (Groves & Reynolds, 2000), a sua adaptação nos tratores mais antigos ainda encontra alguma resistência. Num projeto de demonstração de montagem de CROPS que decorreu nos EUA nos estados de New York e de Virginia (EUA), o principal motivo evocado pelos participantes para não adaptar um ROPS foi o custo, com 80% e 88%, respetivamente, em cada um dos estados (Hard, et al., 2015). Já um estudo realizado junto dos comerciantes de equipamentos agrícolas, revelou que a maior parte não comercializa ou instala ROPS para tratores antigos. Entre os motivos evocados estão: a falta de interesse dos proprietários, a responsabilidade civil atribuída ao instalador, custo de transporte do equipamento a instalar, desconhecimento do número de mortes em acidentes por capotagem, dificuldade de amortizar os custos de pesquisa por equipamentos ROPS disponíveis no mercado. No entanto, caso a procura aumente, os comerciantes mostram-se disponíveis para comercializar os CROPS. (Tonelli, Donham, Leedom-Larson, Sanderson, & Purschwitz, 2009)

A conceção de uma estrutura recorrendo unicamente à realização de ensaios destrutivos para validação de um equipamento é um processo dispendioso. Por esse motivo os diferentes fabricantes dispõem de programas dedicados para o dimensionamento dos seus equipamentos, que lhes permitem prever antecipadamente o comportamento da estrutura ao ser sujeita aos ensaios de carga. No entanto esses programas não são disponibilizados comercialmente.

A crescente motivação para a adaptação de um ROPS nos equipamentos mais antigos, conjugada com a necessidade de baixar o custo dos mesmos, tem feito aumentar o interesse no recurso a modelos numéricos para simulação dos ensaios

regulamentares de validação das estruturas dos ROPS. Em *“Retrofitting Agricultural Self-Propelled Machines with Roll-Over and Tip-Over Protective Structures”* (Vita, Gattamelata, & Pessina, 2021) desenvolveram estruturas de ROPS, destinadas à sua adaptação em dois tipos de ceifeiras automotrizes, com recurso à simulação por modelos de elementos finitos utilizando o software “ABAQUS”. Em *“Predicting The Performance Characteristic of Assembled Rollover Protective Structure Designs For Tractors”* (Harris, 2008) foi desenvolvido com o software “ANSYS” um modelo de elementos finitos para simular o comportamento do CROPS desenvolvido para o trator agrícola de marca FORD e modelo 3000. Os autores descrevem desvios inferiores a 10% entre resultados numéricos e laboratoriais. Também em *“Performance Evaluation of a Virtual Test Model of the Frame-Type ROPS for Agricultural Tractors Using FEA”*, (Lim, Kim, Do, Siddique, & Kim, 2004) recorrendo ao software SolidWorks, os autores indicam desvios de menos de 10% dos resultados laboratoriais.

3 CONCEÇÃO E PROJETO DO ROPS PARA O KUBOTA B7001E

Atendendo a que as unidades de micro tratores disponíveis no mercado nacional de equipamentos usados anteriores a 1994 têm um baixo valor de mercado e que, tal como descrito atrás, a montagem de um ROPS não é legalmente obrigatória, é importante que a instalação de um tal sistema tenha um baixo custo de construção e instalação para que a sua montagem se torne atrativa para um público tendencialmente pouco sensibilizado para a sua necessidade. Assim, um dos pressupostos deste projeto passou por desenvolver um sistema que seja de baixo custo de construção e instalação.

O desenvolvimento do ROPS para o trator em análise envolveu um conjunto de etapas que se elencam de seguida.

Os desenhos técnicos para o trator Kubota B7001E não estão disponíveis na literatura aberta. Assim, numa primeira fase foi necessário considerar um modelo real do trator em análise e proceder a um levantamento de forma, de modo a criar um modelo 3D do mesmo. Para esse levantamento optou-se por usar a técnica da fotogrametria. Com base no modelo digital 3D elaborado iniciou-se o estudo de uma solução de geometria adequada ao trator escolhido que respeitasse as imposições geométricas do regulamento, nomeadamente a garantia de uma zona de segurança.

Note-se que, por se tratar de um trator em que tanto as dimensões como o peso são bastante reduzidas, ao instalar um equipamento de proteção em caso de capotagem, o centro de gravidade global deslocar-se-á para cima. Assim, procurou-se desenvolver uma solução com minimização da massa do dispositivo de segurança.

Após a definição geométrica do sistema de proteção em caso de capotagem foi iniciado o processo de dimensionamento estrutural do mesmo. Para isso recorreu-se ao software *FREECAD*, onde foi criado um modelo numérico de elementos finitos do sistema de proteção em caso de capotagem. Pretendia-se estimar o comportamento da estrutura sob ação das cargas prescritas nos ensaios regulamentares.

Tendo como base os resultados obtidos pelo modelo de elementos finitos, foi feita a construção de um modelo físico do sistema de proteção em caso de capotagem para executar os ensaios experimentais.

3.1 Modelação 3D do Trator

O levantamento fotogramétrico do trator *Kubota B7000E* foi realizado com recurso a um equipamento *Iphone 12pro* com tecnologia *lidar* com a aplicação *Photocatch*. O trator foi colocado numa posição que permitisse a recolha de imagem vídeo a vários níveis, em todo o seu redor, sendo necessário garantir uma sobreposição de cerca de 50% para cada um dos níveis.

Este levantamento permitiu criar um modelo digital simplificado da sua geometria, nomeadamente da posição das rodas, volante, assento, plataformas para os pés e cobertura do motor. Desse modelo resultou uma malha não fechada que serviu de base para a criação de um modelo vetorial. A figura 3.1 mostra a malha 3D do trator obtida pela técnica de fotogrametria.

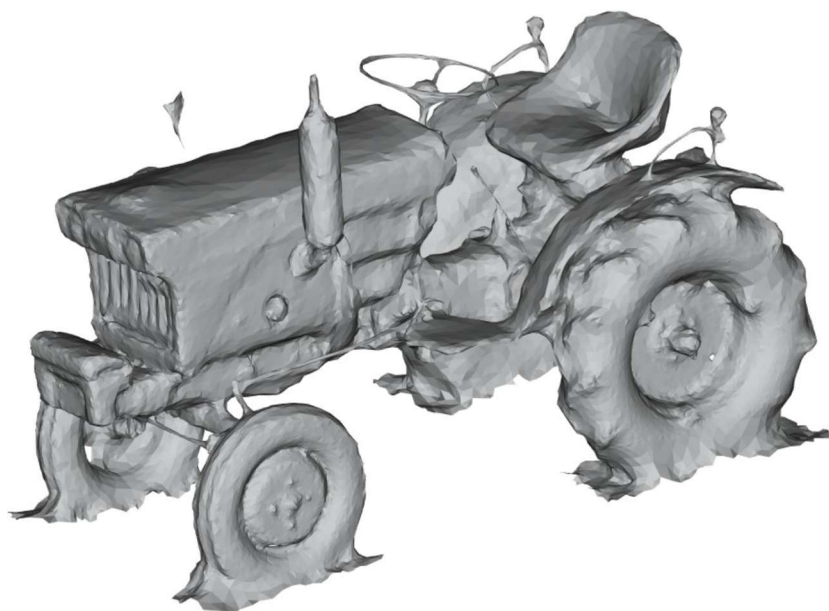


Figura 3.1 – Malha 3D do trator agrícola obtido por fotogrametria.

De forma a garantir as corretas dimensões do modelo vetorial, foram levantados alguns pontos de controle com recurso a uma estação total da marca *Leica*, modelo TCRP1203. Foi criado um referencial de coordenadas local com a materialização de três referências externas ao trator. A estação total foi posicionada de ambos os lados do trator e, utilizando a técnica vulgarmente designada de “estação livre” que mede os ângulos horizontal e zenital e a distância às referências externas, determinaram-se as coordenadas da estação total no referencial local desejado. Em seguida procedeu-se à leitura dos ângulos e distância da estação aos pontos que se pretende coordenar no trator. Obtiveram-se assim as coordenadas cartesianas tridimensionais dos pontos de controle que permitem determinar com rigor as distâncias entre esses pontos. Os pontos de controle referidos foram situados em ambos os eixos das rodas, no volante, no banco do condutor e na caixa do diferencial traseiro.

A figura 3.2 apresenta o modelo 3D do trator, onde se podem identificar, representados por uma esfera amarela, alguns dos pontos de controlo que foram usados para calibrar o modelo obtido por fotogrametria.

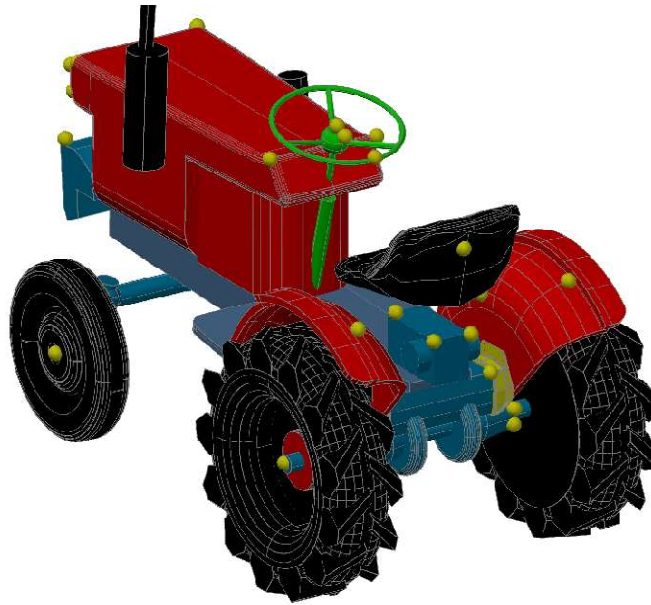


Figura 3.2 – Modelo 3D vetorial do trator agrícola Kubota B7000E.

Ponto índice do banco

O ponto 1.5 do regulamento 1322/2014 estabelece a determinação do ponto índice do banco (SIP – *Seat Index point*) e da regulação do banco para os ensaios.

Ao criar o modelo digital do trator, foi tido em consideração que a geometria do banco iria ser importante para a determinação do SIP, por isso procurou-se que este modelo tivesse um pouco mais de detalhe.

Para a determinação da posição do SIP relativamente ao banco foi utilizado o modelo digital acima referido, segundo as condições indicadas na norma ISO 5353:1995. Não foi considerado o esmagamento da superfície do banco por ser

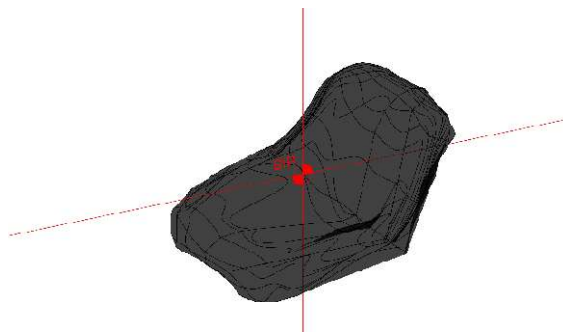


Figura 3.3 – Localização do SIP.

difícil de determinar a sua amplitude. No entanto, isto aumenta a área de segurança em torno do banco, uma vez que esta opção afasta o SIP do banco aumentando o volume a proteger. Na figura 3.3 está representado o modelo 3D do banco com a identificação do SIP.

Se o banco tiver regulação, esta deve ser ajustada da seguinte forma:

- Ponto mais recuado da regulação longitudinal;
- Ponto mais alto da regulação vertical;
- Ponto médio da inclinação do encosto;
- Suspensão do banco bloqueada a meio do curso da mesma.

No caso do banco do trator em estudo, este não tem regulação vertical, não está equipado com encosto regulável e não dispõe de suspensão, pelo que apenas foi necessário colocar o banco na posição mais recuada de três possíveis. O volante também não apresenta qualquer tipo de regulação de posição.

Zona livre

O ponto 1.6 do regulamento 1322/2014 define zona livre e os seus critérios de determinação. A definição geométrica da zona livre é referenciada ao SIP. As figuras 3.4 e 3.5 apresentam a definição geométrica da zona livre.

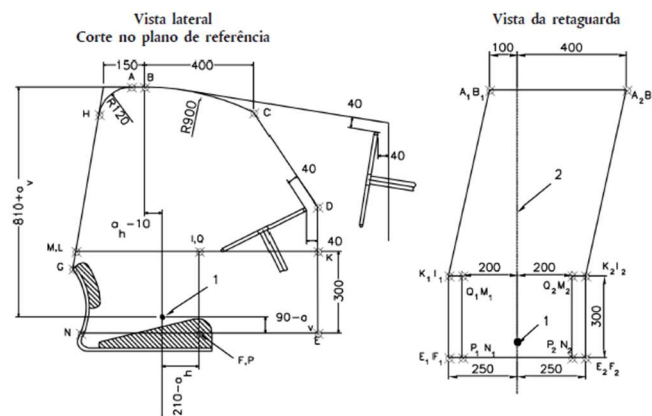
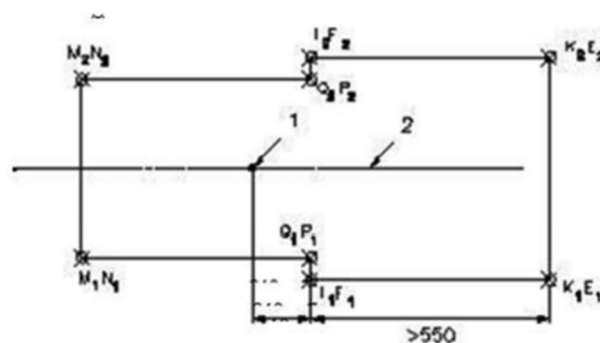


Figura 3.4 – Extrato do regulamento 1322/2014, vistas laterais da zona livre. (dimensões em milímetros)



- 1 – Ponto índice do banco
2 – Plano de referência

Figura 3.5 – Extrato do regulamento 1322/2014, vista de cima da zona livre. (dimensões em milímetros)

O trator Kubota B7000 não dispõe de banco reversível nem de bancos suplementares, por isso foram seguidas as condições do ponto 1.6.2 do regulamento que são as que correspondem à determinação da zona livre para tratores com um banco não reversível. Assim, para o caso do trator Kubota B7000, e de acordo com o regulamento os valores a considerar para a_v e a_b são os seguintes:

- Amplitude total de regulação horizontal da posição do banco de 50 mm , com três posições afastadas de 25 mm , $a_b = 25\text{ mm}$;
- Banco sem regulação da posição vertical, $a_v = 0\text{ mm}$.

A aplicação do acima disposto ao modelo 3D do trator em estudo permite determinar a zona livre, a considerar nos ensaios de carga a realizar. Na figura 3.6 ilustra-se a cor verde o contorno da zona livre sobre o modelo do trator.

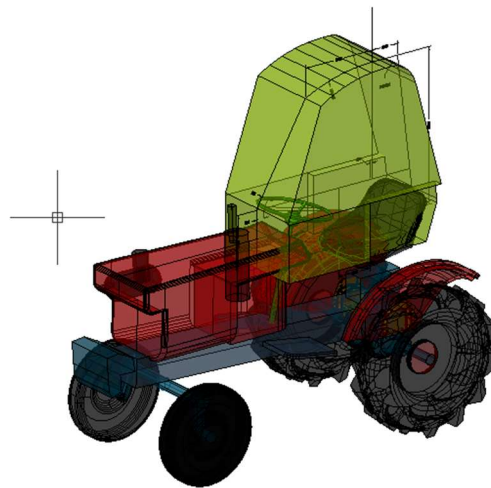


Figura 3.6 – Sobreposição da zona livre sobre o modelo 3D.

Massa de referência

O Ponto 1.7 do regulamento 1322/2014 estabelece as definições dos diferentes tipos de massa e os critérios de definição da massa de referência. O regulamento impõe que a massa de referência seja superior à massa sem lastro e obedeça à seguinte razão presente na equação (3.1):

$$\left(\frac{MMA}{M}\right) \leq 1.75 \quad (3.1)$$

Em que:

MMA é a massa máxima admissível,

M é a massa de referência do trator.

O manual do utilizador elaborado pelo fabricante para o trator alvo deste estudo indica uma massa máxima admissível de 560 kg e um peso do veículo de 476 kg .

Assim, considerando como massa de referência nos ensaios o valor de 560 *kg*, que coincide com o valor da *MM4*, obtém-se um valor de 1 para a razão da equação 3.1. O valor da massa de referência também fica acima do valor da massa sem lastro que é de 476 *kg*. Ficam assim verificadas as condições impostas pelo regulamento no que diz respeito à massa de referência.

3.2 Modelação 3D do ROPS

Na modelação do ROPS foi concebida uma estrutura de forma a garantir a salvaguarda da zona de segurança em caso de capotagem, mas garantindo que o mesmo não condiciona os movimentos do operador. A parte superior da estrutura projetada adota a forma de um arco invertido com suavização do ângulo da ligação dos elementos verticais com o elemento horizontal e com a introdução de um elemento com um ângulo de 45°. O arco é soldado a duas peças que serão ligadas por meio de dois parafusos a cada uma das duas bases de ligação ao trator. A figura 3.7 ilustra o modelo 3D da estrutura.



Figura 3.7 – Esboço conceptual da estrutura de proteção
(1695mm x 728mm x 80mm).

A verificação da garantia da zona livre por parte da estrutura de proteção em caso de capotagem foi feita criando um sólido cujas faces são definidas pela combinação dos eventuais planos de contacto do trator e dessa mesma estrutura com o solo ao ocorrer a rotação tridimensional do trator. Para as rodas frontais foi considerado

como ponto de contacto o eixo das mesmas e não a circunferência da roda, porque se considerou que esta pode sofrer uma rotação em torno do eixo vertical do sistema de direção. Considerando que não há qualquer deformação da estrutura de proteção, o interior desse sólido define uma zona que não toca no solo em caso de capotagem, sendo assim a zona protegida pela estrutura de proteção. Na figura 3.8 pode identificar-se em cor verde o sólido que define essa zona de proteção e que o volume que define a zona livre está completamente inserido na zona de proteção.

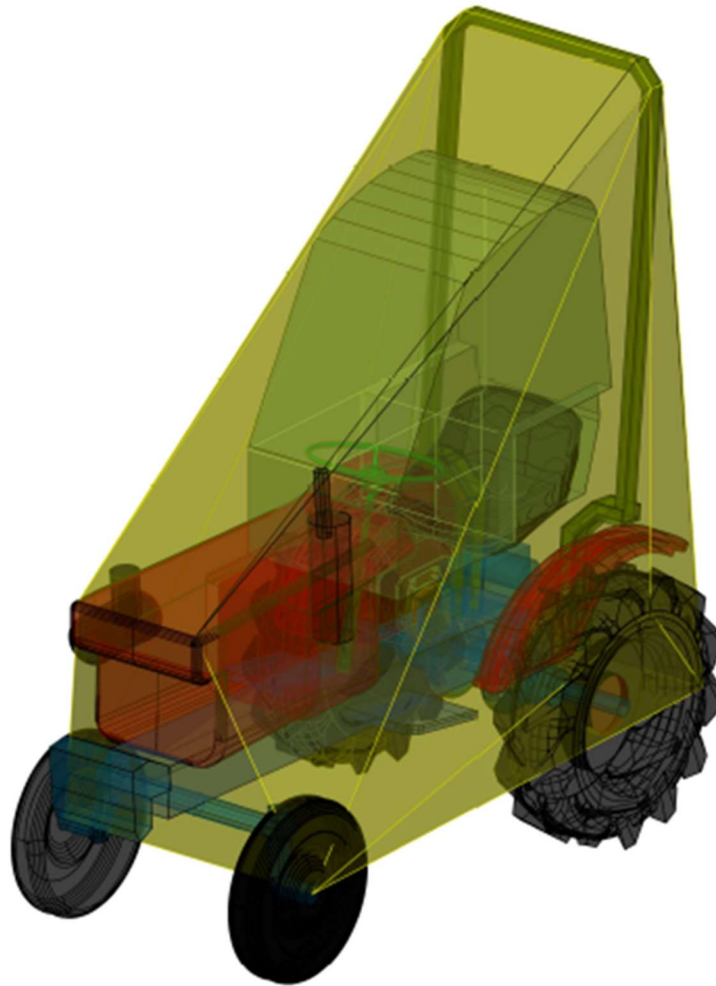


Figura 3.8 – Planos de contacto.

Com a parte superior da estrutura definida, começou-se a estudar qual a secção mais adequada. Devido à geometria do trator, a estrutura foi dividida em duas secções distintas. A secção superior que fica acima do nível dos guarda-lamas e que é a que recebe os impactos e tem que, pela sua geometria, garantir a zona de segurança. A secção inferior, que se destina a fazer a ligação da parte superior dos guarda-lamas até

um ponto de ligação à estrutura do trator, garantindo a fixação do sistema de proteção em caso de capotagem.

A conceção da parte superior da estrutura teve em consideração, para além do acima referido, as seguintes condicionantes:

- Necessidade de não impactar os movimentos do operador, sendo por isso posicionada atrás do posto de condução;
- Minimização das dimensões para garantir a zona de segurança, de modo a garantir a manobrabilidade do trator, nomeadamente na altura total e largura da parte superior.

Por sua vez, ao idealizar a parte inferior da estrutura, foi necessário ter em conta:

- Necessidade de recorrer às furações existentes no trator para fixar a estrutura de segurança;
- Impossibilidade de utilizar travessas transversais que iriam entrar em conflito com as partes móveis e os manípulos de comando do sistema hidráulico de elevação posterior (por exemplo a tomada de força), e com os pontos de fixação de alfaías.

A escolha dos tipos de perfil a utilizar considerou também a facilidade de fabrico da estrutura. Quanto à parte superior, numa primeira fase foi considerado tubo de seção circular, que foi abandonado a favor de tubo de seção retangular, tendo em conta os meios disponíveis para o fabrico. A parte inferior da estrutura envolveu um processo iterativo que culminou numa estrutura em perfil UPN80 com reforços em nervura.

Assim, a estrutura do ROPS é composta por três componentes estruturais em aço S275JR:

- **Base** – composta por três elementos em perfil UPN80, cortados e soldados formando um ângulo de 45° e com furação de 20 *mm*. Esta forma destina-se a obter uma peça que acompanhe o arco do guarda lamas do trator. Para resistir aos esforços, o perfil UNP é reforçado com dois elementos fabricados em barra de seção 70 *mm* x 5 *mm*. Estes elementos são soldados ao perfil UPN80;
- **Arco** – fabricado com cinco elementos em tubo de seção 50 *mm* x 30 *mm* x 4 *mm*, cortados e soldados;
- **Placas** – Compostas por um único elemento em barra de seção 160 *mm* x 20 *mm* de espessura cortada, com os cantos chanfrados e furada. Este elemento apresenta dois tipos de furação, dois furos de 20 *mm* de diâmetro para fixação ao arco e oito furos de 10 *mm* de diâmetro para permitir a fixação do conjunto ao trator.

A ligação entre o Arco e as bases é feita por soldadura. A ligação entre as bases e as placas é feita com parafusos M20. A ligação do conjunto ao trator é feita por parafusos M10, apertando na furação existente no trator. A figura 3.9 ilustra a montagem da estrutura.

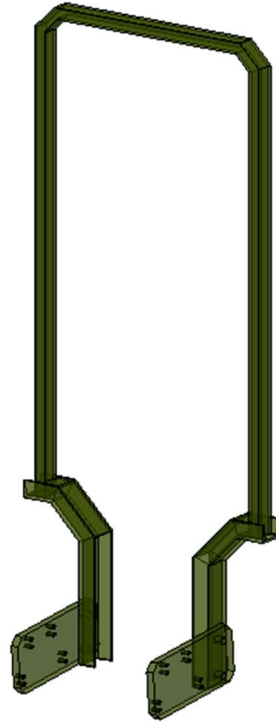


Figura 3.9 – Esboço da montagem da estrutura.

3.3 Modelo Numérico do ROPS

O modelo numérico foi criado com recurso ao software *FreeCAD*. O *FreeCAD* é um software livre e de código aberto para CAD 3D de modelação paramétrica. Por ter uma arquitetura modular, este software tem a particularidade de ser extensível através da linguagem de programação *Python*. O software está organizado em bancadas, que correspondem aos diferentes módulos disponíveis. Para a realização deste projeto foram utilizados três módulos ou bancadas:

PART – para a modelação dos elementos da estrutura.

PART DESIGN – para a modelação dos elementos da estrutura.

FEM – para a análise de elementos finitos. Este módulo utiliza o *Gmsh* como gerenciador de malhas e o *CalculiX* como processador de elementos finitos.

Os elementos considerados são do tipo sólido. Não foram considerados elementos do tipo casca porque o software utilizado apenas aceita este tipo de definição se os elementos não forem de secção fechada, o que exclui os elementos tubulares. No caso de elementos tubulares é necessário utilizar sólidos ocos na sua modelação. O

modelo numérico de elementos finitos envolveu duas abordagens complementares. A primeira versão considera as forças aplicadas diretamente sobre a estrutura, sendo designado como modelo sem contacto. A segunda versão considera um elemento estrutural suplementar sobre o qual são aplicadas as forças, sendo designado como modelo com contacto. Em ambos os casos, por questões de rapidez computacional disponível, recorreu-se a modelos simplificados que não contemplam as placas de ligação ao trator.

A figura 3.10 ilustra os dois corpos gerados no software *FreeCAD* para o modelo simplificado do ensaio. À esquerda, em cor castanha, está representado o modelo com contacto, em que a força é aplicada num elemento externo que vai atuar sobre a estrutura. À direita, em cor cinza, está representado o modelo sem contacto, em que a força é aplicada diretamente sobre o corpo. Em ambos os casos foram aplicadas restrições de movimento, em todos os graus de liberdade, nas faces da furação para ligação das bases às placas de ligação ao trator.

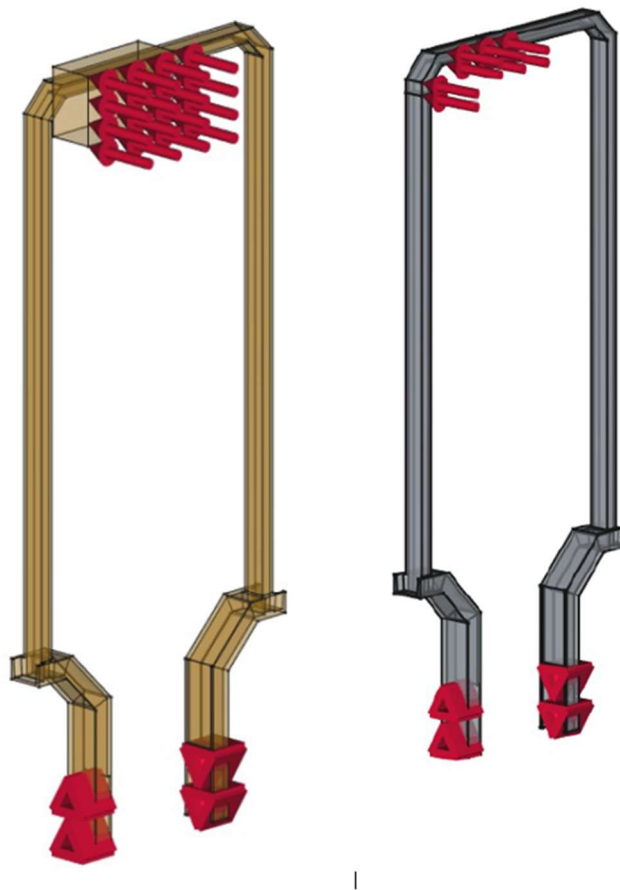


Figura 3.10 – Vista dos dois modelos simplificados, modelo com contacto à esquerda e modelo sem contacto à direita.

3.3.1 Modelo sem contacto no ponto de carregamento.

O modelo de elementos finitos sem contacto no ponto de carregamento pretende simular os ensaios definidos pelo regulamento 1322/2014, sendo considerados quatro casos de carga distintos em grandeza e ponto de aplicação:

- Carga horizontal lateral de 4 kN .
- Carga horizontal posterior de 4 kN .
- Carga vertical de 11 kN .
- Carga horizontal frontal de 8 kN .

No modelo, a simulação da ancoragem da estrutura foi definida restringindo todos os graus de liberdade na face interior dos furos dos pontos de fixação e as forças foram aplicadas diretamente nas faces do modelo. Na parte superior da estrutura foi utilizado um tubo retangular de secção transversal 40 mm x 30 mm x 5 mm em aço S275JR.

Para cada caso de carga foram feitas duas análises de convergência de malha, uma com malha composta por elementos de 2º grau e outra com malha composta por elementos de 1º grau.

Foi feita uma análise de convergência independente para cada um dos quatro casos de carga. Assim, para cada caso de carga, calculou-se o deslocamento máximo da estrutura após ser submetida à carga, inicialmente com a malha do modelo realizada com recurso a elementos de segunda ordem e sem limite de dimensão máxima, modo *coarse* do software. Em seguida reduziu-se sucessivamente a dimensão máxima dos elementos de malha e recalcularam-se os deslocamentos registando os valores máximos. Repetiu-se o procedimento até se observar a convergência dos valores da amplitude máxima do deslocamento. Repetiu-se o mesmo processo para uma malha composta por elementos de primeira ordem.

No modelo de simulação com a malha composta por elementos de segunda ordem, observou-se que a maior variação ocorre com a passagem de modo *coarse* ou baixa definição, em que o software determina a dimensão dos elementos de forma a que seja a maior possível, para a introdução de uma dimensão máxima do elemento (*ELEMENT SIZE*) de 10 mm . Para uma dimensão máxima dos elementos da malha inferior a 10 mm observou-se que a variação da dimensão dos elementos da malha tem um efeito residual na variação do deslocamento.

O regulamento estipula, no caso dos três casos de carga horizontal, que o critério de aceitação impõe a absorção de uma determinada quantidade de energia o que atribui relevância à deformação sofrida pela estrutura. Foi feita uma análise analítica minimalista simplificada de forma a ter um valor de referência do deslocamento. Este valor, não sendo de todo um valor exato do deslocamento, permitiu comparar os valores obtidos pelo modelo virtual de forma a ter uma noção da sua fiabilidade

relativa. Torna-se importante notar que toda a análise foi feita não tendo em consideração a entrada do material no regime plástico.

No modelo de simulação com malha composta por elementos de 1º ordem, procedeu-se da mesma forma que no anterior, mas aqui constata-se que para haver convergência é necessário diminuir a dimensão máxima abaixo dos 5 mm, sendo que os resultados apenas se aproximam do modelo de elementos de 2ª ordem quando a dimensão máxima dos elementos é de cerca de 3 *mm*.

3.3.2 Modelo com contacto no ponto de carregamento.

A principal diferença deste modelo para o anterior é que, no modelo precedente, as forças são aplicadas diretamente sobre uma face do corpo, enquanto neste modelo as cargas são aplicadas sobre uma viga que vai agir sobre o corpo que simula o ROPS. Este modelo está mais próximo da realidade dos ensaios definidos pelo regulamento.

Para a análise deste modelo, a abordagem adotada foi a de criar quatro modelos distintos, um para cada caso de carga, dada a limitação do software utilizado de não permitir a análise de mais que um sólido de cada vez. Assim foi necessário criar um sólido composto para cada caso de carga. Esse sólido composto é formado pelos dois corpos, ROPS e viga de carregamento, no mesmo elemento de análise, mas mantem a independência de deslocamento de cada um dos corpos em relação ao outro e considera o eventual contacto entre eles através de uma restrição de contacto em que o corpo viga é o corpo mestre e de rigidez infinita. Para cada um dos modelos foram feitas várias simulações com diferentes definições de malha para o corpo ROPS. Uma vez que há contacto entre os dois corpos do modelo, as definições de malha ficam restritas à utilização de elementos de 1º grau.

Tal como nos ensaios virtuais sem contacto, foram feitas simulações com definições de malha variáveis desde grosseiro até 3*mm* de dimensão máxima do elemento de malha.

3.3.3 Comparação dos modelos com e sem contacto

A figura 3.11 apresenta os quatro gráficos com a evolução da amplitude dos deslocamentos calculados pelo modelo de elementos finitos em função da dimensão máxima dos elementos da malha.

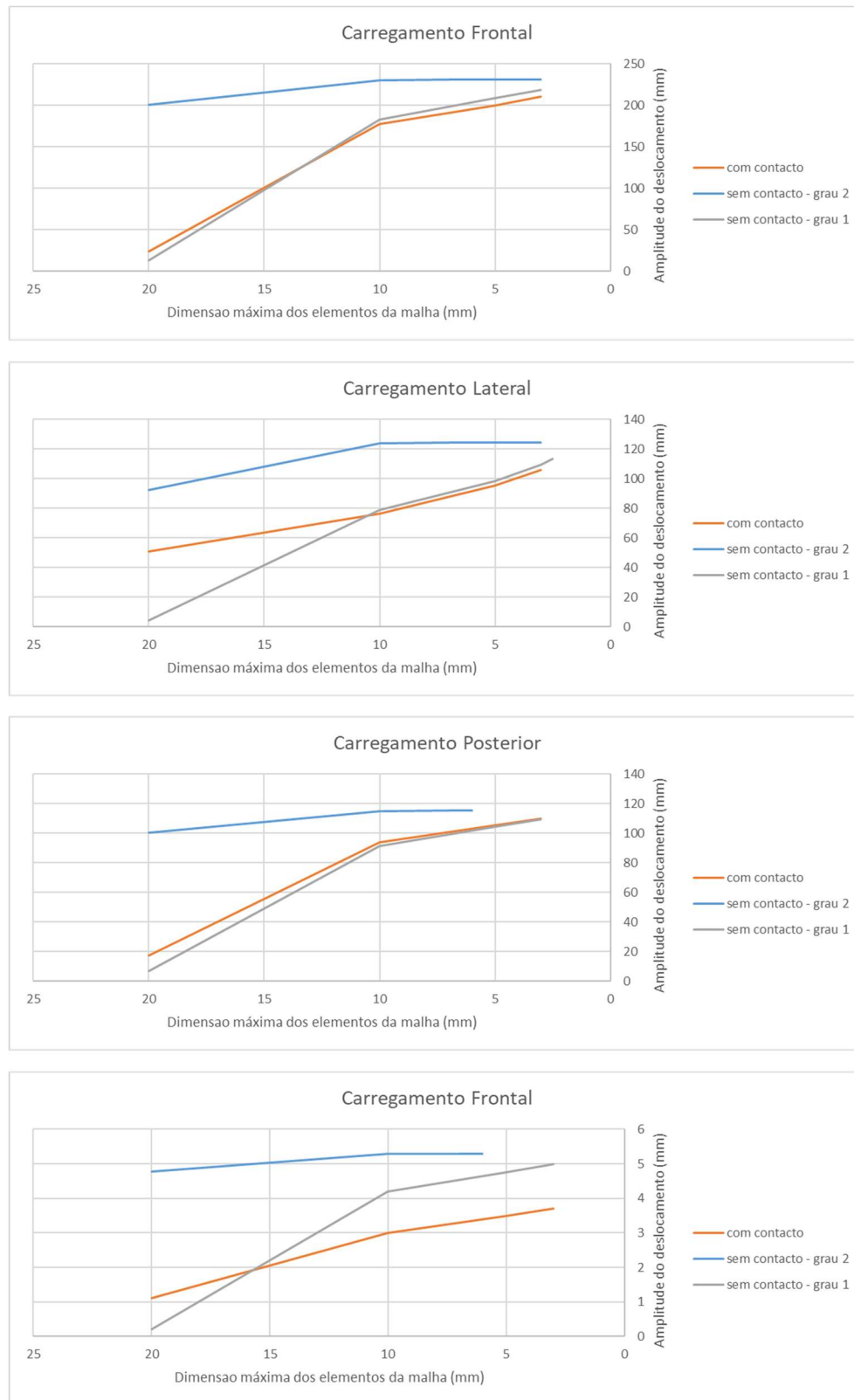


Figura 3.11 – Gráficos de convergência de malha.

Em três dos casos, carregamento frontal, posterior e lateral, constata-se que as diferenças entre os resultados dos dois modelos são negligenciáveis, sendo que a

opção pelo modelo sem contacto está do lado da segurança. No caso de carga de esmagamento identificam-se diferenças significativas entre o modelo sem contacto e o modelo com contacto. Os valores obtidos com o modelo com contacto estarão mais próximos da realidade. Como a rigidez da viga é muito superior à da travessa e se considera que não há deformação dessa mesma viga, a deformação da travessa decorrente da aplicação da carga tem a consequência de deslocar os pontos de aplicação da carga para a zona mais próxima dos apoios o que reduz o momento fletor inerente. No modelo sem contacto em que a carga é uniformemente distribuída, o momento fletor introduzido pela carga aplicada mantém-se independentemente da deformação da travessa o que aumenta a deformação da estrutura.

Estudo da secção a utilizar.

Devido a fatores como o baixo peso, a reduzida largura de via e a proporção da altura do ROPS em relação ao trator a equipar, torna-se necessário minimizar a massa da estrutura do ROPS para evitar que a montagem deste equipamento tenha o efeito secundário de afetar a estabilidade lateral do conjunto.

O software de modelação por elementos finitos permite fazer uma análise estática do modelo de forma a prever o seu comportamento em regime elástico. Ora o ensaio prevê que a estrutura seja solicitada para além deste regime, entrando no regime plástico sendo admitidas deformações permanentes da estrutura que se considera perdida e de substituição obrigatória após uma solicitação. No entanto, e apesar da deformação, a estrutura deve garantir a integridade da área de segurança e deve ser capaz de garantir a absorção de um determinado valor de energia.

Uma vez que se pretende que a estrutura absorva, pela deformação, a energia do impacto, não foram considerados coeficientes de segurança para as características mecânicas do aço nem de majoração das cargas a aplicar. O regulamento não prevê a aplicação desses fatores de segurança.

Para chegar à solução adotada foi criado um primeiro modelo simplificado em que foram ignoradas as placas de fixação e se considerou o interior dos orifícios de passagem dos parafusos como superfície fixa. Pela sua simplicidade, este modelo permite tornar o processo de iteração para otimizar a estrutura mais rápido, permitindo analisar várias secções do tubo do arco e da base e concluir que o arco artesanal instalado na unidade do trator objeto do ensaio não suporta as cargas previstas.

Foram realizadas várias simulações para testar diferentes secções a aplicar nos elementos da estrutura. Iniciou-se com um tubo de secção redonda de 40 mm x 3 mm de espessura, tendo, após várias variações sido no final adotada a solução de utilizar um arco em tubo de secção retangular de 50 mm x 30 mm x 4 mm apoiado em duas bases em perfil UPN80 com um reforço em barra de 5 mm ligadas ao trator por duas placas de 10 mm de espessura. A ligação entre as placas e as bases será assegurada por dois parafusos M20 em cada placa e a ligação entre as bases e o trator

será assegurada por 8 parafusos M10 roscados nos pontos de fixação já existentes no trator.

Após a seleção das secções dos elementos da estrutura passou-se à sua análise com um modelo completo que inclui as duas placas de ligação ao trator de forma a melhor estimar os deslocamentos totais da estrutura e a sua eventual intrusão na área de segurança, situação que invalidaria essa mesma estrutura. Este modelo, ao ter contacto entre vários elementos, obriga a uma malha com elementos de primeira ordem uma vez que, tal como já foi referido, o software adotado não consegue simular contacto entre elementos se a malha for composta por elementos de segunda ordem. Como já tinha sido observado que as simulações em que a malha é composta por elementos de 1ª ordem apresentam deslocamentos aproximados daquelas em que se recorre a elementos de segunda ordem se a maior dimensão desses elementos for de 3 *mm*, assim, a malha adotada é de primeira ordem com elementos de 3 *mm* de dimensão máxima. Tendo em conta que a utilização de elementos de malha com dimensão de 3 *mm* obriga a uma duração do cálculo longa, todas as simulações intermédias necessárias à determinação da posição e geometria da estrutura foram feitas com uma dimensão máxima dos elementos da malha de 6 *mm*. Determinou-se assim a geometria e posicionamento para a estrutura de proteção em caso de capotagem que seria a testar.

Como em nenhum dos casos de carga os pontos de fixação da bancada permitem a instalação da estrutura a ensaiar de forma idêntica à prevista para o trator, tornou-se necessário recorrer a uma fixação alternativa. No caso dos ensaios do carregamento horizontal posterior e no de esmagamento foi necessário recorrer a duas placas aparafusadas que fazem a ligação entre as bases da estrutura e os pontos de ancoragem da bancada. No caso do ensaio de carregamento horizontal lateral as bases da estrutura podem ser fixadas diretamente nos pontos de ancoragem da bancada sem a utilização de qualquer peça suplementar. Foi por isso necessário elaborar dois modelos numéricos idênticos à montagem na bancada para os ensaios de carga. Para cada ensaio de carga, foram elaborados dois modelos, um que replica a montagem da estrutura no trator, ilustrado pela figura 3.12, e o segundo replica a montagem da estrutura na bancada de ensaios, ilustrado pela figura 3.14. Este procedimento vai permitir aferir a fiabilidade dos resultados obtidos com o modelo de elementos finito com a configuração de montagem da estrutura igual á da bancada de ensaios e, com base no modelo com a configuração de montagem no trator, estimar os resultados da estrutura ao proceder a uma eventual montagem sobre um trator para realização dos ensaios de conformidade tal como previstos no regulamento.



Figura 3.12 – Modelo para análise de elementos finitos correspondente à montagem no trator.

No modelo que simula a montagem no trator, consideraram-se os pontos de furação das placas de ligação como pontos fixos. Nestes pontos foram bloqueados todos os graus de liberdade. A figura 3.13 ilustra a restrição dos graus de liberdade das placas de ligação ao trator no modelo correspondente.

Para a simulação dos parafusos M20 que fazem a ligação entre as placas e as bases foram utilizados dois elementos tipo cavilha. Na simulação do contacto entre estes elementos e os restantes elementos a ligar, considerou-se que estes elementos são indeformáveis nas definições das restrições de contacto. Foi necessário criar uma restrição de contacto para todas as faces destes elementos.

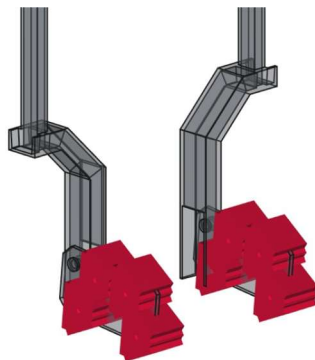


Figura 3.13 – Restrição dos graus de liberdade do modelo correspondente à montagem no trator.

Entre elementos a ligar, placas e bases, também foi criada uma restrição de contacto. Como o software não permite agrupar restrições de contacto, o modelo envolve 16 restrições para os quatro parafusos.



Figura 3.14 – Modelo para análise de elementos finitos correspondente ao ensaio físico.

O modelo que simula a montagem do ensaio físico difere do anterior apenas na ligação ao exterior, que neste caso é imposta pelas peças de apoio da estrutura na bancada de ensaio. Neste modelo restringiram-se todos os graus de movimento das faces inferiores dos encaixes. A restante bancada de ensaio não foi modelada. Foi criada uma restrição de contacto entre cada um dos apoios e a base correspondente.

A figura 3.15 ilustra as restrições de graus de liberdade, representadas a vermelho, e de contacto, representadas a verde no modelo correspondente ao ensaio físico.

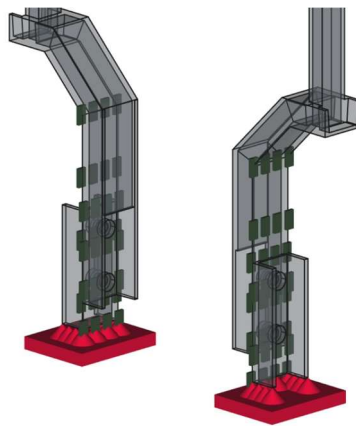


Figura 3.15 – Restrições de contacto e graus de liberdade.

A ligação entre cada uma das placas e a base correspondente é semelhante à do modelo anterior.

Para a aplicação das cargas foram criadas superfícies delimitadas de forma a ser possível aplicar ao modelo uma carga localizada. A figura 3.16 ilustra a restrição dos graus de liberdade e o conjunto das três cargas aplicadas isoladamente em cada um dos três ensaios realizados.



Figura 3.16 - Modelo ensaio com restrições de graus de liberdade e conjunto das forças aplicadas.

Tal como referido anteriormente, o software não permite a utilização de malhas com elementos de segundo grau quando se simula contatos entre elementos. Por esse motivo foram utilizados elementos de primeiro grau em todos os modelos de simulação. A dimensão máxima dos elementos da malha foi limitada a 3 *mm*. A figura 3.17 ilustra a malha gerada pelo software em modo *coarse* e a figura 3.18 ilustra a malha com um limite de 3 *mm* à dimensão máxima dos elementos.

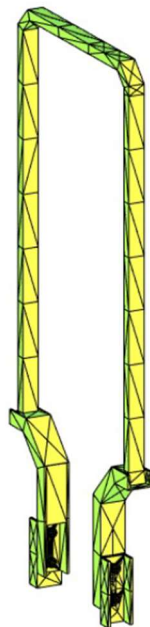


Figura 3.17 – Malha do modelo em modo *coarse*.

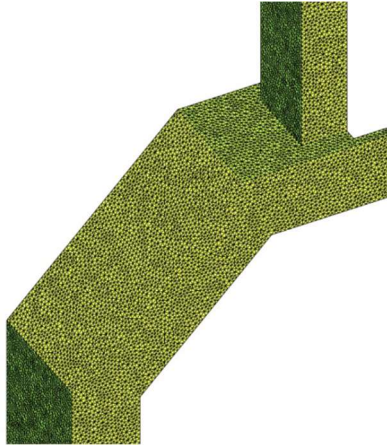


Figura 3.18 – Detalhe da malha com limitação a $3mm$ da dimensão máxima dos seus elementos.

As figuras 3.19 a 3.29 apresentam de forma gráfica, com escala de cores, a distribuição dos deslocamentos resultantes e a distribuição das tensões de von Mises. Esta forma de apresentação de resultados permite ter uma perceção do comportamento global da estrutura ao ser submetida às cargas dos ensaios.

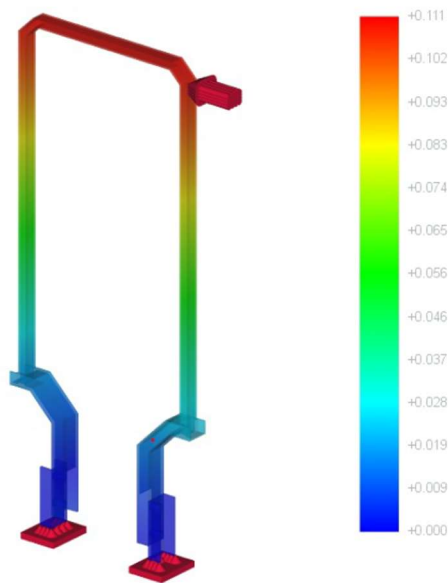


Figura 3.19 - Carregamento Lateral – Modelo do Ensaio – Distribuição dos deslocamentos resultantes (m).

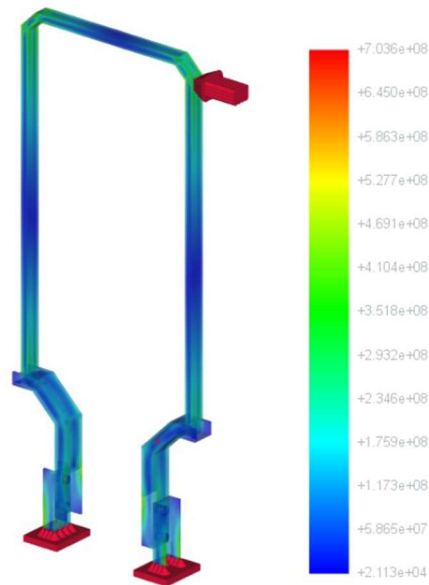


Figura 3.20 - Carregamento Lateral – Modelo do Ensaio – Distribuição das tensões de von Mises (Pa).

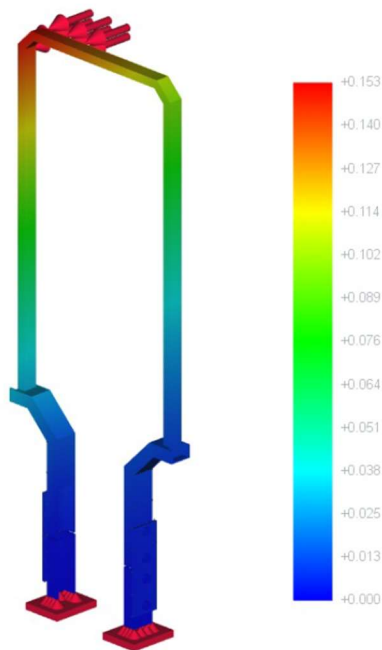


Figura 3.21 - Carregamento Posterior – Modelo do Ensaio - Distribuição dos deslocamentos resultantes (m).

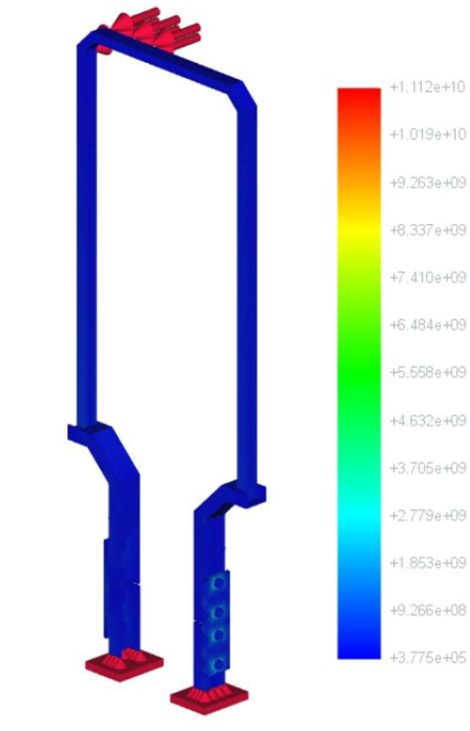


Figura 3.22 - Carregamento Posterior – Modelo do Ensaio - Distribuição das tensões de von Mises (Pa).

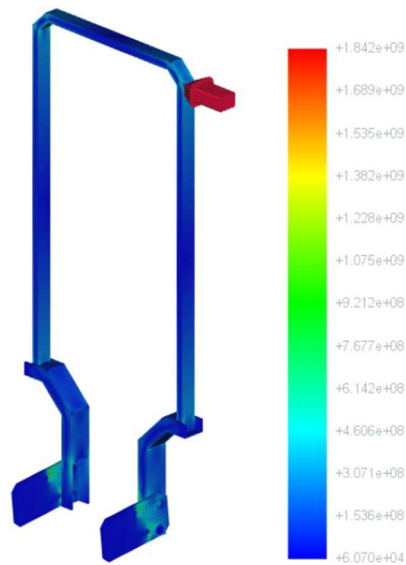


Figura 3.23 - Carregamento Lateral - Modelo do Trator – Distribuição das tensões de von Mises (Pa).

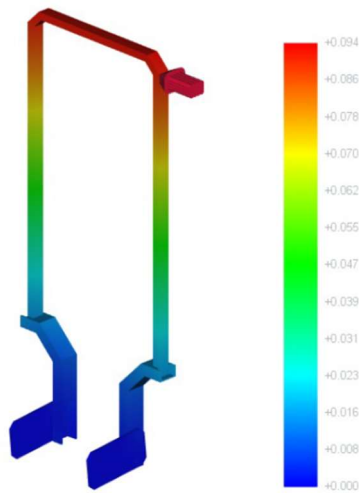


Figura 3.24 - Carregamento Lateral - Modelo do Trator - Distribuição dos deslocamentos resultantes (m).

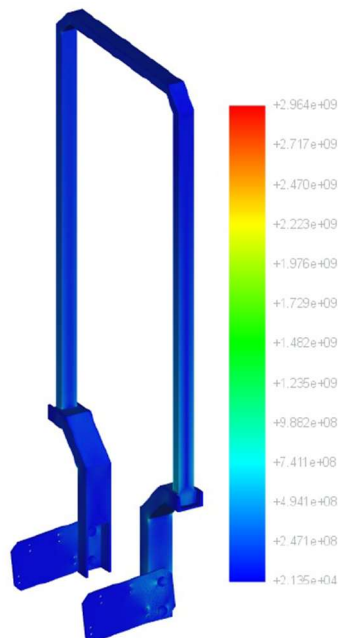


Figura 3.25 - Carregamento Posterior - Modelo Trator – Distribuição das tensões de von Mises (Pa).

Utilizando a função *Sclicp*, o software permite isolar graficamente as zonas onde os resultados ultrapassam um valor determinado. Com esta função podemos analisar mais em detalhe quais as zonas onde há maior probabilidade de ocorrer uma deformação permanente. A figura 3-26 apresenta as zonas onde as Tensões de von Mises estão acima de 275 MPa. Podemos observar que ocorreram tensões acima de 275 MPa em parte dos dois prumos do arco e na base, do lado da aplicação da carga.

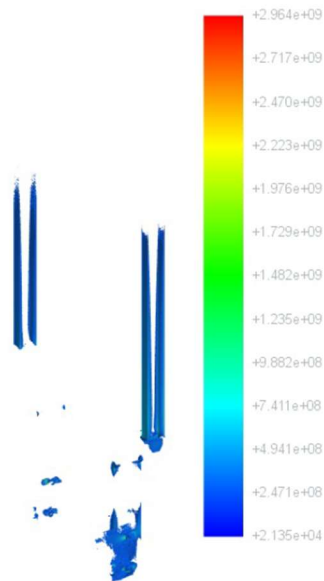


Figura 3.26 - Carregamento Posterior - Modelo Trator – Zonas com tensões de von Mises acima de $275 \times 10^6 Pa$.

A figura 3-27 ilustra o pormenor das zonas da ligação entre as bases e as placas de ligação ao trator. Aqui, foram isoladas as tensões de von Mises superiores a $275 MPa$ e foram sobrepostas ao corpo do modelo de forma a facilitar a perceção da sua localização na estrutura. Pode-se observar que nesta zona a tensão supera os $275 MPa$.

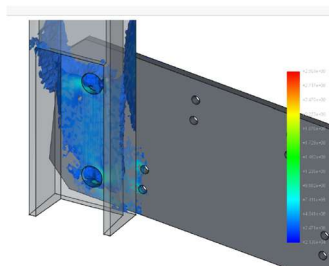


Figura 3.27 – Detalhe da ligação entre as bases e as placas de ligação – Zonas com tensões de von Mises superiores a $275 \times 10^6 Pa$.

A figura 3-28 ilustra a mesma zona da figura anterior, mas apresentando apenas as zonas onde a tensão de von Mises supera os $470 MPa$.

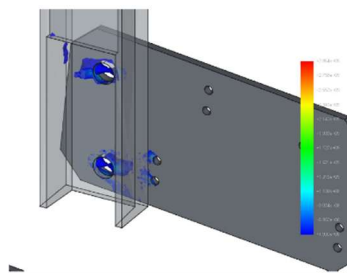


Figura 3.28 – Detalhe da ligação entre as bases e as placas de ligação – Zonas com tensões de von Mises superiores a $470 \times 10^6 Pa$.

A figura 3.29 ilustra os deslocamentos obtidos no carregamento horizontal posterior.

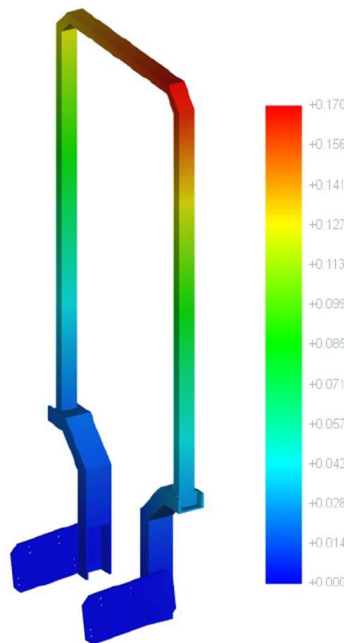


Figura 3.29 - Carregamento Posterior - Modelo Trator - Distribuição dos deslocamentos resultantes (m).

3.3.4 Discussão de Resultados

Da análise dos resultados obtidos nos modelos numéricos dos ensaios de carregamentos horizontais, verifica-se que as tensões de von Mises só superam o limite de escoamento do material em pequenas áreas sem atravessar toda a seção dos elementos da estrutura. Mesmo se considerarmos que a rotura do material ocorre acima dos 470 MPa , em nenhuma parte da estrutura é assinalado esse valor em toda a secção de um elemento. Assim, pode-se concluir que não irá ocorrer rotura da estrutura ao ser submetida às cargas previstas nos ensaios.

Uma vez que as tensões de von Mises obtidas pelo modelo excedem o valor da tensão de escoamento do material, sabe-se que a estrutura vai sofrer uma deformação permanente. A partir do momento em que a tensão de escoamento é ultrapassada o comportamento duma estrutura deixa de ser linear. No entanto, o modelo utilizado considera unicamente um comportamento linear, independentemente de as tensões ultrapassarem ou não o limite de escoamento. Como é sabido que ao ultrapassar o limite de escoamento de um material o gráfico de tensão/deformação sofre um achatamento, podemos concluir que o modelo apresenta valores de deslocamento inferiores aos que se podem esperar num ensaio físico. Sendo o valor do deslocamento da estrutura um elemento crucial para a sua validação, e sabendo que esse valor está subestimado pelo modelo, é importante que o valor obtido no ensaio numérico não esteja próximo do limite admissível.

O ensaio de carregamento vertical, esmagamento, apresenta resultados para as tensões de von Mises abaixo do limite de escoamento do material. Ao ficar sempre dentro do regime elástico o ensaio numérico linear torna-se mais fidedigno, pelo que é expectável que neste ensaio os deslocamentos observados no ensaio numérico fiquem muito próximos dos observados nos ensaios experimentais.

3.4 Testes experimentais ao ROPS

A execução dos testes experimentais ao ROPS envolveu, numa primeira fase a construção de um modelo real. Esse modelo foi em seguida submetido a uma série de ensaios de carga de forma a avaliar o seu comportamento. Esses ensaios de carga foram realizados de forma a tentar replicar o mais fielmente possível os ensaios descritos no regulamento 1322/2014. Os testes foram implementados com recurso a uma bancada de esticamento disponível.

3.4.1 Bancada de testes

Para a realização dos ensaios experimentais foi utilizada uma bancada de teste, composta por duas vigas de aço, uma vertical e outra horizontal, de secção 200 mm x 120 mm x 12 mm, montadas em forma de “L”. Na extremidade da viga horizontal estão duas bases de apoio em perfil UPN160. A bancada dispõe de quatro pontos de ancoragem fixos em perfil UPN80 localizados na extremidade da viga horizontal. Dois dos apoios estão localizados longitudinalmente na própria viga e dois estão em posição perpendicular à viga, colocados nas bases de apoio. A estrutura foi montada nos pontos de ancoragem fixos, utilizando os dois pares de apoios de forma a facilitar a aplicação das cargas, simulando os carregamentos longitudinal e lateral. Um quinto ponto de apoio composto por um perfil UPN80 abraçado à viga vertical, que pode ser regulado em altura, foi usado para bloquear a cinta de amarração do esticador. A figura 3-30 ilustra a bancada de esticamento utilizada nos ensaios de carga.

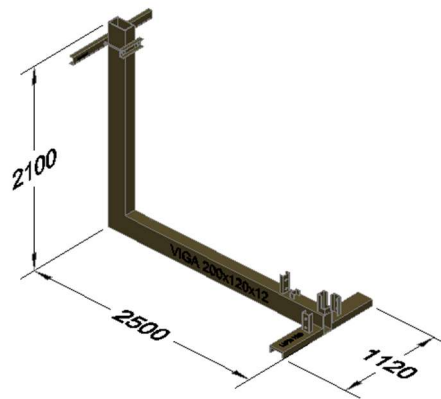


Figura 3.30 – Esquema da bancada de esticamento utilizada nos ensaios laboratoriais (dimensões em *mm*).

Para aplicação das cargas utilizou-se um guincho manual de corrente uma vez que o esticador normalmente utilizado não permitia ter sensibilidade na aplicação das cargas. Foi instalada uma balança de suspensão entre o guincho manual de corrente e a bancada de forma a determinar a intensidade da carga aplicada pelo guincho na estrutura. O guincho manual de corrente permite uma aplicação progressiva da força, cuja intensidade é controlada diretamente no visor da balança de suspensão, até se atingir a carga desejada. Não sendo um sistema automatizado e por se pretender que a variação das cargas seja sempre crescente ou decrescente, não se procurou obter valores exatos de carga tendo-se optado por registar o valor real da carga assim que está suficientemente próxima do valor pretendido. A balança apresenta os valores diretamente em *Newton*.

No ensaio de carga longitudinal, foi montada uma primeira cinta de tração entre a ancoragem da viga vertical da bancada e a balança e foi montada uma segunda cinta de tração entre o gancho da corrente do esticador e a estrutura. As cintas foram montadas desviadas do plano médio da estrutura de forma a garantir que a posição do ponto de aplicação da carga esteja de acordo com o regulamento 1322/2014. A ligação entre a balança e o guincho foi assegurada pelo encaixe das manilhas de ambos. A estrutura a carregar foi montada na posição transversal em relação à bancada. O esquema de montagem é apresentado na figura 3-31.

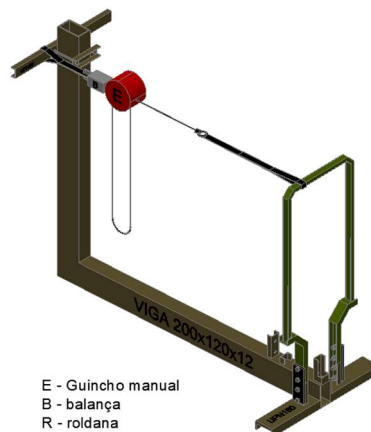


Figura 3.31 – Esquema da montagem para os ensaios de carga longitudinal.

A montagem do ensaio de carga lateral é similar à do ensaio de carga longitudinal, mas como a linha de aplicação da carga pertence ao plano médio da estrutura, foi necessário alterar a fixação da cinta ao ponto de ancoragem da viga vertical da bancada. Para este ensaio a estrutura foi montada em posição longitudinal relativamente à bancada de ensaio. O esquema desta montagem é apresentado na figura 3-32.

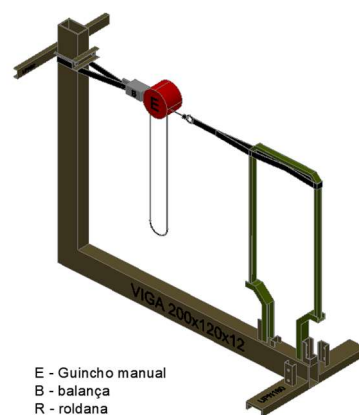


Figura 3.32 – Esquema da montagem para o ensaio de carga lateral.

No ensaio de esmagamento colocou-se a estrutura na posição transversal em relação à bancada de ensaio. O regulamento 1322/2014 prevê que a carga de esmagamento seja uma carga de compressão distribuída aplicada por uma viga rígida, dispondo apenas de uma bancada de esticamento, recorreu-se a uma barra em tubo quadrado de secção 50 mm x 50 mm x 5 mm de forma a distribuir a carga aplicada pela cinta de esticamento sobre a estrutura. Como a carga a aplicar ultrapassa a carga máxima do guincho, utilizou-se um sistema de polias para duplicar a carga aplicada na viga. Foram utilizadas polias de baixo atrito e cabos estáticos. O esquema de montagem é apresentado na figura 3-33.

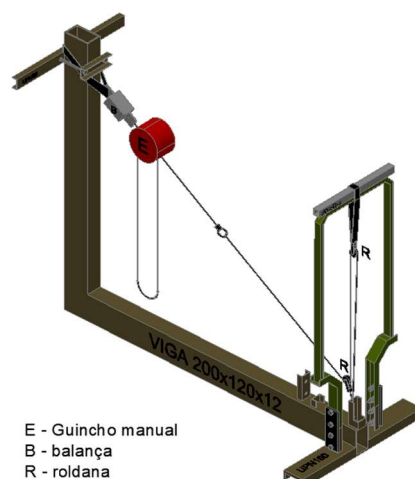


Figura 3.33 – Esquema da montagem para os ensaios de esmagamento.

Para a realização do ensaio de esmagamento foi necessário recorrer a um moitão para duplicar o efeito do esticador, que tem um limite de 10000 N, e assim conseguir levar a carga sobre a estrutura aos 12000 N. Foram utilizadas polias de baixo atrito de forma a que esse mesmo atrito pudesse ser negligenciado na avaliação dos resultados. Uma vez que o regulamento prevê que a carga de esmagamento seja aplicada por uma viga, neste caso de carga foi utilizada uma barra transversal de maior rigidez de forma a distribuir aplicação da mesma evitando uma concentração de tensões. A cinta de tração abraça a viga de maior rigidez e a travessa transversal da estrutura, esse efeito foi desprezado uma vez que os ensaio numéricos já tinham demonstrado que a estrutura resiste com facilidade à carga de esmagamento prevista.

Os deslocamentos de pontos específicos da estrutura foram quantificados com recurso a um distanciômetro laser que mediu a distância entre um ponto de referência na estrutura a ensaiar e um ponto de referência no montante da bancada de ensaio, este sistema permite determinar a variação da distância entre os dois pontos após a cada aumento da carga aplicada de forma rápida. De forma complementar, foram controlados, com recurso a uma estação total, cinco pontos na estrutura da bancada de ensaios e diversos pontos na estrutura do arco de segurança a ensaiar. Este controlo suplementar permite determinar a deformação da estrutura do arco de segurança e também eventuais deformações da estrutura da bancada de ensaio, que por uma questão de simplificação se considerou inicialmente como indeformável. Este método é significativamente mais rigoroso que o distanciômetro, mas por ser um método de determinar as deformações muito mais demorado, foi realizado apenas imediatamente antes do início da aplicação das cargas e após a aplicação da carga máxima, não tendo sido realizado para as cargas intermédias. Simultaneamente, foi feita a medição com o distanciômetro de modo a interligar as duas observações.

3.4.2 Instrumentação do ROPS com extensometria

Durante os ensaios experimentais foram feitas avaliações das deformações em dois pontos da estrutura onde previamente foram instaladas duas rosetas extensométricas. Neste caso foram aplicadas duas rosetas extensométricas da marca HBM, referencia RM8, em que cada uma é composta por três extensómetros com um ângulo de 45° entre eles. Cada uma das rosetas foi ligada, de forma alternada, a uma ponte extensométrica da marca Vishay, modelo P3. Cada um dos extensómetros foi ligado em quarto de ponte. A figura 3-34 ilustra o equipamento de extensometria, sendo visível a fonte, a azul, e as ligações às rosetas durante o ensaio de esmagamento.

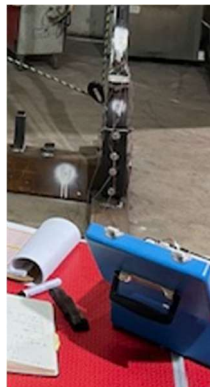


Figura 3.34 – Pormenor da fonte para as medições de extensometria.

Uma das rosetas foi instalada na lateral de um dos prumos verticais do ROPS e a segunda foi montada sobre a face posterior da base. A figura 3-35 mostra a roseta montada sobre a base. Estes locais foram escolhidos por serem aqueles em que havendo uma concentração de tensões significativa, o risco de danos, durante as operações de montagem e desmontagem do ROPS sobre a bancada, era mais reduzido. Estas medições têm como objetivo confirmar os valores de tensões calculados pelo modelo numérico.



Figura 3.35 – Pormenor de uma da roseta montada sobre a base.

A calculo das tensões principais no ponto faz-se aplicando a equação (6):

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} * \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2} * (1+\nu)} * \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad (3.6)$$

Em que:

$\sigma_{1,2}$ são as tensões principais.

E é o modulo de elasticidade do material

ν é o coeficiente de *Poisson* do material

ε é a extensão obtida em cada extensómetro i (i=a, b, c)

A partir das quais se pode obter a tensão de von Mises com a equação (7):

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 * \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (3.7)$$

Em que:

σ_{VM} é a tensão de von Mises.

3.4.3 Metodologia de Teste

Foram materializados na estrutura vários pontos a controlar de modo a determinar os seus deslocamentos com vista a determinar a deformação da estrutura.

Os deslocamentos da estrutura foram avaliados com recurso a um distanciómetro laser que mediu a distância entre um ponto de referência na estrutura a ensaiar e um ponto de referência no montante da bancada de ensaio. Este sistema permite determinar a variação da distância entre os dois pontos após cada aumento da carga aplicada de forma rápida. De forma complementar, foram controlados, com recurso a uma estação total, cinco pontos na estrutura da bancada de ensaios e diversos pontos na estrutura do arco de segurança a ensaiar. Este controlo suplementar permite determinar a deformação da estrutura do arco de segurança e também eventuais deformações da estrutura da bancada de ensaio, que por uma questão de simplificação se considerou inicialmente como indeformável. Este método é significativamente mais rigoroso que o distanciómetro, mas por ser um método de determinar as deformações muito mais demorado, foi realizado apenas imediatamente antes do início da aplicação das cargas e após a aplicação da carga máxima, não tendo sido realizado para as cargas intermédias. Simultaneamente, foi feita a medição com o distanciómetro de modo a interligar as duas observações.

Na primeira fase as cargas foram limitadas a 3000 N para evitar a entrada em regime de deformação plástico, na segunda fase as cargas foram elevadas até ao valor necessário para validação da estrutura.

3.4.4 1ª fase - Ensaios em regime elástico.

Nesta fase foram realizados três ensaios de carregamento distintos à estrutura:

- Carregamento horizontal posterior;
- Carregamento de esmagamento;
- Carregamento horizontal lateral.

Para cada um destes ensaios procedeu-se da seguinte forma:

- a) Montagem da estrutura a ensaiar na respetiva posição na bancada incluindo a montagem do esticador;
- b) Ajuste da estrutura;
- c) Leitura e registo dos pontos de referência com estação total;
- d) Leitura e registo da distância entre o angulo superior da estrutura e o montante da bancada;
- e) Leitura e registo dos valores das rosetas extensométricas;
- f) Aumento da tensão no esticador em 500 N;
- g) Leitura e registo da distância entre a estrutura e o montante da bancada com o distanciómetro de mão;
- h) Leitura e registo dos valores das rosetas extensométricas;
- i) Repetição dos pontos anteriores até que seja atingida a carga de 3000 N (pontos f, g e h);
- j) Assim que o valor de 3000 N é atingido, leitura dos pontos de referência com a estação total;
- k) Diminuição da tensão no esticador em 500 N;
- l) Leitura e registo da distância entre a estrutura e o montante da bancada com o distanciómetro de mão;
- m) Leitura e registo dos valores das rosetas extensométricas;
- n) Repetição dos pontos anteriores até que seja atingida a carga de 0 N (pontos k, l e m);
- o) Assim que o valor de 0 N é atingido, leitura dos pontos de referência com a estação total.

A figura 3-40 mostra a ancoragem do esticador e a sua ligação à balança de suspensão utilizada para determinar a força aplicada, sendo visíveis as zonas pintadas a branco de forma a aumentar o contraste dos pontos de controlo usados para leitura com a estação total.



Figura 3.36 – Montagem do esticador e da balança na bancada de ensaio para o ensaio horizontal.

A figura 3.37 e 3.38 mostram a montagem da cinta de tração para o ensaio de carga lateral. Neste ensaio foi necessário cruzar a cinta sobre a estrutura para simular uma carga aplicada do exterior para o interior do arco.

A figura 3.39 ilustra a montagem para o ensaio de esmagamento. Para duplicar a carga exercida pelo esticador utilizou-se um sistema de roldanas. Para distribuir a carga aplicada sobre a estrutura utilizou-se uma barra de maior rigidez aplicada sobre a estrutura.



Figura 3.37 – Montagem da estrutura e colocação da cinta de tração no ensaio de carga lateral.



Figura 3.38 – Montagem da estrutura para ensaio lateral.



Figura 3.39 – Montagem da estrutura e da cinta de tração no ensaio de esmagamento.

Pela análise do modelo de elementos finitos sabe-se que ao solicitar a estrutura com as cargas máximas previstas para os ensaios longitudinal e lateral, o material da mesma entra no regime plástico de deformação, e por esse motivo dividiu-se o ensaio em duas fases.

Na primeira fase as cargas a aplicar foram limitadas a 3000 N, de forma a permitir fazer repetições do ensaio. Nesta fase foram realizados dois carregamentos sucessivos de forma a avaliar as tensões de von Mises na zona de instrumentação com as rosetas extensométricas.

Na segunda fase, as cargas foram elevadas até aos 6000 N para o ensaio de carga posterior e o de carga lateral e até aos 12000 N para o ensaio de carga de esmagamento.

Adicionalmente e para cada ensaio, foi aplicada antes do início das leituras uma carga de cerca de 2000 N com o objetivo de garantir o ajuste da montagem da estrutura a ensaiar sobre a bancada e confirmar a sua integridade.

De seguida apresentam-se os resultados mais significativos, caso a caso.

Carregamento horizontal posterior.

Para a situação de carregamento horizontal posterior, os deslocamentos máximos foram de 113 mm para a leitura com o distanciómetro e 99 mm para a leitura com a estação total. Os valores residuais foram de 12 mm para o distanciómetro e 13 mm para a estação total. Sabendo-se que a estação total, por não ser afetada pela eventual deformação da bancada, por ter uma maior precisão do seu distanciómetro e pela garantia de rigor na determinação do ponto a ler, permite obter valores mais precisos ao constatar-se a existência de um valor residual, que não deveria existir no regime elástico, é razoável admitir que esse mesmo valor se deve a um ajuste da fixação da estrutura à bancada de ensaio ou à rigidez da própria bancada. Esse ajuste que poderá ser desprezado durante a análise da resistência da estrutura tem, no entanto, importância na análise da conformidade da estrutura com o regulamento, uma vez que contribui para a deformação máxima da estrutura podendo levar à intrusão da mesma na área de segurança a garantir.

Dos dados obtidos, constatou-se que o modelo numérico com pinos de contacto em regime linear ficou 21% acima do valor máximo obtido com a estação total para o deslocamento no primeiro ensaio e 17% acima no segundo ensaio. Já o modelo simplificado bilinear apresentou uma diferença de -37 % no primeiro carregamento e -41 % no segundo carregamento. O ponto de controle considerado para esta comparação foi o topo do prumo vertical do arco da estrutura. As figuras 3-40 e 3.41 apresentam os gráficos Deslocamento/Carga dos dois carregamentos horizontais posteriores realizados no regime elástico. Estes gráficos apresentam três curvas em que:

Distanciómetro, representa os deslocamentos obtidos com o distanciómetro laser de mão;

Estação total, representa os deslocamentos obtidos com a estação total;

FEM, representa os deslocamentos obtidos pelo ensaio numérico.

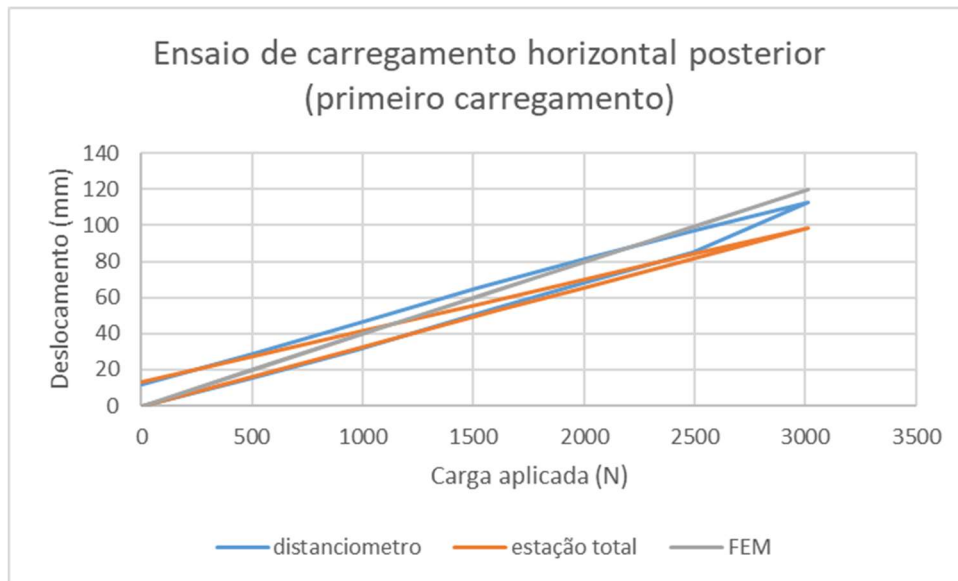


Figura 3.40 – Deslocamentos, 1º carregamento horizontal posterior

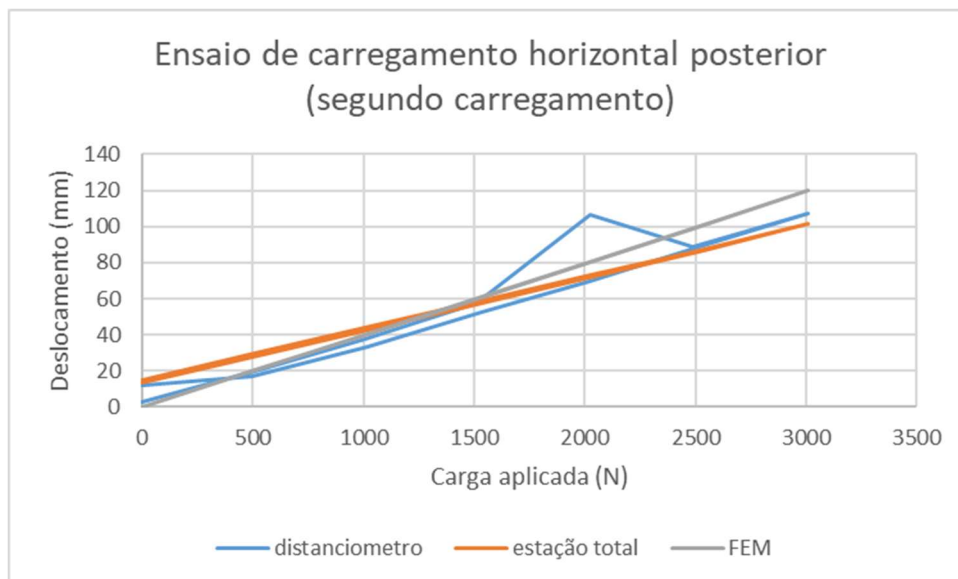


Figura 3.41 – Deslocamentos, 2º carregamento horizontal posterior

No primeiro ensaio realizado, carregamento horizontal posterior, observou-se que os valores da tensão de von Mises calculadas pelo modelo numérico, para o ponto onde está colada a roseta, são superiores às obtidas no ensaio experimental. Na figura 3.42 o gráfico comparativo entre as duas curvas é claramente visível a divergência, em que as tensões de von Mises no modelo numérico atingem 89 MPa contra os 51 MPa obtidos experimentalmente.

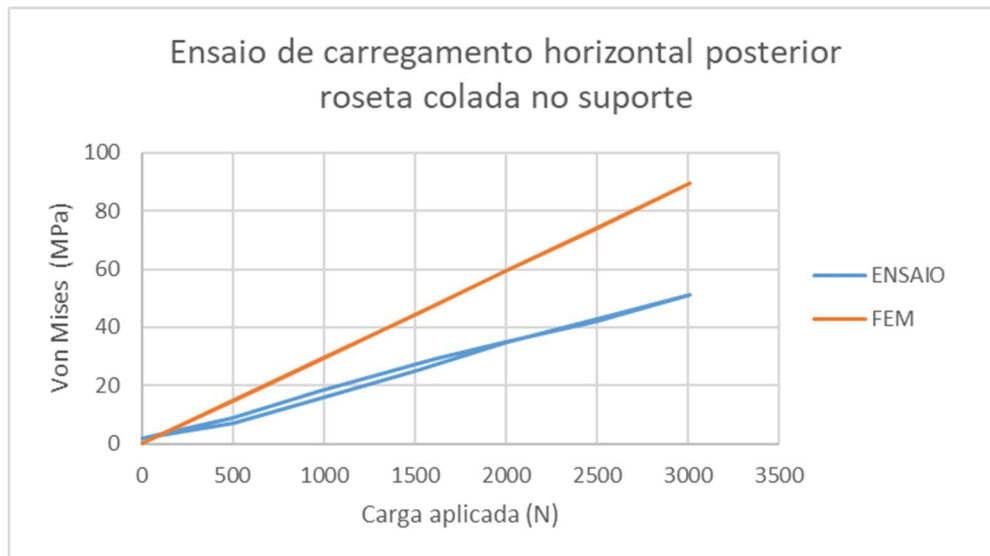


Figura 3.42 – Gráfico de comparação das tensões de von Mises obtidas nos modelos numérico e experimental, carregamento horizontal posterior – roseta colada no suporte.

O ensaio foi repetido para a leitura dos extensômetros colados no arco. Neste ensaio houve uma maior dificuldade em calibrar a ponte extensométrica, uma vez que havia flutuações significativas dos valores iniciais. A figura 3.43 com o gráfico comparativo evidencia essas flutuações, ainda assim a linha de tendência dos valores obtidos experimentalmente tem uma pendente similar à obtida pelo modelo numérico.

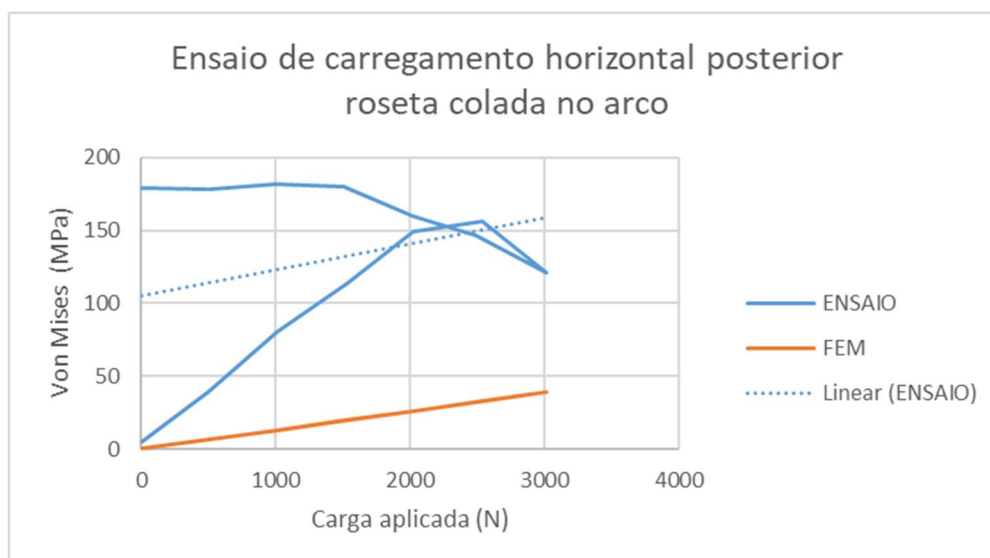


Figura 3.43 – Gráfico de comparação das tensões de von Mises obtidas nos modelos numérico e experimental, carregamento horizontal posterior – roseta colada na base.

Carregamento de esmagamento posterior

No ensaio com o carregamento de esmagamento foi feita a medição entre a barra transversal da estrutura e um ponto fixo na base da bancada de ensaio, como neste caso de carga a estrutura é solicitada maioritariamente á compressão e a grandeza das cargas não provoca problemas de encurvadura nos prumos, os deslocamentos

observados confirmam os resultados obtidos no ensaio numérico, registrando-se apenas alguns milímetros. Por esse motivo não é dada especial atenção a este ensaio.

Carregamento horizontal lateral

O procedimento para o ensaio de carregamento lateral é semelhante ao do ensaio de carregamento posterior, e aqui também se verifica um valor residual nas leituras efetuadas com a estação total. Mais uma vez se verifica que o modelo numérico sobre estimou os deslocamentos no ponto superior do prumo vertical da estrutura, tendo ficado 16% acima no primeiro ensaio e 11% acima no segundo ensaio quando comparado com os valores máximos obtidos.

Neste ensaio os valores de tensão obtidos pela leitura dos extensómetros indiciam que poderá ter havido alguma degradação das rosetas uma vez que as leituras apresentam variações elevadas de valor mesmo sem aplicação de qualquer carga e com a estrutura em repouso.

As figuras 3.44 e 3.45 apresentam os gráficos Deslocamento/Carga, do primeiro e segundo carregamento horizontal lateral respetivamente, realizados no regime elástico. Estes gráficos apresentam três curvas:

Distanciómetro: deslocamentos lidos com o distanciómetro laser de mão;

Estação total: deslocamentos lidos com a estação total;

FEM: deslocamentos obtidos pelo ensaio numérico.

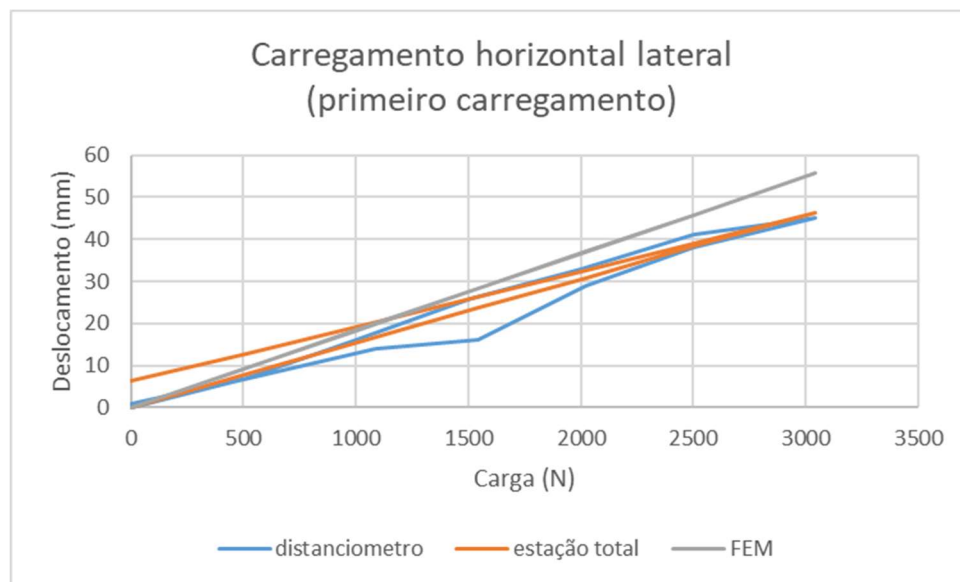


Figura 3.44 – Deslocamento, 1º carregamento horizontal lateral.

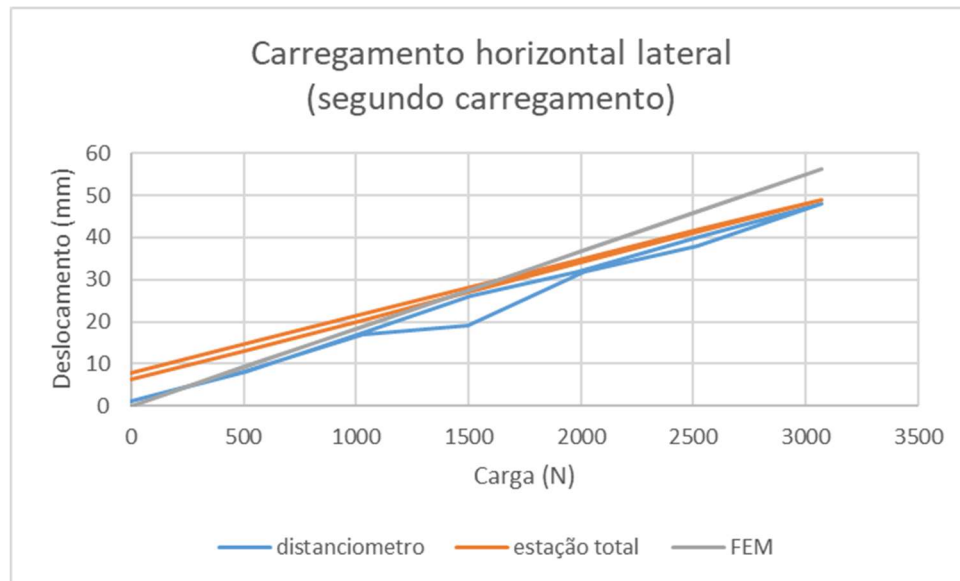


Figura 3.45 – Deslocamento, 2º carregamento horizontal lateral.

Tal como nos ensaios de carregamento horizontal posterior, durante os dois ensaios de carregamento lateral, observou-se que, apesar da impossibilidade de estabilizar a ponte, as linhas de tendência dos valores obtidos experimentalmente nos dois ensaios, são praticamente paralelas às do modelo numérico. Na figura 3.46 apresenta-se o gráfico de comparação com o modelo das tensões medidas na base e na figura 3.47 apresenta-se a comparação com o modelo dos valores das tensões medidas no arco.

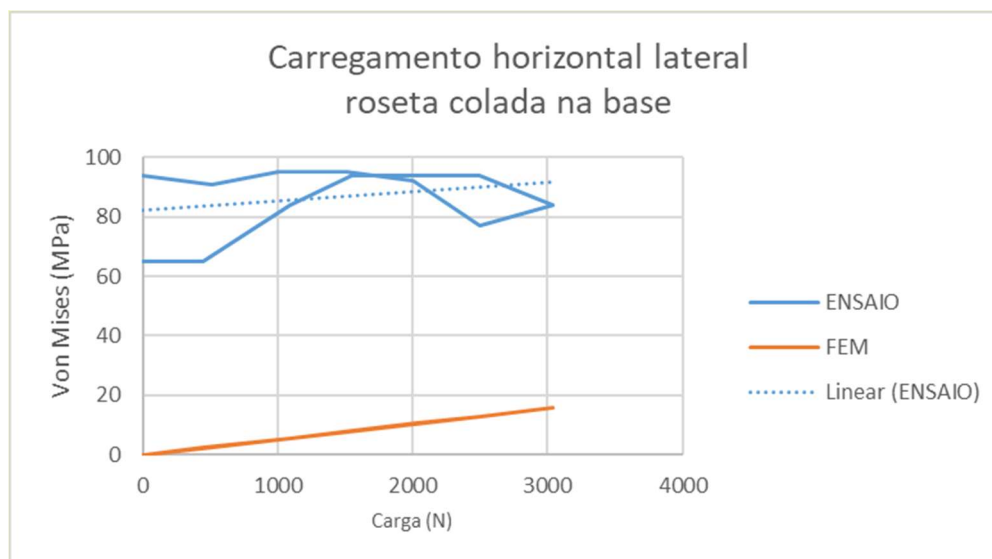


Figura 3.46 - Gráfico de comparação das tensões de von Mises obtidas nos modelos numérico e experimental, carregamento horizontal lateral – roseta colada na base.

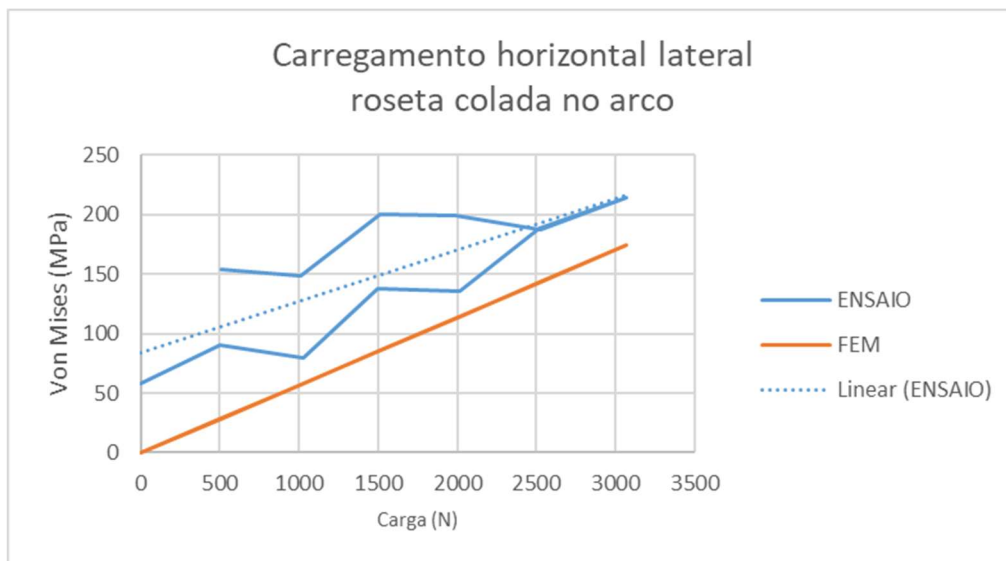


Figura 3.47 – Gráfico de comparação das tensões de von Mises obtidas nos modelos numérico e experimental, carregamento horizontal posterior – roseta colada no arco.

3.4.5 2ª fase - Ensaio em regime plástico.

Os ensaios realizados nesta fase tiveram como objetivo submeter a estrutura a cargas que permitiriam a sua validação no âmbito do regulamento.

Todo o procedimento é igual ao já descrito para a primeira fase com exceção do valor máximo das cargas e do incremento das mesmas na fase inicial do carregamento.

Carregamento horizontal posterior

A tabela 3.1 apresenta os resultados finais do carregamento horizontal posterior. No ponto 10, que corresponde ao ponto de deslocamento máximo, obteve-se experimentalmente um deslocamento máximo absoluto de 267 *mm*. Para esse mesmo ponto obteve-se no modelo numérico um deslocamento estimado de 240 *mm*. O erro relativo é de 10%, o que é aceitável para as condições de teste consideradas.

Tabela 3.1 – Deslocamentos medidos com estação total nos pontos de controle para o carregamento horizontal posterior.

Ponto	MÁXIMO (F = 5940 N)				FINAL (F = 0 N)			
	Distância	Componente			Distância	Componente		
	Total (mm)	Long. (mm)	Vert. (mm)	Trans. (mm)	Total (mm)	Long. (mm)	Vert. (mm)	Trans. (mm)
7	34	34	1	2	13	13	2	0
8	80	80	8	2	31	31	3	0
9	207	204	33	-1	78	77	10	-4
10	267	263	44	-2	98	97	12	-5
11	214	212	32	-4	86	85	10	-4
12	164	162	23	-4	68	68	8	-3
13	52	52	4	-3	24	24	3	-2
6	31	31	1	-2	13	13	2	-1
15	7	5	-4	0	2	2	0	1
14	18	18	-1	0	6	6	1	0

Carregamento horizontal lateral

Neste ensaio verificou-se que o deslocamento máximo absoluto no ponto 4 foi de 165 *mm* enquanto no modelo de elementos finitos temos um deslocamento de 110 *mm* ao que corresponde um erro de -33%, o que sendo bastante elevado é, no entanto, expectável uma vez que o modelo é realizado considerando que o material se mantém no regime elástico. Da observação das deformações é perceptível que os pontos 1, 8, 9 e 10 apresentam deslocamentos que, não foram recuperados após supressão das cargas, o que indicia uma deformação residual normalmente relacionada com uma entrada do material no regime de deformação plástica. Na análise das tensões no modelo de elementos finitos, constata-se que, na área de fixação, o limite de elasticidade é ultrapassado, confirmando a ocorrência duma deformação plástica compatível com a deformação observada visualmente após desmontagem da estrutura da bancada. Os valores obtidos com estação total estão listados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Deslocamentos medidos com estação total nos pontos de controle para o carregamento horizontal lateral.

Ponto	MÁXIMO F = 5940 N				FINAL F = 0 N			
	Distância	Componente			Distância	Componente		
	Total (mm)	Long. (mm)	Vert. (mm)	Trans. (mm)	Total (mm)	Long. (mm)	Vert. (mm)	Trans. (mm)
1	17	14	2	10	10	4	2	8
2	41	39	-7	12	16	13	-3	9
3	126	125	7	15	47	46	2	9
4	165	164	13	18	65	64	4	10
5	178	173	29	-20	64	62	11	12
6	131	127	25	20	53	51	9	11
7	44	40	13	13	25	22	7	9
8	20	18	0	10	14	11	0	7
9	8	4	-2	7	7	2	-1	7
10	10	-2	0	10	10	0	-1	10

3.5 Discussão Global dos resultados.

A tabela 3.3 apresenta o resumo dos resultados obtidos no ensaio experimental e no modelo de elementos finitos para o carregamento horizontal posterior. É apresentada a variação dos resultados obtidos com estação total e no modelo de elementos finitos em relação aos deslocamentos medidos com distanciômetro. Verificou-se que o modelo de elementos finitos está 31% abaixo dos valores obtidos com distanciômetro e 25% abaixo dos valores obtidos com estação total.

Tabela 3.3 – Tabela comparativo dos deslocamentos do carregamento horizontal posterior.

Carga (N)	Distanciómetro		Estação Total		FEM	
	Leitura (mm)	Desloc. (mm)	Desloc. (mm)	Variação (%)	Desloc. (mm)	Variação (%)
0	2598	0	0	0	0	0
2020	2537	61	-	-	67	10
2512	2522	76	-	-	84	10
3010	2499	99	-	-	100	1
3461	2474	124	-	-	64	-7
4010	2444	154	-	-	134	-13
4500	2413	185	-	-	150	-19
5040	2379	219	-	-	168	-23
5530	2342	256	-	-	184	-28
5940	2310	288	263	-9	198	-31
0	2496	102	98	-4	0	0

A figura 3.48 apresenta o gráfico das curvas carga/deslocamento para as leituras efetuadas durante o ensaio de carregamento horizontal posterior e para o modelo de elementos finitos. Da análise dos dados obtidos com distanciómetro, a azul no gráfico, embora sendo menos rigorosos, observa-se que a deformação da estrutura não é linear, o que evidencia a entrada do material no regime plástico de deformação.

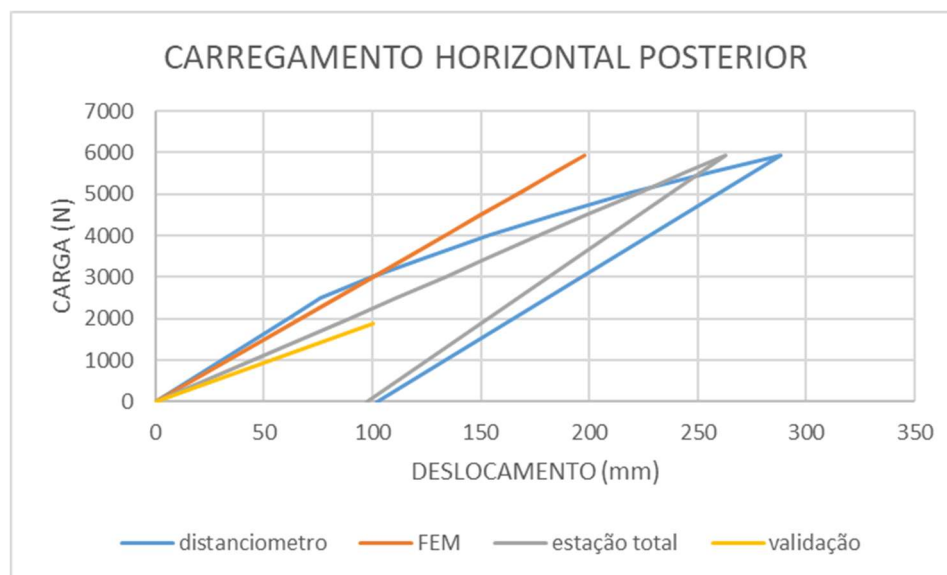


Figura 3.48 – Gráfico comparativo dos deslocamentos no carregamento horizontal posterior.

De notar que as curvas referentes às leituras com estação total aparecem representados de forma linear porque só dispomos das leituras no início e no final do carregamento. Uma correção da curva obtida com distanciómetro seria aceitável, mas foi considerada dispensável uma vez que o valor máximo do deslocamento é

suficiente para verificar se há intrusão da estrutura na zona livre. Podemos constatar que os deslocamentos determinados pelo modelo de elementos finitos estão acima da realidade enquanto o material se encontra no regime elástico, chegando a um máximo de 34% invertendo gradualmente a situação a partir do momento em que entra em regime plástico. A modelação das ligações é a responsável pelo maior deslocamento considerado pelo modelo de elementos finitos na fase elástica. Pela análise gráfica das tensões de von Mises pode-se constatar que aos 3000 N de carga estas já atingem os 275 MPa nas placas de ligação ou seja, já se inicia a deformação plástica, que, tendo uma amplitude maior que a deformação elástica, não é considerada pelo modelo de elementos finitos, uma vez que este é linear.

A tabela 3.4 apresenta o resumo dos resultados obtidos no ensaio experimental e no modelo de elementos finitos para o carregamento horizontal lateral. É apresentada a variação dos resultados obtidos com estação total e no modelo de elementos finitos em relação aos deslocamentos medidos com distanciómetro. Constatou-se que os valores obtidos pelo modelo de elementos finitos estão 34% abaixo dos valores lidos com distanciómetro e 36% abaixo dos valores lidos com estação total.

Tabela 3.4 - Tabela comparativo dos deslocamentos do carregamento horizontal lateral.

Carga (N)	Distanciómetro		Estação Total		FEM	
	Leitura (mm)	Desloc. (mm)	Desloc. (mm)	Variação (%)	Desloc. (mm)	Variação (%)
0	1945	0	0	0	0	0
3080	1892	53	-	-	56	7
4020	1862	83	-	-	74	-11
4997	1828	117	-	-	92	-22
6050	1779	166	174	5	110	-34
0	1884	61	64	5	0	0

Aplicando-se a metodologia seguida em (Chennuri, Kothagadi, & Mohammad, 2015) determinou-se a força a aplicar nos ensaios para atingir a energia mínima de validação em ambos os casos de carregamento horizontal. Para o carregamento posterior obteve-se o valor de força a aplicar de 1890 N aos 100 mm de deslocamento e para o ensaio lateral obteve-se o valor de força a aplicar de 3920 aos 250 mm de deslocamento. Nos gráficos foram traçadas linhas de validação, a amarelo, que unem o ponto zero ao ponto força/deslocamento atrás determinado. É possível observar que as curvas obtidas durante os carregamentos ficaram, como era desejável, sempre acima dessa linha de validação. A figura 3.49 apresenta o gráfico das curvas carga/deslocamento para o carregamento horizontal lateral.

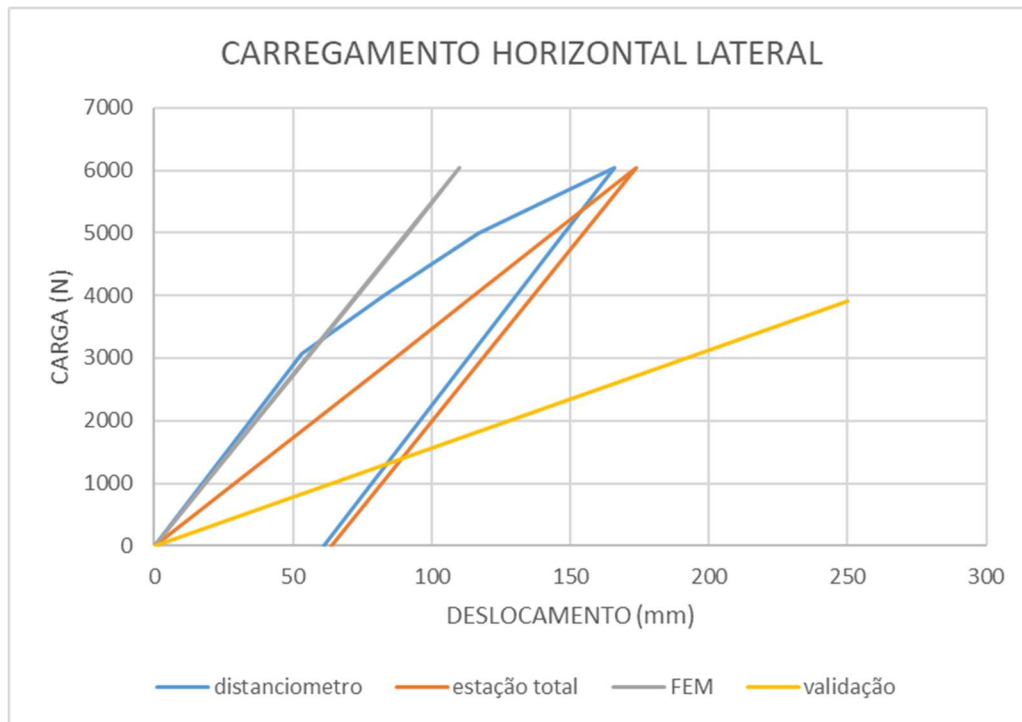


Figura 3.49 – Gráfico comparativo dos deslocamentos do carregamento horizontal lateral.

Tendo como base os deslocamentos obtidos por simulação na configuração ensaio e os deslocamentos observados nesses mesmos ensaios realizados, podemos calcular a proporção entre ambos. Aplicando essa mesma proporção aos deslocamentos obtidos por simulação na configuração trator, podemos estimar qual o deslocamento da estrutura ao ser submetida às cargas definidas quando montada no trator. Verifica-se que os deslocamentos esperados são inferiores aos que foram verificados no ensaio e, portanto, ficam abaixo do limite máximo que corresponde à intrusão na zona de segurança. Os gráficos presentes nas figuras 3.50 e 3.51 ilustram essa estimativa para os ensaios horizontais posterior e lateral, respectivamente.

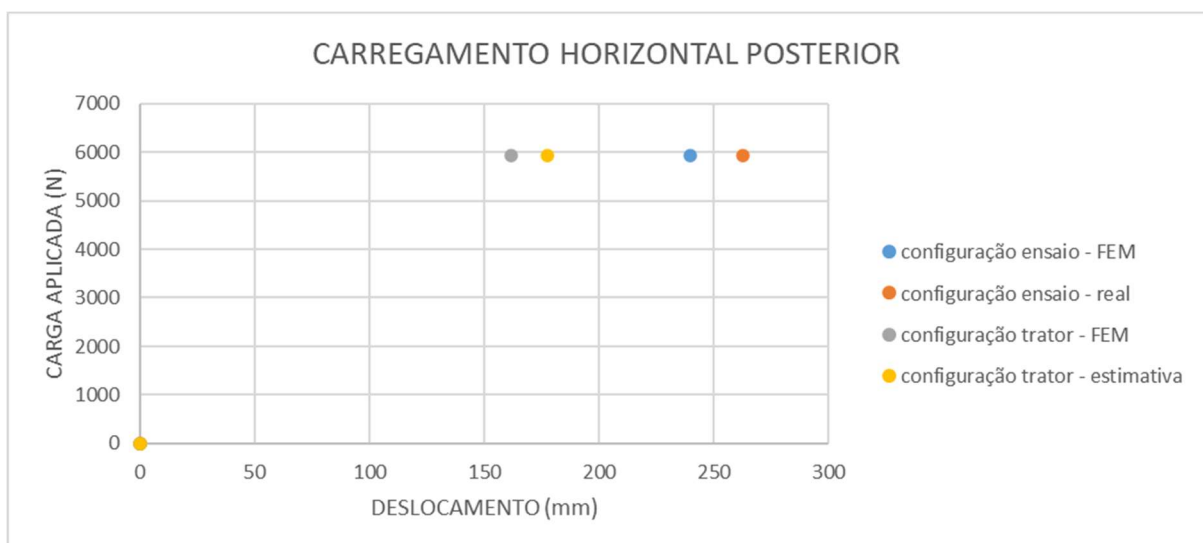


Figura 3.50 – Carregamento horizontal posterior, estimativa de deslocamentos.

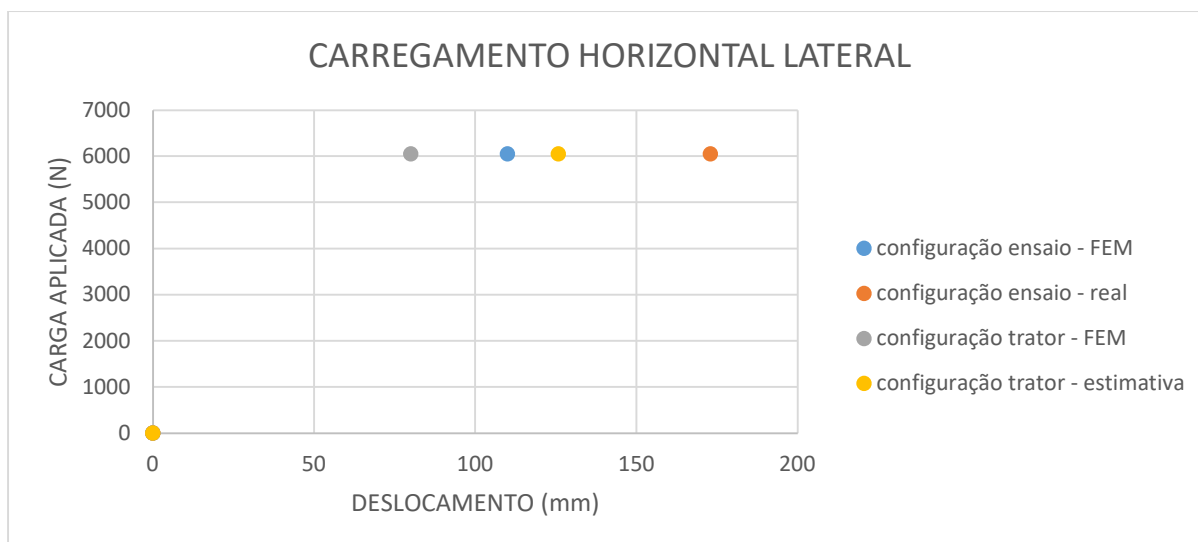


Figura 3.51 – Carregamento horizontal lateral, estimativa de deslocamentos.

Os deslocamentos estimados são de 178 *mm* para o carregamento posterior e 126 *mm* para o carregamento lateral.

3.5.1 Verificação de conformidade dos deslocamentos.

Se aplicarmos cumulativamente os deslocamentos obtidos nos ensaios ao modelo 3D do trator, podemos verificar que não ocorre intrusão da estrutura do ROPS na área livre. Nesta verificação foram considerados, por serem os mais desfavoráveis, os deslocamentos obtidos na realização do ensaio experimental. A figura 3.52 ilustra a posição do arco superior do ROPS ao ser afetada da soma dos deslocamentos máximos dos ensaios.



Figura 3.52 – Simulação dos deslocamentos aplicados ao modelo 3D.

4 CONCLUSÕES

A realização deste projeto permitiu, numa primeira fase, identificar a legislação em vigor em Portugal relativa aos equipamentos de proteção em caso de capotagem. Conclui-se que o trator objeto deste estudo está legalmente dispensado da instalação de um ROPS. Caso estivesse obrigado à sua instalação, teria que cumprir com o regulamento 1322/2014.

Numa segunda fase, foi necessário realizar uma ação de engenharia inversa criando um modelo CAD 3D de um trator existente. Com o modelo CAD 3D rapidamente se concluiu que a geometria do arco instalado não cumpria com a garantia de uma zona livre. Definiu-se em seguida uma nova geometria para a estrutura ROPS de modo que as exigências geométricas relativas à garantia de uma zona de segurança fossem cumpridas.

A terceira fase do projeto foi a realização dos ensaios numéricos com recurso ao software *FreeCAD*. Com a geometria definida na fase anterior, determinaram-se as secções a adotar para os elementos da estrutura com base nos resultados dos ensaios numéricos realizados nesta fase. Tendo como ponto de partida para os ensaios numéricos as secções dos elementos da estrutura existente no trator, verificou-se que a mesma não seria capaz de resistir às cargas exigidas pelo regulamento 1322/2014. As secções dos elementos da estrutura foram alteradas de forma que os resultados dos ensaios numéricos fossem considerados satisfatórios, sempre tendo em consideração que o modelo realizado considera um comportamento linear do material. Assim é necessário ser conservador na análise dos resultados obtidos, já que os deslocamentos esperados durante um ensaio físico serão certamente superiores aos obtidos com um modelo de elementos finitos linear.

A quarta e última fase do projeto foi a realização dos ensaios físicos. Os ensaios realizados nesta fase, apesar das limitações existentes no que diz respeito aos meios disponíveis, permitiram validar o bom comportamento da estrutura, que foi projetada com recurso aos modelos numéricos, ao ser submetida a cargas semelhantes às impostas pelo regulamento 1322/2014. Esta fase permitiu concluir que, dos resultados obtidos com o modelo de elementos finitos, se pode concluir que a estrutura concebida oferece uma confiança aceitável no seu comportamento em caso de capotagem. Uma vez que este trator está legalmente dispensado da utilização de um ROPS, evitar a realização de ensaios de carga sobre um trator com o elevado custo desses ensaios, pode tornar a adaptação de um ROPS mais apelativa para o proprietário. No caso em estudo, verifica-se que a entrada em regime plástico se faz aproximadamente a metade da carga a atingir. Verificou-se que os deslocamentos reais ao submeter a estrutura à carga máxima são inferiores ao dobro do valor calculado pelo modelo de elementos finitos no modo linear.

A sobreposição dos deslocamentos obtidos nos ensaios físicos ao modelo CAD 3D permitem concluir, com elevado grau de confiança, que, ao submeter um trator equipado com o ROPS concebido, a um ensaio conforme ao regulamento

1322/2014 não é expectável que ocorra intrusão da estrutura na zona livre e é expectável que a energia absorvida seja superior à requerida, cumprindo assim os dois principais requisitos do regulamento 1322/2014.

Pode concluir-se que a utilização de modelos de elementos finitos, com recurso a um software aberto como o *FreeCAD*, pode ser uma ferramenta de maior importância no aumento da segurança de equipamentos, quando a contenção de custos é um fator primordial para a decisão de proceder à sua adaptação.

TRABALHOS FUTUROS

Estando neste momento em desenvolvimento as ferramentas para elaboração de modelos não lineares no software *FreeCAD*, pretende-se dar continuidade ao estudo do ROPS com a aplicação dessas ferramentas.

Pretende-se realizar novos modelos, tanto para o regime elástico como para o regime plástico, com recurso a um software comercial (Solidworks, Catia ou outro) para análise comparativa.

BIBLIOGRAFIA

- Chennuri, V., Kothagadi, H., & Mohammad, R. (2015). Design and stress analysis of four-post rollover protective structure of agricultural-wheeled tractor. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*.
- Franceschetti, B., Rondelli, V., & Ciuffoli, A. (2019). Comparing the influence of Roll-Over Protective Structure type on tractor lateral stability. *Safety Science*, pp. 42-50.
- Groves, W., & Reynolds, S. J. (01 de 05 de 2000). Effectiveness of Roll-Over Protective Structures in Reducing Farm Tractor Fatalities.
- Hard, D. L., McKenzie Jr, E. A., Cantis, D., May, J., Sorensen, J., Bayes, B., . . . Maass, J. (2015). A Demonstration Project in New York and Virginia: Retrofitting Cost-Effective Roll-Over Protective Structures (CROPS) on Tractors. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 173-185.
- Harris, J. R. (2008). Predicting the performance of assembled rollover protective structure designs for tractors. Graduate theses, Dissertations, and problem reports.
- HSE. (s.d.). Health and Safety Executive. Obtido de <https://www.hse.gov.uk/agriculture/>

- Lim, R.-G., Kim, W.-S., Do, Y.-W., Siddique, M. A., & Kim, Y.-J. (2004). Performance Evaluation of a Virtual Test Model of the Frame-Type ROPS for Agricultural Tractors Using FEA. *Agriculture* 2023.
- Monarca, D., Cecchini, M., Colantoni, A., Di Giacinto, S., Memghini, G., & Longo, L. (2013). Study on the possibility of application of a compact roll over protective structure for agricultural wheeled narrow track tractor. *Journal of agricultural Engineering*.
- NIOSH. (s.d.). CENTER FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION. Obtido de https://archive.cdc.gov/www_cdc_gov/niosh/topics/aginjury/crops/default.html
- OCDE. (s.d.). Obtido de OCDE: <https://www.oecd.org/>
- Reynolds, S. J., & Groves, W. (2000). Effectiveness of roll-over protective structures in reducing farm tractor fatalities.
- Rondelli, V., Capacci, E., Franceschetti, B., & Guarnieri, A. (2022). ROPS Design Evolution with Respect to the Requirements of the Strength Test Procedures.
- Simonnet, E. (outubro de 2009). Réglementation des tracteurs agricoles ou forestiers.
- Tonelli, S. M., Donham, K. J., Leedom-Larson, K., Sanderson, W., & Purschwitz, M. (2009). Retrofitting Tractors Rollover Protective Structures; Perspective of Equipment Dealers. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 365-375.
- Vita, L., Gattamelata, D., & Pessina, D. (2021). Retrofitting Agricultural Self-Propelled Machines with Roll-Over Protective Structures.



**Instituto Superior
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra