



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Luis Miguel Oliveira Serra

**Modelação numérica do comportamento
de barreiras de segurança rodoviária a
ensaios de impacto de acordo com a
norma EN 1317**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Luís Miguel Oliveira Serra

**Modelação numérica do comportamento
de barreiras de segurança rodoviária a ensaios
de impacto de acordo com a norma EN 1317**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor Nuno Miguel Magalhães Dourado

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações

CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

AGRADECIMENTOS

A conclusão da presente dissertação compreende o término de um ciclo, ciclo esse de elevada exigência e comprometimento, distribuídos ao longo dos últimos cinco anos. Não conseguiria finalizar esta etapa se não fosse o apoio constante da minha família e amigos, sendo principalmente a eles que me dirijo.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, professor doutor Nuno Miguel Magalhães Dourado, por me ter permitido desenvolver este projeto sob a sua alçada. Foi um privilégio poder trabalhar diariamente consigo, quer pelo máximo conhecimento dispendido na mínima ação, quer pela constante disponibilidade em me dirigir e auxiliar nas várias tarefas relacionadas com a dissertação.

À minha família, nomeadamente os meus pais e a minha irmã, pelo constante apoio e crença depositada em mim, ao longo dos anos, especialmente nos últimos meses. Espero, de alguma forma, poder retribuir todo esse esforço. Obrigado.

Aos meus companheiros de curso, sem vocês, a conclusão desta etapa não teria tido o mesmo significado. Foi bom poder partilhar não só os bons momentos, mas também as dificuldades associadas aos momentos menos bons, os quais superamos com sucesso.

Aos meus amigos, obrigado por todo o apoio, incentivo e motivação que sempre emanaram para mim, não esquecendo todos os momentos em que me permitiram abstrair dos problemas inerentes ao curso, ao longo destes últimos cinco anos.

Este trabalho teve o apoio da ANI – Agência Nacional de Inovação, através do projeto com a referência COMPETE-2020/03/SI/2017 N°033497, intitulado “Barreiras de segurança rodoviária”, com acrónimo “BarRod”, através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização e o Programa Operacional Regional de Lisboa, apoiada pelo FEDER.



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

A segurança rodoviária é fortemente dependente não só dos veículos circulantes, mas também dos dispositivos mecânicos existentes nas estradas. Assim, a avaliação do comportamento mecânico dos equipamentos de segurança rodoviária constitui uma tarefa de grande importância, que merece a atenção da Academia. Um exemplo destes equipamentos corresponde às barreiras de segurança rodoviária, dispostas junto às bermas das faixas de rodagem, sendo sua principal função a contenção das mais variadas tipologias de veículos, em caso de despiste. Este conjunto mecânico é categorizado segundo diferentes níveis de contenção que oferece, estando relacionados com diferentes graus de deformabilidade. Estes devem ser capazes não só de reter e redirecionar o veículo para a faixa de rodagem, mas também de assegurar que o evento não seja nem demasiado brusco, nem associado a desacelerações abruptas, de modo a não proporcionar danos corporais aos condutores e acompanhantes. Neste contexto, surge o método dos elementos finitos, que constitui uma ferramenta bastante útil tanto no projeto, como no desenvolvimento e avaliação de novas soluções construtivas, pelo que a sua utilização será fundamental no processo associado ao cumprimento dos níveis de desempenho exigidos pela legislação existente.

Esta dissertação visa desenvolver modelos numéricos capazes de avaliar mecanicamente dois modelos de barreira de segurança rodoviária desenvolvidos para os níveis de contenção N2W2 e N2W3, aquando de um evento relacionado com o impacto de um veículo, definido de acordo com a normalização em vigor no nosso país. Estes eventos encontram-se dependentes de parâmetros relacionados com o tipo de veículo, com a sua velocidade de circulação, o ângulo de incidência da trajetória, entre outros, pelo que os ensaios utilizados na sua homologação deverão respeitar diretrizes estabelecidas pela norma EN 1317. Neste documento, para além da avaliação do comportamento mecânico dos conjuntos referidos, bem como do acordo numérico-experimental para os modelos de prumo analisados, foi ainda desenvolvido um estudo referente à interação destes componentes com vários tipos de solos.

Posto isto, a partir dos modelos desenvolvidos, foram extraídos resultados relativos ao deslocamento máximo obtido na barreira, em resultado do impacto do veículo, sugerindo que nenhum dos modelos projetados (propostos pela empresa Metalgalva S.A.) permite alcançar o nível de contenção proposto, de acordo com as condições de certificação impostas pela norma EN 1317.

PALAVRAS-CHAVE: Análise do impacto; Barreiras de segurança; Método dos elementos finitos; Norma EN 1317

ABSTRACT

Road safety is strongly dependent not only on the vehicles in circulation but also on the mechanical devices present on the roads. Therefore, assessing road safety mechanisms is a relevant task, that deserves Academy attention. An example of these mechanisms corresponds to road safety barriers, included on the sides of the carriageway, where their main function is to contain the most varied types of vehicles. This mechanical assembly is categorised according to different levels of containment related to different degrees of deformability. These must be able not only to retain and redirect the vehicle to the carriageway but also to ensure that this phenomenon is neither too abrupt, nor associated with sudden decelerations, so as not to provide bodily harm to drivers. The finite element method concerns a handy tool in the design, development and evaluation of new constructive solutions, so its use will be fundamental in the process associated with achieving the objectives.

This dissertation aims to develop numerical models capable of mechanically evaluating two sets of road safety barriers, developed for containment levels N2W2 and N2W3, at the time of an impact event defined according to the indicated standardisation used in our country. These events depend on parameters related to the type of vehicle, its speed of movement, its angle of impact, among other things, so the tests used in their approval must comply with these guidelines. In this document, in addition to the mechanical assessment of the road safety barriers and the numerical-experimental agreement for the analysed prop models, a study concerning the interaction of these components with various types of soils was also conducted.

After the development of the numerical models, the results of the maximum displacement obtained in the barrier at the end of the simulated event were extracted and they suggest that none of the models designed (proposed by Metalogalva S.A. company) for the proposed level of containment fully complied with the certification conditions imposed by the standard.

KEYWORDS: Finite element method; Guardrails; Impact analysis, Standard EN 1317

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tabelas.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Guia de Leitura.....	2
2. Estado de Arte e Revisão da Literatura.....	3
2.1 Sistemas de Segurança Rodoviária.....	3
2.1.1 Terminais e Transições.....	4
2.1.2 Amortecedores de Choque.....	6
2.1.3 Muros de Guarda para Veículos.....	7
2.1.4 Barreiras de Segurança.....	8
2.1.5 Tipologias existentes e Funcionamento.....	9
2.2 EN 1317.....	12
2.2.1 EN 1317 Parte 2.....	13
2.3 Método dos Elementos Finitos.....	20
2.3.1 Método Explícito.....	22
2.3.2 <i>Explicit Dynamics</i>	23
2.3.3 Integração Explícita do Tempo.....	24
2.3.4 <i>Mass Scaling</i>	25
2.4 Ensaios de Impacto: Revisão Bibliográfica.....	25
3. Modelação Numérica de uma Barreira de Segurança Rodoviária.....	33
3.1 Geometria dos Elementos Constituintes das Barreiras de Segurança.....	33
3.2 Propriedades dos Materiais Constituintes das Barreiras de Segurança.....	34
3.2.1 <i>Johnson-Cook</i>	34

3.2.2	<i>Multilinear Isotropic Hardening</i>	35
3.3	Avaliação Numérica do Veículo	37
3.3.1	Geometria Utilizada	37
3.3.2	Propriedades dos Materiais.....	40
3.3.3	Interações e Contactos	41
3.3.4	Criação da Malha de Elementos Finitos.....	41
3.3.5	Condições de Fronteira.....	45
3.3.6	Soluções Obtidas.....	47
3.4	Modelo Numérico Global (N2W3).....	50
3.4.1	Geometria Utilizada	50
3.4.2	Simplificações do Modelo	51
3.4.3	Propriedades dos Materiais.....	58
3.4.4	Interações e contactos.....	59
3.4.5	Criação da Malha de Elementos Finitos.....	61
3.4.6	Condições de Fronteira.....	67
3.4.7	Soluções Obtidas.....	69
3.5	Modelo Numérico Global (N2W2).....	74
3.5.1	Geometria Utilizada	75
3.5.2	Criação da Malha de Elementos Finitos.....	76
3.5.3	Soluções Obtidas.....	77
3.6	Interação Solo-Prumo	79
3.6.1	Geometria Utilizada	80
3.6.2	Propriedades dos Materiais.....	82
3.6.3	Interações e Contactos	89
3.6.4	Criação da Malha de Elementos Finitos.....	89
3.6.5	Condições de Fronteira.....	93
3.6.6	Soluções Obtidas.....	94
4.	Caraterização numérico-experimental de componentes e sub-conjuntos das barreiras	101
4.1	<i>Setup</i> experimental	101
4.2	Modelo Numérico.....	103

4.2.1	Modelação Geométrica	103
4.2.2	Propriedades dos Materiais.....	104
4.2.3	Criação da malha de elementos finitos.....	105
4.2.4	Condições de Fronteira	108
4.3	Resultados numérico-experimentais obtidos.....	109
5.	Discussão e Conclusões.....	115
6.	Trabalhos Futuros.....	119
	Referências Bibliográficas	121
	Anexo 1 – Desenho técnico da barreira de segurança N2W3.....	125
	Anexo 2 – Prumo: Modelo N2W3	126
	Anexo 3 – Prumo: Modelo N2W2	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Sistemas de retenção/segurança rodoviários (British Standards Institution, 2010a).	3
Figura 2 - Exemplo de guarda-corpos para peões.	4
Figura 3 - Tipos de terminais utilizados: a) Dobrados e enterrados; b) Configuração de cauda de carpa (Atahan & Erdem, 2016; Parente Lima, 2006).	5
Figura 4 - Tipos de transições utilizadas: a) Transição entre barreiras rígidas e flexíveis; b) Transição entre barreiras flexíveis de diferentes classes de desempenho (Armco Staco, 2011; Keding, 2022).	6
Figura 5 - Tipos de amortecedores de choque utilizados: a) Reencaminhante; b) Não-reencaminhante (Lindsay, 2022).	7
Figura 6 - Muro de guarda para veículos (Parente Lima, 2006).	8
Figura 7 – Barreiras: a) no lado esquerdo, b) no lado direito, e c) em obras de arte (Tata Steel, 2022; Tecvisur, 2022).	9
Figura 8 – Barreira de segurança rígida (Urban Wins, 2020).	10
Figura 9 – Barreira de segurança flexível com 4 cabos (Carportal, n.d.)	10
Figura 10 - Barreira de segurança semi-flexível (Meio Corte, n.d.)(Indiamart, n.d.).	11
Figura 11 - Modelo de barreira de segurança em estudo.	11
Figura 12 – Deformabilidade dos sistemas de retenção (British Standards Institution, 2010b).	16
Figura 13 - Intrusão do Veículo (British Standards Institution, 2010b).	18
Figura 14 - Considerações relativas à <i>Exit Box</i> (British Standards Institution, 2010b).	19
Figura 15 - Malha de Elementos Finitos e respetiva deformação após aplicação dos esforços exteriores (F. M. Azevedo, 2003).	21
Figura 16 - Solução em função da velocidade e taxa de deformação (ANSYS, 2020).	21
Figura 17 - Esquema do procedimento adotado pelo <i>Explicit Dynamics</i> , até a solução final ser atingida (ANSYS, 2020).	23
Figura 18 - Detalhe da deformada de um modelo de barreira com viga “W” induzido por um modelo de veículo (Shen et al., 2008).	26
Figura 19 - Simulação numérica com veículo modelado à escala real (Wilde et al., 2020).	26
Figura 20 - Modelo geométrico da viatura para ensaio TB 32 modelada por (Leikkonen, 2019).	27
Figura 21 - Modelo numérico com eliminação das ligações (Ren & Vesenjak, 2005).	28
Figura 22 – Pormenor que ilustra a forma de ligação com elementos de viga adotado por (Nycz & Grodek, 2016).	28

Figura 23 - Pormenor que ilustra a forma de ligação com elementos de mola adotado por (Qian et al., 2016).....	29
Figura 24 - Modelo geométrico simplificado de componentes de barreiras: a) Componente de ligação viga-prumo, e b) Viga “W” (Shen et al., 2008).....	29
Figura 25 - Estudos realizados no âmbito da interação solo-prumo (Klasztorny et al., 2019; Sassi, 2011).	30
Figura 26 - Modelo de barreira em estudo (N2W3).	33
Figura 27 - Geometria inicialmente utilizada para a representação do veículo.	37
Figura 28 - Dimensões do veículo.	38
Figura 29 - Modelo geométrico de casca.	39
Figura 30 - Modelo geométrico global do método.	39
Figura 31 - Propriedades dos materiais utilizados no modelo do Veículo: a) <i>Aluminum Alloy NL</i> ; b) <i>Rubber</i>	40
Figura 32 - Representação dos contactos utilizados: a) <i>Bonded contact</i> ; b) <i>Frictional contact</i>	41
Figura 33 - Malha de elementos finitos aplicada ao modelo do veículo.	42
Figura 34 – Modelo do veículo: a) <i>Element Quality</i> ; b) <i>Orthogonal Quality</i> ; c) <i>Skewness</i>	43
Figura 35 - <i>Charatheristic length</i> do Modelo do Veículo.....	44
Figura 36 - <i>Fixed supports</i> : a) Parede; b) Solo.	45
Figura 37 - <i>Standard Earth Gravity</i> definida para o modelo do veículo.	46
Figura 38 - Ilustração do deslocamento imposto no modelo do veículo.	46
Figura 39 - Ilustração da prescrição da velocidade no modelo do veículo.	47
Figura 40 - Evolução gráfica da velocidade do veículo.....	48
Figura 41 – Campo de deslocamentos gerado no veículo (eixo <i>xx</i>).....	48
Figura 42 - Comparação qualitativa de resultados (Proteste, 2021).	49
Figura 43 - Modelo da geometria final utilizada.....	51
Figura 44 - Processamento realizado: a) Geometria inicial sólida; b) Geometria final casca.	52
Figura 45 - Processamento realizado: a) Geometria inicial com filetes e furos; b) Geometria final simplificada.....	53
Figura 46 - Processamento realizado: a) Geometria inicial com filetes; b) Geometria final simplificada.	54
Figura 47 - Processamento realizado: a) Geometria inicial com furos centrais; b) Geometria final simplificada.....	54

Figura 48 - Processamento realizado: a) Geometria inicial com filetes; b) Geometria final simplificada.	54
Figura 49 - Processamento realizado: a) Geometria inicial com furos na extremidade; b) Geometria final simplificada.	55
Figura 50 – Modelação geométrica dos parafusos utilizados para a ligação da suspensão em "C" com o prumo.	55
Figura 51 - Ligações aparafusadas promovidas por <i>springs</i>	56
Figura 52 - Representação dos <i>remote points</i> , nas arestas dos furos (a vermelho).	57
Figura 53 - Interpenetração existente entre o carro e a viga.	58
Figura 54 - Representação dos contactos utilizados: a) <i>Bonded contact</i> ; b) <i>Frictional contact</i>	60
Figura 55 - Detalhes dos contactos estabelecidos manualmente: a) <i>Frictional</i> ; b) <i>Bonded</i>	60
Figura 56 - <i>Offsets</i> : a) <i>Inventor</i> ; b) Após estruturação da malha no <i>Ansys</i>	61
Figura 57 - Malha de elementos finitos aplicada ao modelo global (N2W3).	62
Figura 58 - Refinamento de malha aplicado.	63
Figura 59 - <i>Mesh connection</i> aplicado ao conjunto formado pelos prumos e placas (N2W3).	63
Figura 60 – Modelo global: a) <i>Element Quality</i> ; b) <i>Orthogonal Quality</i> ; c) <i>Skewness</i>	65
Figura 61 - <i>Charatheristic length</i> do modelo global.	66
Figura 62 - Pré-processamento realizado ao conjunto prumo-placa.	67
Figura 63 - <i>Fixed supports</i> : a) Solo; b) Conjunto prumo-chapa.	68
Figura 64 - <i>Displacement</i> atribuído ao veículo.	68
Figura 65 - <i>Velocity</i> atribuída ao veículo.	69
Figura 66 - Instante inicial da simulação numérica realizada.	70
Figura 67 - Instante final da simulação numérica realizada.	70
Figura 68 - Deslocamento máximo sofrido pela barreira de segurança.	71
Figura 69 - Configuração final do prumo número 4.	71
Figura 70 - Visualização da roda frontal esquerda a tocar na barreira.	72
Figura 71 - Distâncias para o critério da <i>exit box</i>	73
Figura 72 - Modelo de barreira em estudo (N2W2).	75
Figura 73 - Malha de elementos finitos aplicada ao modelo global (N2W2).	76
Figura 74 - Refinamento de malha aplicado.	77
Figura 75 - Instante inicial da simulação numérica realizada.	78
Figura 76 - Instante final da simulação numérica realizada.	78

Figura 77 - Deslocamento máximo sofrido pela barreira de segurança.....	79
Figura 78 - Geometria adotada para a representação do solo.....	80
Figura 79 - Modelo geométrico completo.....	81
Figura 80 - Modelo geométrico sem a presença de filetes e furos adicionais.....	81
Figura 81 - Representação gráfica do critério de Mohr-Coulomb (Labuz & Zang, 2012) exibindo o envelope de rotura.....	82
Figura 82 - Critério de rotura de Mohr-Coulomb: (a) Envelope linear no diagrama Mohr; (b) Superfície piramidal no espaço das tensões principais e secção transversal no plano de equipressão.....	85
Figura 83 - Limites de tensão dados pelo critério de rotura de Mohr-Coulomb modificado: (a) Envelope de rotura no diagrama de Mohr; (b) Representação do espaço de tensão principal.....	86
Figura 84 - Propriedades do material utilizado na constituição do "impactor".....	88
Figura 85 - Representação dos contactos <i>bonded</i> utilizados: a) Superfícies do prumo; e b) Superfícies do volume representativo do solo.....	89
Figura 86 - Malha de elementos finitos aplicada ao modelo solo-prumo.....	90
Figura 87 – Conjunto solo-prumo: a) <i>Element Quality</i> ; b) <i>Orthogonal Quality</i> ; c) <i>Skewness</i>	92
Figura 88 - <i>Characteristic length</i> do modelo solo-prumo.....	92
Figura 89 - Ilustração das condições de fronteira utilizadas no modelo solo-prumo: a) <i>Fixed support</i> ; b) <i>Displacement</i>	93
Figura 90 - <i>Velocity</i> atribuída ao objeto de impacto.....	94
Figura 91 - Deslocamento registado em cada tipo de solo analisado.....	94
Figura 92 - Campo de deslocamentos totais, em cada um dos solos analisados: a) Macio; b) Médio; c) Rígido.....	96
Figura 93 - Deslocamento do prumo na direção de solicitação.....	97
Figura 94 – Tensão equivalente de Von-Mises no prumo.....	97
Figura 95 - Campo de deslocamentos (na direção de solicitação) observado no prumo: a) Solo macio; b) Solo médio; c) Solo rígido.....	98
Figura 96 - Campo de tensões observado no prumo: a) Solo macio; b) Solo médio; c) Solo rígido.....	98
Figura 97 - Modelos geométricos analisados: a) N2W3; b) N2W2.....	101
Figura 98 - Detalhe da fixação dos prumos à base do pórtico.....	102
Figura 99 - <i>Setup</i> experimental do modelo de prumo da barreira N2W3.....	102
Figura 100 - <i>Setup</i> experimental do modelo de prumo da barreira N2W2.....	103
Figura 101 - <i>Share topology</i> aplicada em ambas as geometrias: a) N2W3; b) N2W2.....	104

Figura 102 - Malha de elementos finitos aplicada aos modelos de prumos: a) N2W3; b) N2W2.	105
Figura 103 - <i>Element Quality</i> . a) N2W3; b) N2W2.....	106
Figura 104 - <i>Orthogonal Quality</i> . a) N2W3; b) N2W2.	106
Figura 105 - <i>Skewness</i> . a) N2W3; b) N2W2.	107
Figura 106 - <i>Fixed support</i> utilizado na fixação da flange.	108
Figura 107 - <i>Displacement</i> aplicado ao prumo.	109
Figura 108 - Deformada obtida experimentalmente em cada um dos modelos de prumo: a) N2W3 e b) N2W2.	110
Figura 109 - Deformada obtida numericamente em cada um dos modelos de prumo: a) N2W3 e b) N2W2.	110
Figura 110 - Curvas força-deslocamento do modelo de prumo da barreira N2W3.	111
Figura 111 - Curvas força-deslocamento do modelo de prumo da barreira N2W2.	111
Figura 112 - Campo de tensões desenvolvido na base do prumo: a) Zona tracionada; b) Zona comprimida.	113
Figura 113 - Modelo geométrico global, com presença de volumes representativos do solo.....	120

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de ensaios de colisão de veículos (British Standards Institution, 2010b).	13
Tabela 2 - Níveis de contenção e respetivos ensaios (British Standards Institution, 2010b).	14
Tabela 3 - Níveis de severidade de colisão (British Standards Institution, 2010b)	15
Tabela 4 - Níveis de largura útil (British Standards Institution, 2010b).	17
Tabela 5 - Níveis de intrusão do veículo (British Standards Institution, 2010b).	17
Tabela 6 - Distâncias correspondentes à <i>Exit Box</i> (British Standards Institution, 2010b).	19
Tabela 7 - Parâmetros de Johnson-Cook utilizados na definição dos aços S235 e S355.	35
Tabela 8 - Conjunto de valores utilizados na definição do aço S275.	36
Tabela 9 – Propriedades elásticas dos aços.	37
Tabela 10 - Especificações do modelo do veículo (BSI, 2010a).	38
Tabela 11 - Características da malha utilizada no modelo numérico do veículo.	44
Tabela 12 - Resultados numéricos obtidos.	49
Tabela 13 - Conjunto de simplificações geométricas realizadas.	53
Tabela 14 - Materiais Utilizados e respetivos Componentes.	59
Tabela 15 - Características da malha utilizada no modelo numérico.	66
Tabela 16 - Resultados finais obtidos.	73
Tabela 17 - Valores referentes às propriedades de solos coesivos (Klasztorny et al., 2019).	87
Tabela 18 - Módulos volumétricos para carregamento e descarregamento de solos coesivos (Klasztorny et al., 2019).	87
Tabela 19 - Valores referentes à coesão e ângulo de fricção interna dos vários solos (Klasztorny et al., 2019).	88
Tabela 20 - Características da malha utilizada no modelo numérico do conjunto solo-prumo.	92
Tabela 21 - Propriedades do material utilizado na constituição do conjunto do prumo.	105
Tabela 22 - Características da malha utilizada nos modelos numéricos dos prumos.	107
Tabela 23 - Resultados obtidos nos ensaios experimentais de flexão dos prumos da barreira N2W3.	112
Tabela 24 - Resultados obtidos nos ensaios experimentais de flexão dos prumos da barreira N2W2.	112
Tabela 25 - Valores médios das grandezas registadas nos ensaios numérico-experimentais de flexão.	112

Tabela 26 - Propriedades do material utilizado na constituição do conjunto do prumo, após o acordo numérico-experimental. 114

1. INTRODUÇÃO

Quando se aborda o conceito de segurança rodoviária é intuitivo relacioná-la com o conforto assegurado durante o intervalo de tempo em que se pratica a ação decorrente da movimentação do condutor e seus acompanhantes, de um determinado ponto para outro (percurso), em resultado do papel desempenhado pela infraestrutura rodoviária. Durante este percurso são vários os perigos que a que os condutores e passageiros estão expostos, sendo por isso imprescindível assegurar a sua segurança. Desta forma, existem inúmeros dispositivos que visam garantir a segurança rodoviária, desde barreiras rígidas, denominadas por *new jersey*, até barreiras de segurança semi-flexíveis, consistindo estas últimas no principal objeto de avaliação da presente dissertação.

As barreiras de segurança semi-flexíveis podem apresentar diversas características distintas, sejam elas do ponto de vista geométrico, ou dos materiais e componentes presentes no seu conjunto. Contudo, todas elas apresentam o mesmo propósito, i.e., garantir a absorção da energia cinética dos veículos aquando do impacto, de modo a redirecioná-los de forma segura, sem nunca comprometer a segurança dos intervenientes. Neste sentido, esta dissertação visa o desenvolvimento de modelos numéricos capazes de avaliar e validar estes dispositivos de segurança, tendo por base soluções desenvolvidas por uma empresa especializada na área, a Metalgalva S.A.

Nesta dissertação utilizaram-se os softwares *Inventor* e *Ansys*, para modelação geométrica e posterior avaliação do comportamento mecânico das soluções propostas, respetivamente. Procedeu-se à avaliação de dois modelos de barreira de segurança rodoviária propostos pela empresa Metalgalva S.A., tendo em vista alcançar os níveis de desempenho previstos na norma para as categorias N2W3 e N2W2.

1.1 Objetivos

Com esta dissertação, pretendem-se desenvolver modelos numéricos capazes de analisar o comportamento mecânico de dois conjuntos de modelos de barreira de segurança produzidas pela empresa Metalgalva, submetidos a ensaios de impacto, nas condições estabelecidas pela norma EN1317. Os referidos conjuntos dispõem de um painel para proteção de motociclistas, distinguindo-se um do outro pela solução aplicada nos seus prumos, no qual um deles apresenta apenas uma chapa de reforço destinada a aumentar a rigidez e a resistência da ancoragem ao solo, enquanto que o outro possui duas chapas. Para além disso, tenciona-se cumprir um conjunto de sub-etapas auxiliares para a obtenção da simulação numérica global, nomeadamente a avaliação do modelo geométrico utilizado na

representação do veículo, assim como a avaliação da interação do conjunto solo-prumo. Por fim, pretende-se ainda avaliar experimentalmente as soluções utilizadas na produção dos dois conjuntos de prumos, confrontando e validando numericamente os resultados obtidos.

1.2 Guia de Leitura

A estrutura desta dissertação é composta por seis capítulos principais, com o propósito de introduzir o leitor no tema, permitindo-lhe acompanhar progressivamente o processo adotado na realização deste estudo, de modo a facilitar e tornar intuitiva a compreensão do mesmo. Desta forma, o primeiro Capítulo apresenta o tema e a problemática a ele inerente, definindo os objetivos propostos para o trabalho. No segundo Capítulo são introduzidos os conceitos relacionados com a segurança rodoviária, enfatizando-se os modelos de barreira avaliados ao longo da presente dissertação, correspondentes às barreiras de segurança rodoviária propostos pela empresa Metalgalva S.A. Para além disso, expõem-se conteúdos pertinentes no que concerne à normalização utilizada para validar as soluções finais obtidas. Posteriormente, apresentam-se os conceitos relacionados com o método dos elementos finitos, assim como alguns estudos desenvolvidos na área de intervenção do tema, dos quais se retiraram algumas considerações para a elaboração dos modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho. Relativamente ao terceiro Capítulo, este é coincidente com o desenvolvimento dos modelos numéricos propostos, explorando de forma detalhada a totalidade das etapas seguidas até à obtenção dos resultados finais. São apresentados os modelos utilizados na simulação dos modelos de barreira para cumprimento dos níveis de desempenho N2W3 e N2W2, assim como os utilizados nos modelos responsáveis pela validação do veículo e pela avaliação da interação solo-prumo. No quarto Capítulo identificam-se os resultados numérico-experimentais obtidos no processo de caracterização mecânica de dois modelos geométricos diferentes para a constituição de componentes e sub-conjuntos de barreiras, descrevendo de forma pormenorizada o percurso que culminou com as soluções explanadas. Em relação ao quinto Capítulo, apresentam-se e discutem-se as conclusões retiradas ao longo do documento, expondo ainda as considerações finais acerca de cada um dos assuntos. Por fim, o sexto Capítulo evidencia as perspetivas futuras em relação ao tema desenvolvido, nomeadamente em relação a acrescentos introduzidos de forma a melhorar as respostas dos modelos numéricos desenvolvidos.

2. ESTADO DE ARTE E REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo tem como finalidade realizar a exposição dos conceitos teóricos inerentes ao tema desta dissertação. Assim sendo, apresentar-se-ão várias das soluções construtivas utilizadas na modelação de sistemas de segurança rodoviária, com principal foco nas barreiras de segurança. Abordar-se-á, igualmente, a normalização empregue para a certificação dos modelos de barreiras de segurança utilizados. Posteriormente, e com base nas informações presentes no manual do *software* de simulação numérica (*Ansys*), explicar-se-ão os fundamentos relacionados com o módulo explícito do mesmo, assim como algumas considerações aplicáveis às análises efetuadas no âmbito deste estudo, que permitem assegurar o funcionamento adequado dos modelos desenvolvidos. Por fim, será exposto um conjunto de trabalhos desenvolvidos no âmbito da simulação numérica de barreiras de segurança, onde alguns dos pressupostos considerados serão utilizados no presente caso de estudo.

2.1 Sistemas de Segurança Rodoviária

Os sistemas de segurança rodoviária são desenvolvidos com o objetivo de assegurarem a proteção dos condutores e demais ocupantes dos veículos que circulam nas estradas, bem como nas suas proximidades. Desta forma, tendo por base a norma EN 1317-1, a sua classificação pode ser realizada de acordo com o tipo de elemento a proteger, devendo por esse motivo focar-se nos sistemas de retenção de veículos e sistemas de retenção de peões (Fig. 1) (British Standards Institution, 2010a).

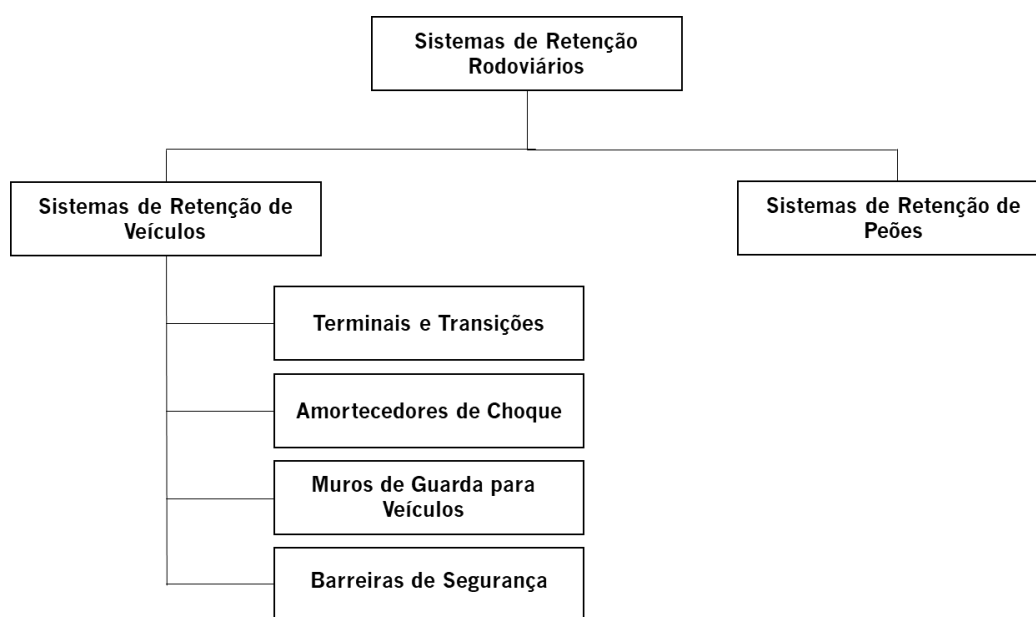


Figura 1- Sistemas de retenção/segurança rodoviários (British Standards Institution, 2010a).

Relativamente aos sistemas de retenção de veículos, estes correspondem essencialmente às barreiras de segurança rodoviária e respetivos terminais e transições a estas associados, aos amortecedores de cargas de impacto (choque) e aos muros de guarda para veículos. Por sua vez, no que concerne aos sistemas de retenção para peões, estes dizem respeito aos muros de guarda e aos guarda-corpos para peões (Fig. 2). Nos seguintes subcapítulos, realizar-se-á a devida descrição dos sistemas de retenção para veículos, dando-se particular atenção às barreiras de segurança, sendo estas o objeto de estudo da presente dissertação.

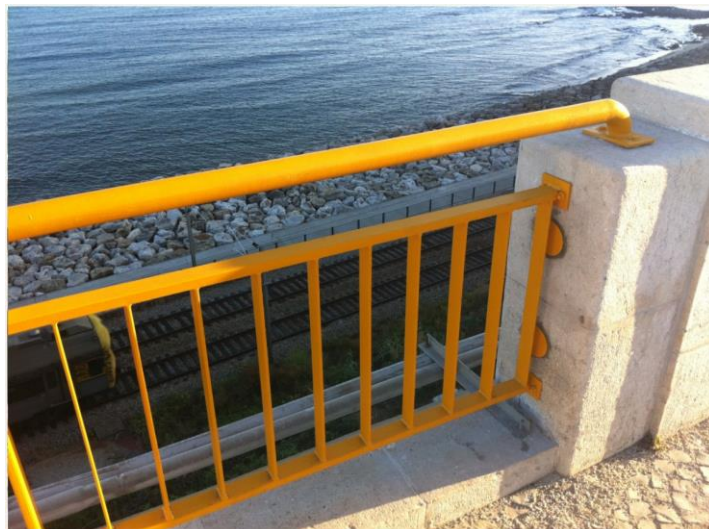


Figura 2 - Exemplo de guarda-corpos para peões.

2.1.1 Terminais e Transições

Os terminais correspondem ao tratamento oferecido às extremidades das barreiras de segurança, no sentido de suavizar a transição promovida entre as zonas com ausência e existência de sistemas de retenção, ou seja, entre as zonas com e sem barreiras de segurança rodoviária. Este procedimento visa a maximização da segurança destes dispositivos em caso de colisão do veículo nessas zonas, sendo atualmente utilizados para o efeito, terminais onde as extremidades das barreiras se encontram viradas para o solo, dobradas e enterradas no solo (Fig. 3a), ou então do tipo cauda de carpa (Fig. 3b) (LNEC, 2010). Apesar dos primeiros sistemas corresponderem à solução que as autoridades rodoviárias do nosso país recomendam, já se pôde verificar que, em diversos casos, e em particular com veículos de menor dimensão, estes terminais (enterrados) funcionam como rampa de lançamento aquando da colisão, provocando o capotamento do veículo (Coon & Reid, 2006). Apesar disso, os danos provocados nos ocupantes dos veículos em resultado do impacto com os sistemas de tipologia cauda de carpa são significativamente maiores (e.g., decapitação de ocupantes).



a)



b)

Figura 3 - Tipos de terminais utilizados: a) Dobrados e enterrados; b) Configuração de cauda de carpa (Atahan & Erdem, 2016; Parente Lima, 2006).

Posto isto, tendo em consideração o facto de que todas as colisões apresentam características próprias e interdiferenciadas, é necessário que os terminais sejam concebidos para colisões laterais e frontais, podendo o seu funcionamento:

- Reduzir a velocidade de um veículo descontrolado;
- Permitir uma penetração controlada do veículo para lá da barreira de segurança;
- Reter e redirecionar o veículo;
- Combinar as três funções anteriormente enunciadas.

Relativamente às transições, estas correspondem às soluções construtivas empregues na união de duas barreiras de segurança consecutivas, com conceções e desempenhos distintos (rigidez e capacidade de amortecimento), cujo principal objetivo passa por evitar alterações bruscas no

desempenho das mesmas, no caso do embate de um veículo na área compreendida entre esses dois sistemas de retenção (Fig. 4)(LNEC, 2010; Parente Lima, 2006).



a)



b)

Figura 4 - Tipos de transições utilizadas: a) Transição entre barreiras rígidas e flexíveis; b) Transição entre barreiras flexíveis de diferentes classes de desempenho (Armco Staco, 2011; Keding, 2022).

2.1.2 Amortecedores de Choque

Os amortecedores de choque são dispositivos destinados à imobilização de um veículo descontrolado, com uma *desaceleração* aceitável para os seus ocupantes, evitando a colisão com um determinado obstáculo. Estes componentes são desenvolvidos para resistirem a impactos com a zona terminal de uma estrutura rígida, assim como com as suas zonas laterais, visando reduzir gravidade dos mesmos (Parente Lima, 2006)(LNEC, 2010). Assim, quanto à sua funcionalidade, os amortecedores podem ser classificados de duas formas:

- Reencaminhantes (R): retêm e reencaminham veículos (Fig. 5a), sendo destinados a resistirem a colisões frontais e laterais, pelo que podem atuar segundo o princípio de uma barreira de segurança rodoviária em pequenos trechos;
- Não-reencaminhantes (NR): retêm mas não reencaminham os veículos (Fig. 5b), não sendo por isso concebidos para serem alvo de colisões laterais.



a)



b)

Figura 5 - Tipos de amortecedores de choque utilizados: a) Reencaminhante; b) Não-reencaminhante (Lindsay, 2022).

2.1.3 Muros de Guarda para Veículos

Os muros de guarda para veículos têm como principal objetivo evitar uma possível queda vertical do veículo, permitindo a proteção não só dos peões, mas também de outros utilizadores das estradas (Fig. 6). Estes dispositivos são instalados na extremidade de uma ponte, de um viaduto, de um muro de suporte ou então de uma zona onde essa queda se possa verificar (Parente Lima, 2006).



Figura 6 - Muro de guarda para veiculos (Parente Lima, 2006).

2.1.4 Barreiras de Segurança

As barreiras de segurança correspondem aos dispositivos instalados ao longo da área adjacente à faixa de rodagem (AAFR), ou do separador central da estrada, com o propósito de conter e redirecionar veículos que impactem com os mesmos (LNEC, 2010). Estes componentes são concebidos unicamente para embates laterais, sendo que de acordo com a sua localização, podem ser designados da seguinte forma:

- Barreiras no lado esquerdo, desenvolvidas para embates laterais em ambos os lados, sendo instaladas entre faixas de rodagem de sentidos opostos (Fig. 7a).
- Barreiras no lado direito, sendo que são concebidas para embates laterais apenas num dos lados, sendo instaladas para lá do limite exterior da berma (Fig. 7b).
- Barreiras de segurança em obras de arte, sendo concebidas de modo a serem instaladas nos tabuleiros de obras de arte (Fig. 7c).



a)



b)



c)

Figura 7 – Barreiras: a) no lado esquerdo, b) no lado direito, e c) em obras de arte (Tata Steel, 2022; Tecvisur, 2022).

Assim sendo, levando em consideração o facto de que o tema da presente dissertação reside no estudo de um tipo de barreiras de segurança que se pretende comercializar, realizar-se-á uma abordagem mais pormenorizada a estes dispositivos.

2.1.5 Tipologias existentes e Funcionamento

As barreiras de segurança atualmente utilizadas nas estradas podem ser classificadas de acordo com 3 categorias distintas: rígidas (Fig. 8), flexíveis (Fig. 9) e semi-flexíveis (Fig. 10).

As barreiras rígidas foram desenvolvidas com o objetivo de minimizar o número de invasões da faixa contrária por camiões, e também para reduzir o custo e o perigo que representava a manutenção das guardas semi-flexíveis, anteriormente empregues, nomeadamente em zonas acidentadas (Martins Rodrigues, 2019). Este tipo de barreiras difere entre si devido à morfologia apresentada, existindo vários tipos comercializados. Assim sendo, estas podem apresentar configurações distintas, encontrando-se ilustradas nas figuras seguintes.



Figura 8 – Barreira de segurança rígida (Urban Wins, 2020).

Uma das vantagens destas barreiras, relativamente às restantes tipologias existentes, reside no facto das barreiras rígidas poderem ser fabricadas no próprio local, com recurso a um molde e a um camião capaz de aplicar o betão, promovendo a construção de barreiras contínuas, e sem emendas, para além de um custo inferior aos dos restantes sistemas.

Por outro lado, as barreiras flexíveis (Fig. 9) são constituídas geralmente por um conjunto formado por três cabos de aço, conectados a postes metálicos de baixa resistência estrutural, encastrados no solo, através de bate-estacas. Para além do sistema descrito anteriormente, estes dispositivos podem ainda ser constituídos por 4 cabos de aço, ou então pela união de perfis em dupla ou tripla onda (em “W”), apoiados em postes de baixa resistência, apresentando assim uma capacidade crescente em termos de contenção dos veículos e de resistência estrutural (Martins Rodrigues, 2019). De realçar o facto de que, para além dos elementos constituintes, assim como da sua capacidade estrutural, estes tipos de barreiras flexíveis diferem uns dos outros pelo posicionamento dos elementos de contenção em relação ao solo, variando a sua altura.



Figura 9 – Barreira de segurança flexível com 4 cabos (Carportal, n.d.)

Por fim, as barreiras semi-flexíveis (Fig. 10), nas quais se enquadram as avaliadas na presente dissertação, que correspondem à tipologia de sistema de retenção mais utilizado atualmente em Portugal (Parente Lima, 2006). Este conjunto é formado genericamente por uma viga em “W” (ou dupla onda), acoplada a um poste metálico (prumo) com recurso a um amortecedor fabricado no mesmo material, ou então em madeira ou num material polimérico. De referir que existem ainda algumas alternativas relativamente à viga metálica de contenção, podendo esta ser formada por uma tripla onda ou então por um perfil metálico duplo especial de tipologia “BHO”.



Figura 10 - Barreira de segurança semi-flexível (Meio Corte, n.d.)(Indiamart, n.d.).

Relativamente às barreiras de segurança analisadas, estas diferem da típica barreira semi-flexível, na medida em que não apresentam um amortecedor no conjunto, pelo que a sua presença é inexistente (Fig. 11).

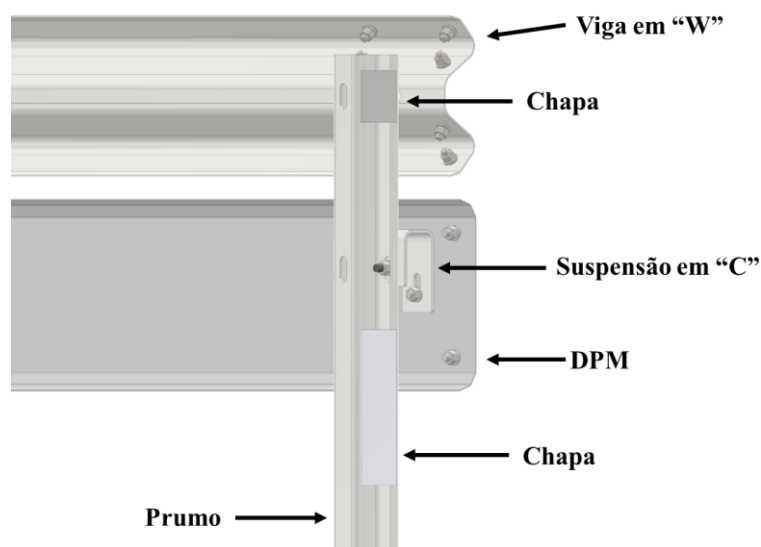


Figura 11 - Modelo de barreira de segurança em estudo.

Assim, o funcionamento da barreira de segurança caracteriza-se pela absorção de energia resultante da deformação elasto-plástica dos prumos, bem como das vigas entre estes. A rigidez dos prumos e vigas é determinante no desempenho da barreira, devendo apresentar um valor suficientemente elevado para conseguir reter o veículo. Neste conjunto desenvolvido, a rigidez dos prumos foi incrementada com a adição de chapas de reforço, assim como pela rotação do componente de modo a que seja solicitado segundo o seu eixo de maior momento de inércia. Contudo, de realçar que esse valor não deverá ser exageradamente alto, uma vez que o objetivo é *desacelerar* o veículo de forma controlada e não abrupta, o que se traduziria em lesões graves para os ocupantes dos veículos (Martins Rodrigues, 2019).

2.2 EN 1317

A validação do comportamento das barreiras de segurança rodoviárias ao impacto provocado por veículos desgovernados é baseada nos procedimentos constantes dos documentos normativos existentes para o efeito. Desta forma, a utilização da norma europeia EN 1317 tem como propósito a garantia da existência de um sistema comum de teste e informação destes tipos de sistemas de retenção, fornecendo ainda informação relevante e clara acerca das suas características de funcionamento, permitindo assim a instalação de componentes devidamente comprovados (LNEC, 2010).

A atual norma europeia EN 1317 contempla 7 partes distintas, das quais apenas as duas primeiras são relevantes para a avaliação do sistema em estudo, designadamente:

- Parte 1: Terminologia e critérios gerais dos métodos de ensaio;
- Parte 2: Classes de desempenho, critérios de aceitação do ensaio de choque e métodos de ensaio para barreiras de segurança.

Relativamente à primeira parte da norma, esta tipifica essencialmente as condições segundo as quais os ensaios se deverão processar, assim como os requisitos a cumprir, nomeadamente as condições do solo (caraterísticas, presença de poeiras, presença de água, entre outras), à instalação das barreiras e ao veículo utilizado (tipologia de veículo, massa, dimensões e localização do centro de massa), assim como a instrumentação a utilizar no ensaio, da qual resultarão os dados necessários para o procedimento de cálculo dos índices de severidade obtidos (abordados posteriormente), tais como: *ASI* (*Acceleration Severity Index*), *THIV* (*Theoretical Head Impact Velocity*) e *VCDI* (*Vehicle Cockpit Deformation Index*) (British Standards Institution, 2010a). Posto isto, e levando em consideração o facto de que o principal foco do tema da presente dissertação se resume à avaliação das barreiras de

segurança rodoviárias, e não aos veículos, a segunda parte da norma EN 1317 será alvo de uma análise mais aprofundada e detalhada, comparativamente à anteriormente exposta.

2.2.1 EN 1317 Parte 2

Contrariamente à primeira parte da normalização em estudo, a segunda aborda a avaliação das barreiras de segurança, expondo não só as classes de desempenho existentes, mas também os critérios de aceitação dos ensaios. Assim, relativamente às classes de desempenho, estas são função de um conjunto de variáveis, nomeadamente, as classes de ensaio de colisão de veículos, o nível de contenção a alcançar, a severidade da colisão e a deformação da barreira (British Standards Institution, 2010b).

Deste modo, a norma define 11 classes de desempenho de veículos, sendo estas dependentes da velocidade e do ângulo de colisão da viatura com a barreira, segundo o qual se processou o ensaio, do tipo de veículo utilizado e da sua massa. A Tabela 1 exhibe as classes de ensaios existentes, com as características que os distinguem, designadamente a velocidade de impacto, o ângulo de colisão e massa do veículo, a tipologia e energia cinética no instante em que ocorre o impacto com a barreira. Os ensaios assinalados a cor distinta identificam as condições que foram simuladas nesta dissertação.

Tabela 1 - Classes de ensaios de colisão de veículos (British Standards Institution, 2010b).

Ensaio	Velocidade de colisão [km/h]	Ângulo de colisão [°]	Massa total do veículo [kg]	Tipo de veículo	Energia cinética [kJ]
TB 11	100	20	900	Ligeiro	347
TB 21	80	8	1 300	Ligeiro	321
TB 22	80	15	1 300	Ligeiro	321
TB 31	80	20	1 500	Ligeiro	370
TB 32	110	20	1 500	Ligeiro	700
TB 41	70	8	10 000	Pesado Rígido	1 890
TB 42	70	15	10 000	Pesado Rígido	1 890
TB 51	70	20	13 000	Autocarro	2 458
TB 61	80	20	16 000	Pesado Rígido	3 951
TB 71	65	20	30 000	Pesado Rígido	4 890
TB 81	65	20	38 000	Pesado Articulado	6 194

Seguidamente, no que diz respeito aos diferentes níveis de contenção relativamente ao impacto de veículos, a norma define um total de 4, encontrando-se estes relacionados com os ensaios anteriormente assinalados (Tabela 1). Assim, pode constatar-se que cada nível de contenção apresenta um ou mais tipos de ensaios associados (Tabela 2).

Tabela 2 - Níveis de contenção e respetivos ensaios (British Standards Institution, 2010b).

Nível de contenção		Ensaio
Baixo	T1	TB21
	T2	TB22
	T3	TB 41 e TB21
Normal	N1	TB 31
	N2	TB 32 e TB11
Alto	H1	TB 42 e TB11
	H2	TB 51 e TB11
	H3	TB 61 e TB11
Muito Alto	H4a	TB 71 e TB11
	H4b	TB 81 e TB11

De salientar que se realçaram, na tabela 2, os ensaios a respeitar para o nível de contenção exigido nas barreiras de segurança que se analisou nesta dissertação (i.e., o N2).

Analisando a Tabela 2, deve destacar-se a associação existente entre os níveis de contenção estabelecidos e os respetivos ensaios a respeitar/realizar. Posto isto, a definição de um nível de contenção pressupõe a verificação de dois critérios, sendo estes: (a) a capacidade de retenção do veículo (ensaios de colisão com o maior valor de energia cinética) e (b) a variação da energia de forma a respeitar a segurança dos ocupantes (valores de *desaceleração* moderados). De modo a exemplificar esta necessidade, observando um alto nível de contenção, como é o caso do H1, é perceptível que um determinado sistema de retenção inserido nesta classe deverá ser capaz de satisfazer as contenções fortes características dos veículos pesados utilizados nos ensaios de classe TB 42 (com 10 000 kg de massa), evitando ainda que as *desacelerações* que os ocupantes dos ligeiros possam vir a sofrer, lhes causem lesões irreversíveis (Martins Rodrigues, 2019). Torna-se, portanto, um cumprimento simultâneo de parâmetros que não só sejam capazes de conter os referidos veículos, mas também de cumprir com os níveis de segurança dos ocupantes.

A severidade da colisão, classificada em 3 níveis distintos (Tabela 3), corresponde à avaliação quantitativa da gravidade do embate que poderá vir a causar risco de lesão aos ocupantes, sendo estes parâmetros estimados com base nas acelerações sentidas no centro de massa dos veículos. Por conseguinte, a severidade de colisão é fornecida com base nos seguintes índices:

- *ASI (Acceleration Severity Index)*: quantifica as acelerações sentidas pelos passageiros no momento do impacto do veículo com os sistemas de retenção, estabelecendo ainda uma relação com o tempo de duração do evento,

$$ASI(t) = \left[(\bar{a}_x/\hat{a}_x)^2 + (\bar{a}_y/\hat{a}_y)^2 + (\bar{a}_z/\hat{a}_z)^2 \right]^{0.5} \quad (2.1)$$

onde \bar{a}_x, \bar{a}_y e \bar{a}_z , correspondem a componentes associados à aceleração do veículo, enquanto que \hat{a}_x, \hat{a}_y e \hat{a}_z , correspondem aos valores limite das acelerações verificadas nessas três direções.

- *THIV (Theoretical Head Impact Velocity)*: permite avaliar o risco de lesão para um ocupante sem cinto de segurança dentro do veículo, pretendendo recriar os movimentos da sua cabeça,

$$THIV = [\dot{x}_b^2(t) + \dot{y}_b^2(t)]^{0.5} \quad (2.2)$$

onde $x_b(t) = D_x + x_0$ e $y_b(t) = D_y$.

- *VCDI (Vehicle Cockpit Deformation Index)*: corresponde a um método capaz de avaliar as deformações verificadas na cabina para o interior do veículo, em direção aos seus ocupantes.

Tabela 3 - Níveis de severidade de colisão (British Standards Institution, 2010b)

Nível de severidade da colisão	Valores dos índices	
A	ASI ≤ 1,0	THIV ≤ 33 km/h
B	ASI ≤ 1,4	
C	ASI ≤ 1,9	

Por fim, relativamente à deformabilidade dos sistemas de retenção, esta é caracterizada por intermédio da deflexão dinâmica (D_m), largura útil (W_m) e intrusão do veículo no próprio sistema

(Vl_m) (Fig. 12). O objetivo destas medidas é o de identificar o espaço lateral necessário para que o sistema funcione adequadamente.

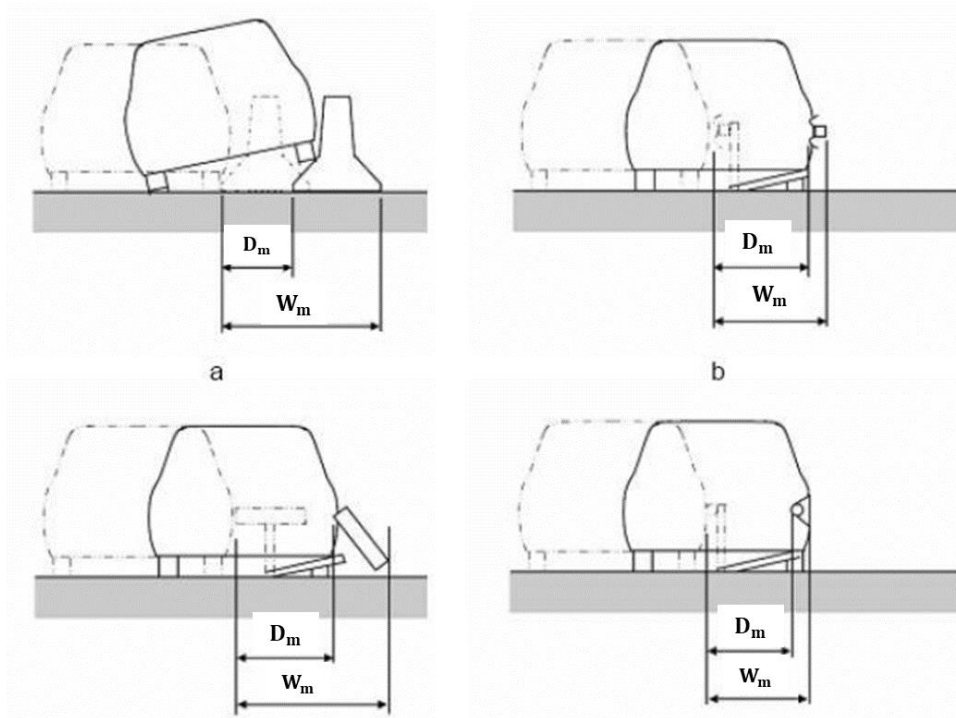


Figura 12 – Deformabilidade dos sistemas de retenção (British Standards Institution, 2010b).

Analisando a Figura 12, torna-se possível sustentar a ideia de que a largura útil (W_m) corresponde à distância medida entre o lado do sistema de retenção direcionado para a faixa segundo a qual o impacto não se verificou e a posição dinâmica lateral máxima de qualquer parte relevante do sistema (LNEC, 2010). A equação que se apresenta de seguida traduz o cálculo relativo à largura útil normalizada (W_N),

$$W_N = W_U + \left[(W_m - W_U) \times \sqrt{\frac{M_t \times (V_t \times \sin \alpha_t)^2}{M_m \times (V_m \times \sin \alpha_m)^2}} \right] \quad (2.3)$$

onde W_U corresponde à largura do sistema de retenção não deformado, W_m corresponde à largura útil medida (deslocamento máximo após impacto), M_t corresponde à massa total específica, M_m corresponde à massa total, V_t corresponde à velocidade específica, V_m corresponde à velocidade medida, α_t diz respeito ao ângulo específico e, por fim, α_m diz respeito ao ângulo medido.

Relativamente à deflexão dinâmica normalizada (D_N), este parâmetro assume-se como sendo a deformação máxima verificada por qualquer ponto pertencente ao sistema de retenção, presente no lado segundo o qual ocorreu o evento de impacto. A equação que se segue fornece o valor analítico referente a este parâmetro,

$$D_N = D_m \times \sqrt{\frac{M_t \times (V_t \times \sin \alpha_t)^2}{M_m \times (V_m \times \sin \alpha_m)^2}} \quad (2.4)$$

onde D_m diz representa a deflexão dinâmica máxima.

Por fim, relativamente ao fator indicativo da intrusão do veículo no sistema de retenção (VI_m), este pode ser estimado da seguinte forma,

$$VI_N = VI_m \times \sqrt{\frac{M_t \times (V_t \times \sin \alpha_t)^2}{M_m \times (V_m \times \sin \alpha_m)^2}} \quad (2.5)$$

onde VI_m corresponde à intrusão do veículo.

Posto isto, as classificações dos níveis de largura útil de um sistema são realizadas de acordo com a informação constante da tabela 4.

Tabela 4 - Níveis de largura útil (British Standards Institution, 2010b).

Classes de largura útil normalizada	Níveis de largura útil normalizada [m]
W_1	$W_N \leq 0,6$
W_2	$W_N \leq 0,8$
W_3	$W_N \leq 1,0$
W_4	$W_N \leq 1,3$
W_5	$W_N \leq 1,7$
W_6	$W_N \leq 2,1$
W_7	$W_N \leq 2,5$
W_8	$W_N \leq 3,5$

Relativamente à intrusão do próprio veículo na barreira, este deve ser capaz de cumprir com o que se estipula na Tabela 5, em função do nível de intrusão admitido (Fig. 13).

Tabela 5 - Níveis de intrusão do veículo (British Standards Institution, 2010b).

Classes relativos aos níveis de intrusão do veículo	Níveis de intrusão do veículo normalizados [m]
VI_1	$VI_N \leq 0,6$

.../...

.../...

VI_2	$VI_N \leq 0,8$
VI_3	$VI_N \leq 1,0$
VI_4	$VI_N \leq 1,3$
VI_5	$VI_N \leq 1,7$
VI_6	$VI_N \leq 2,1$
VI_7	$VI_N \leq 2,5$
VI_8	$VI_N \leq 3,5$
VI_9	$VI_N > 3,5$

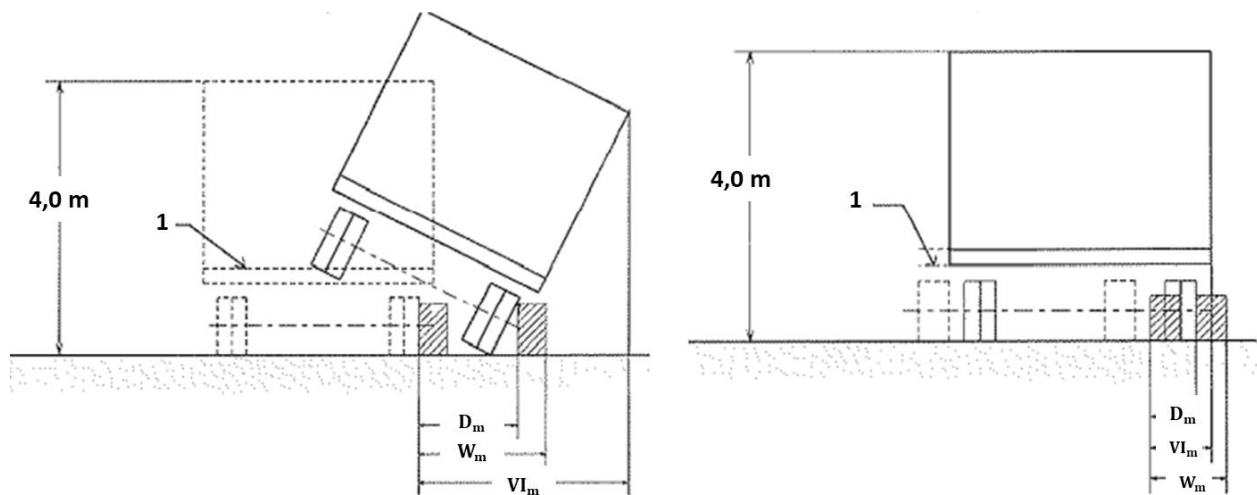
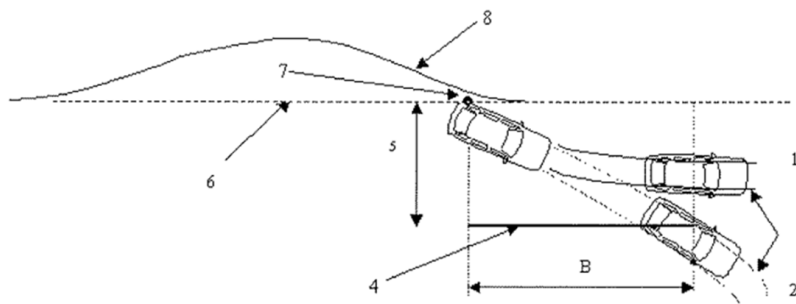


Figura 13 - Intrusão do Veículo (British Standards Institution, 2010b).

É ainda importante garantir que a barreira de segurança seja capaz de redirecionar o veículo para a faixa de rodagem, sem que este exceda uma determinada distância máxima após o impacto (Figura 14). Esta distância é denominada por “Exit Box”. Para além disso, é necessário assegurar um conjunto de condições, nomeadamente:

- Após o impacto, apenas uma das rodas poderá atravessar por completo (quer pelo topo, quer pela base) a barreira de segurança;
- O veículo não pode capotar, quer seja durante ou após o impacto.



Legenda

- | | |
|---|--|
| 1 "Passou" | 5 $A + \text{largura do veículo} + 16\% \text{ do comprimento do veículo}$ |
| 2 "Falhou" | 6 Lado da barreira correspondente ao tráfego |
| 3 Distância entre rodas/Eixo | 7 Ponto P |
| 4 Extensão da "Exit Box" | 8 Configuração da deformada da barreira após impacto |
| B Distância entre o último ponto P e o momento de paragem | |

Figura 14 - Considerações relativas à *Exit Box* (British Standards Institution, 2010b).

Os valores máximos correspondentes às distâncias representadas pelas letras A e B na Figura 14, encontram-se sumariados na Tabela 6.

Tabela 6 - Distâncias correspondentes à *Exit Box* (British Standards Institution, 2010b).

Tipo de Veículo	A [m]	B [m]
Carro	2,2	10
Outros	4,4	20

Deste modo, com base nas informações anteriormente apresentadas pela norma, pretende-se assegurar um conjunto de condições:

- Uma vez que se pretende comprovar a existência de um nível de contenção N2, a simulação numérica deverá seguir os pressupostos do ensaio TB 32;
- Uma vez que o índice de severidade não corresponde a um critério de validação da barreira de segurança, a sua avaliação não será considerada;
- O ponto selecionado para o impacto do veículo deve ser representativo do pior cenário possível e, segundo a norma, deve ser localizado a um terço do comprimento total da instalação utilizada;
- Por fim, tanto a largura útil normalizada, como a deflexão dinâmica e a intrusão do veículo não serão estimadas, enfatizando-se apenas o deslocamento máximo obtido.

2.3 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos constitui uma ferramenta muito poderosa de obtenção da solução aproximada para o conjunto de equações diferenciais que governam vários fenómenos físicos. A sua utilização extensiva em muitos problemas que se colocam atualmente na indústria e em vários domínios de atividade em investigação científica, permite concluir que se não tivessem sido desenvolvidos, muito dificilmente se conheceriam as soluções para os problemas existentes. Inicialmente, esta técnica (método) foi desenvolvida tendo por inspiração o campo do conhecimento da análise estrutural, sendo que se usaram as analogias com esse processo discreto na obtenção da solução para os problemas contínuos. À medida que a compreensão do processo de base foi crescendo, os métodos de aproximação matemática empregues (como é o caso dos métodos de Rayleigh, Ritz e Galerkin) tornaram-se óbvios, tendo-se tornado uma área de investigação particularmente atrativa para muitos matemáticos. A dificuldade que, entretanto, se registou nesse processo, resultou da linguagem (formulação) que estes utilizam, que tornam a sua compreensão particularmente difícil de seguir.

Deve ter-se presente que numa fase anterior à do advento do método dos elementos finitos, já existiam métodos numéricos alternativos. Existiam técnicas para soluções de fronteira (*boundary solution techniques*) e o método das diferenças finitas.

O método dos elementos finitos atua segundo a discretização de um determinado domínio contínuo (ou discreto), nos denominados elementos finitos. Essa mesma discretização resulta numa malha, composta por elementos conectados por nós, sendo estes últimos os principais responsáveis pelo fornecimento dos resultados pretendidos com as simulações (Fig. 15). De salientar o facto de que o processo anteriormente explicitado é promovido para a totalidade dos elementos que compõe a geometria em análise, culminando com a obtenção de resultados que poderão, ou não, ser próximos da realidade (F. M. Azevedo, 2003).

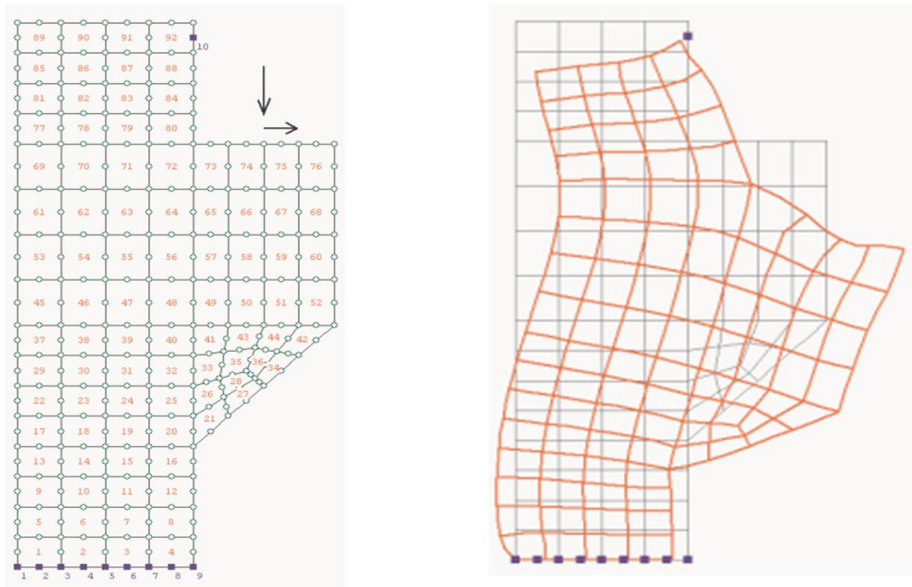


Figura 15 - Malha de Elementos Finitos e respetiva deformação após aplicação dos esforços exteriores (F. M. Azevedo, 2003).

O método dos elementos finitos diz então respeito a uma ferramenta numérica capaz de solucionar muitos problemas para os quais se conhecem, ou não, as propriedades mecânicas, as leis de comportamento dos fenómenos que se pretende modelar (lineares ou não lineares), as condições de fronteira (graus de liberdade prescritos) e a tipologia da solitação (ação ou velocidade do fenómeno), designadamente se ocorre de forma dinâmica ou quase-estática. Em função da tipologia de solitação, poder-se-á então optar por uma solução implícita ou explícita (Fig. 16), levando em linha de conta com a velocidade e a taxa de deformação.


Solução	Velocidade de Impacto (m/s)	Taxa de Deformação (/s)	Efeito
Implícita  Explícita		$<10^{-5}$	Estático
	< 50	$10^{-5} \cdot 10^{-1}$	Elástico
	50 - 1000	$10^{-1} \cdot 10^1$	Elasto-Plástico (resistência do material significativa)
	1000 - 3000	$10^5 \cdot 10^6$	Essencialmente plástico (pressão iguala ou excede a resistência do material)
	3000 - 12000	$10^6 \cdot 10^8$	Hidrodinâmico (pressão muitas vezes superior à resistência do material)
	> 12000	$> 10^8$	Vaporização dos sólidos em colisão

Figura 16 - Solução em função da velocidade e taxa de deformação (ANSYS, 2020).

Na presente dissertação, será fundamentalmente utilizado o modelo explícito, pelo que este será alvo de uma abordagem mais detalhada.

2.3.1 Método Explícito

O presente caso de estudo corresponde a um comportamento complexo e não-linear evidenciado pelos materiais considerados, em resultado das grandes deformações que ocorrem em dependência do tempo, pelo que a análise é totalmente explícita. No *software* utilizado para a resolução do problema (*Ansys*), esse módulo é identificado como *Explicit Dynamics*. É utilizado o método explícito de integração do tempo para a resolução das equações diferenciais que são empregues, aplicando as condições cinemáticas determinadas para o presente incremento, na obtenção dessas mesmas condições para o incremento que se segue. Este procedimento é realizado de forma sucessiva (regressiva) até se atingir o tempo de simulação final pretendido.

Tal como referido anteriormente, numa solução do tipo *Explicit Dynamics*, um determinado domínio contínuo é discretizado numa malha de elementos finitos, associada às propriedades do material atribuído a esse domínio, assim como as solicitações intervenientes, as condições de fronteira (constrangimentos) e as condições iniciais (ANSYS, 2020). Com isto, consegue-se a definição do denominado estado inicial, que, quando integrado no tempo, irá produzir um deslocamento nos nós que compõem a malha, desencadeando uma sequência de procedimentos de cálculo até à obtenção da solução pretendida. Assim, destacam-se as seguintes fases (Fig. 17) de resolução do problema:

- O deslocamento dos nós promove a deformação dos elementos constituintes da malha;
- Essa deformação resulta numa variação do volume de material em cada um desses elementos;
- A taxa de deformação existente é utilizada para derivar as taxas de deformação do material, recorrendo a formulações matemáticas;
- As leis constitutivas dos materiais fornecem os valores das tensões instaladas;
- Essas tensões são novamente transformadas em forças nodais;
- As forças nodais provenientes de ações externas são contabilizadas através das condições fronteira, das cargas aplicadas e dos contactos entre os corpos (*body interactions*);
- As forças nodais são divididas pelas respetivas massas, gerando acelerações;
- Essas acelerações são integradas de forma explícita no tempo, gerando velocidades nos nós;
- Por sua vez, as velocidades são integradas, calculando as novas posições dos nós;
- Este procedimento é então repetido (de forma recorrente) até se atingir o tempo total de simulação, definido previamente pelo utilizador.

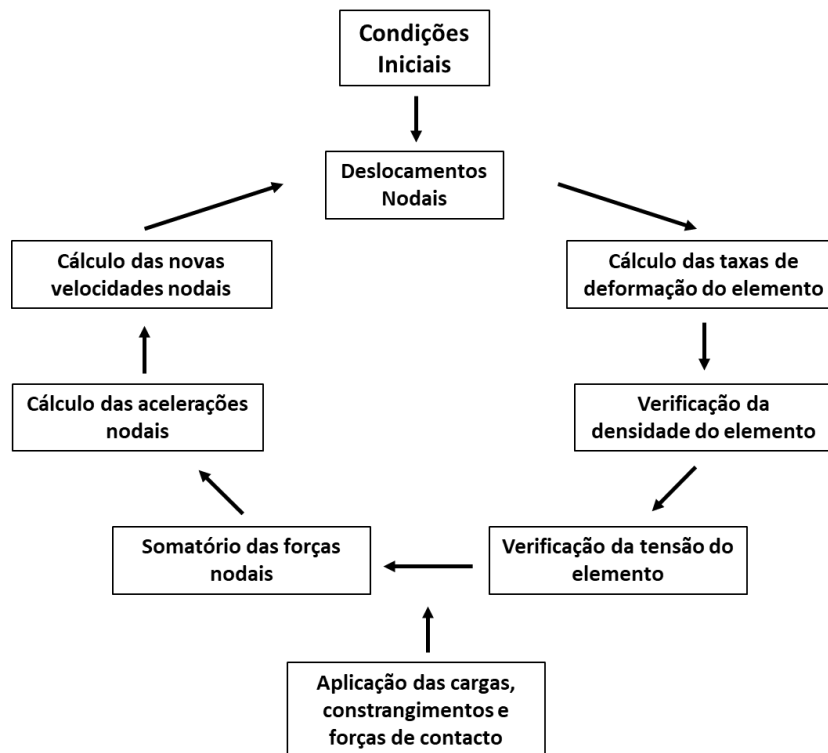


Figura 17 - Esquema do procedimento adotado pelo *Explicit Dynamics*, até a solução final ser atingida (ANSYS, 2020).

2.3.2 *Explicit Dynamics*

As equações diferenciais parciais resolvidas numa análise explícita expressam a conservação da massa, do momento e da energia, em coordenadas de Lagrange, permitindo por esse mesmo motivo, determinar as equações de movimento que regem o sistema (baseado no espaço configuração e numa função de amaciamento, designada Lagrangeano). Conjuntamente com as propriedades do material e as condições iniciais previamente definidas, aquelas equações permitem obter a solução do problema em estudo. Assim sendo, de acordo com a formulação de Lagrange, a malha deforma-se em função das propriedades mecânicas dos materiais e das leis constitutivas que regem os seus comportamentos mecânicos, garantindo assim a conservação de massa. Por sua vez, a massa específica pode ser determinada de acordo com a relação entre o volume do corpo V naquele preciso instante e a sua massa inicial m (Eq. 2.6) (ANSYS, 2020).

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V} \quad (2.6)$$

As equações diferenciais parciais que traduzem a conservação do momento (Eq. 2.7), relacionam a aceleração existente (componentes cartesianas \ddot{x} , \ddot{y} e \ddot{z}), com o tensor das tensões σ_{ij} de Cauchy.

$$\begin{aligned}
\rho\ddot{x} &= b_x + \frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial z} \\
\rho\ddot{y} &= b_y + \frac{\partial\sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial z} \\
\rho\ddot{z} &= b_z + \frac{\partial\sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Enquanto que a equação da conservação de energia é expressa da seguinte forma,

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx}\dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy}\dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz}\dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy}\dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz}\dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx}\dot{\epsilon}_{zx}) \tag{2.8}$$

Este conjunto de equações é resolvido para cada elemento que compõe o modelo analisado, onde cada um dos valores determinados no *step* (incremento de tempo) anterior é reutilizado na determinação dos *steps* subsequentes, até se atingir o fim da simulação. De modo a assegurar-se a estabilidade e a exatidão da simulação são utilizados incrementos de tempo bastante reduzidos. Com todas as condições ótimas estabelecidas e capazes de gerarem uma simulação explícita bem efetuada, devem-se verificar os valores referentes à massa, momento e energia, devendo estes ser conservados ao longo da análise. A análise a esses parâmetros, atua do mesmo modo que um estudo de convergência no caso das simulações implícitas.

2.3.3 Integração Explícita do Tempo

O *Explicit Dynamics* tem por base o método das diferenças centrais, no que à integração do tempo concerne. Assim sendo, após as forças terem sido transferidas para os nós da malha (resultantes das tensões internas, contactos e condições iniciais), as acelerações nodais são derivadas através do desenvolvimento da seguinte equação (ANSYS, 2020).

$$\ddot{x}_i = \frac{F_i}{m} + b_i \tag{2.9}$$

em que \ddot{x}_i diz respeito aos componentes das acelerações nodais (referida atrás), F_i correspondem às forças nodais, m é a massa atribuída a cada um dos nós e b_i corresponde às componentes relacionadas com a aceleração do corpo.

Por sua vez, a determinação das velocidades nodais é realizada de forma semelhante, no incremento $n + 1/2$, através da equação 2.10,

$$\dot{x}_i^{n+1/2} = \dot{x}_i^{n-1/2} + \ddot{x}_i^n \Delta t^n \tag{2.10}$$

Finalmente, as posições finais dos nós são atualizadas para o incremento $n + 1$, pela integração da equação que traduz as velocidades,

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \dot{x}_i^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \tag{2.11}$$

De modo a garantir ainda a estabilidade e exatidão dos resultados, existe uma limitação em relação ao incremento de tempo (*timestep*) utilizado na integração, sendo essa imposta pela condição Courant-Friedrichs Lewy (ou simplesmente condição CFL). O incremento de tempo é assim definido da forma,

$$\Delta t \leq f \times \left[\frac{h}{c} \right]_{min} \quad (2.12)$$

onde Δt corresponde ao incremento de tempo, f a um fator de estabilidade (assume por defeito o valor de 0,90; devendo ser inferior ou igual à unidade), h a dimensão característica de um elemento finito (dependente do tipo de elemento utilizado) e c a velocidade do som no meio material que se está a modelar.

2.3.4 *Mass Scaling*

O valor máximo referente ao incremento de tempo (*timestep*) que pode ser utilizado na integração explícita é inversamente proporcional à velocidade do som no meio material que se está a modelar, porém diretamente proporcional à raiz quadrada da massa de material contida num só elemento. Esse parâmetro é conseguido da forma,

$$\Delta t \propto \sqrt{\frac{m}{VC_{ii}}} \quad (2.13)$$

sendo C_{ii} a rigidez do material, m a massa e V o volume do elemento.

Posto isto, com a ativação desta funcionalidade, promove-se o incremento artificial da massa de um elemento, o que conduz ao aumento do incremento de tempo (*timestep*) que permite garantir a estabilidade do modelo e, conseqüentemente, reduzir o número de incrementos necessários para completar a simulação. Contudo, é de extrema importância referir que esta funcionalidade altera as propriedades inerciais em algumas regiões da malha, pelo que é necessário adquirir sensibilidade suficiente para que a solução obtida seja capaz de traduzir de forma fiável o fenómeno físico em estudo.

2.4 Ensaios de Impacto: Revisão Bibliográfica

Após uma revisão da literatura, confirmou-se a existência de um conjunto de pressupostos que não só permitem assegurar uma análise correta do fenómeno em estudo, como também estabelecer uma relação equilibrada com o tempo de processamento necessário à correta modelação dos ensaios de impacto de veículos com barreiras de segurança. Assim, e numa primeira fase, é importante avaliar as considerações relacionadas com o veículo a impactar. A geometria deste apresenta influência nos resultados a alcançar pela barreira de segurança rodoviária, pelo que é relevante obterem-se modelações

próximas dos veículos certificados para as respetivas validações, assim como respostas fisicamente exatas. Contudo, algumas abordagens mais simplificadas, como é o caso da desenvolvida por (Shen et al., 2008), podem apresentar resultados satisfatórios (Fig. 18).

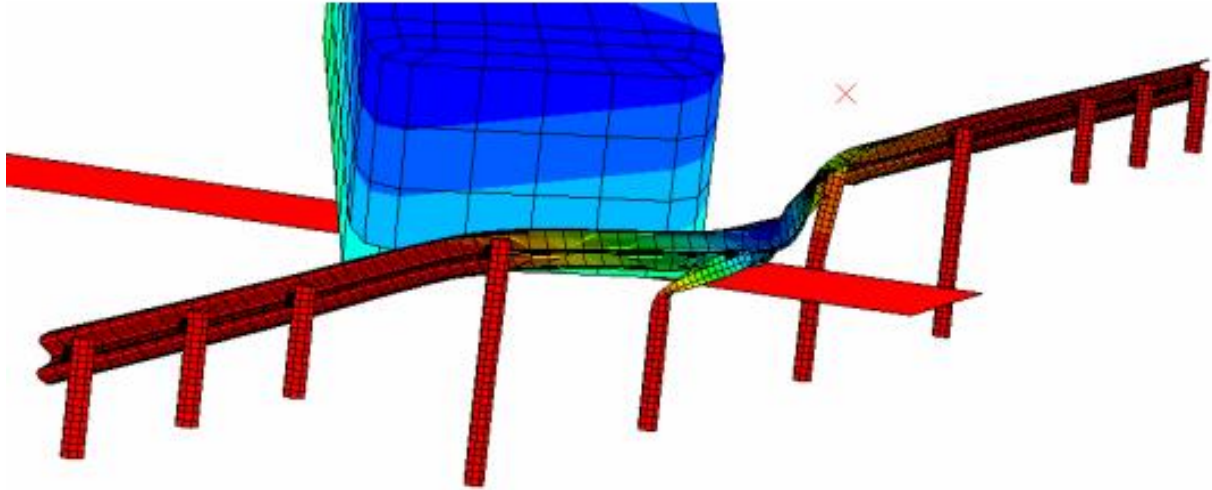


Figura 18 - Detalhe da deformada de um modelo de barreira com viga "W" induzido por um modelo de veículo (Shen et al., 2008).

Neste caso de estudo, o veículo foi modelado como um bloco deformável, tendo-lhe sido atribuídas propriedades elásticas para o efeito. Estes atributos permitem que o próprio objeto absorva alguma da energia gerada durante o impacto, desenvolvendo uma relação simbiótica com as próprias barreiras, ou seja, ambos os elementos do conjunto veículo-barreira atuam no sentido de absorver a energia existente. Contudo, este modelo numérico revela ainda alguma simplificação associada ao facto de não definir qualquer lei de plasticidade (mais do que provável nestes ensaios), pelo que a componente de energia dissipada neste modelo de veículo se cinge à parcela elástica.

Existem, contudo, outros estudos da autoria de (Qian et al., 2016) e (Wilde et al., 2020) onde constam modelos geométricos mais realistas (com maior detalhe), mormente no que se refere à geometria, no sentido de aumentar a exatidão dos resultados numéricos obtidos (Fig. 19).



Figura 19 - Simulação numérica com veículo modelado à escala real (Wilde et al., 2020).

Nesta simulação numérica, para além do detalhe geométrico empregue na modelação, (Wilde et al., 2020) especificou de forma exata pormenores essenciais ao comportamento do veículo, nomeadamente a sua massa, o posicionamento das rodas e graus de liberdade associados e a localização do centro de massa, o que possibilita reproduzir as trajetórias de forma confiável.

Por fim, e ainda no que ao veículo diz respeito, (Leikkonen, 2019) desenvolveu um modelo geométrico tendo por base os elaborados pelo NCAC (National Crash Analysis Centre), como ilustrado na Figura 20.

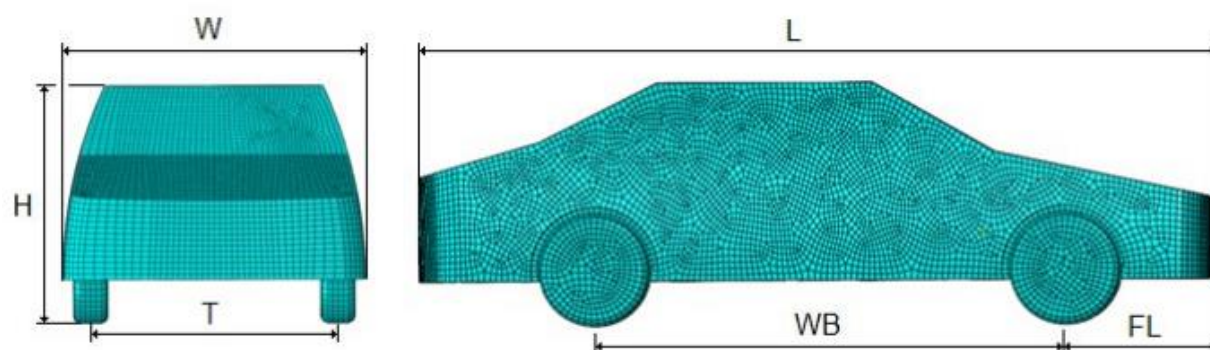


Figura 20 - Modelo geométrico da viatura para ensaio TB 32 modelada por (Leikkonen, 2019).

O autor modelou a viatura como sendo uma casca, alterando progressivamente tanto a sua massa, como a localização do seu centro de massa, através de variações ao nível da espessura e massa específica do material. Posto isto, ainda que não apresente um nível de detalhe exatamente igual ao verificado na realidade, este modelo geométrico é bastante aproximado, pelo que consiste no modelo adotado para a presente dissertação, tendo sido aplicadas as devidas alterações.

Relativamente aos elementos de ligação que conectam os diversos componentes mecânicos intervenientes no conjunto, vários autores realizaram a sua representação através de estratégias numéricas equivalentes. Alguns deles, como é o caso de (Ren & Vesenjaj, 2005), desenvolveram modelos numéricos nos quais as barreiras de segurança foram tratadas como uma (única) viga contínua, mais concretamente a viga em “W”, pelo que a influência dos elementos de ligação foi negligenciada (Fig. 21).

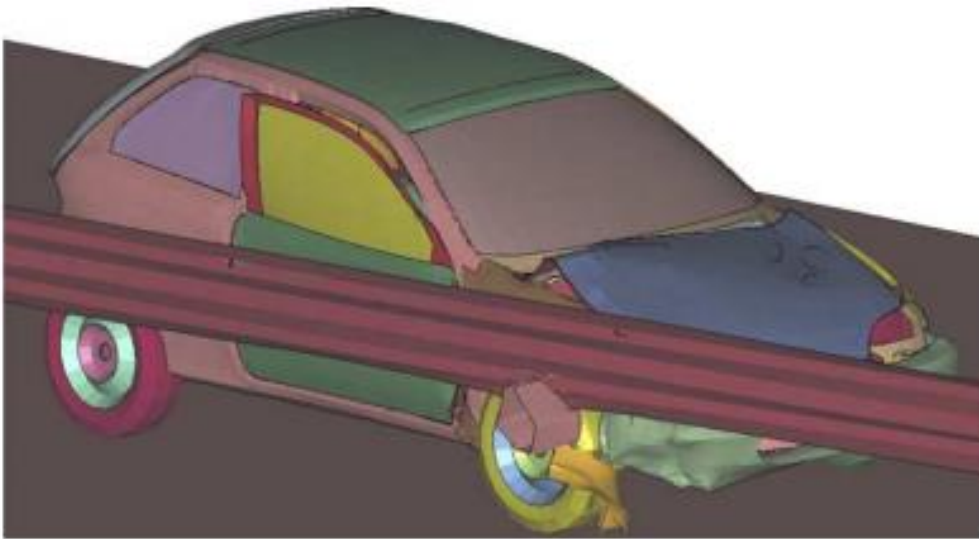


Figura 21 - Modelo numérico com eliminação das ligações (Ren & Vesenjaj, 2005).

Estudos subsequentes levaram em linha de conta a existência destes elementos de ligação, tendo desenvolvido formas alternativas de processar a sua intervenção no conjunto. Desta forma, (Borovinšek et al., 2007) e (Nycz & Grodek, 2016) representaram as ligações aparafusadas com o auxílio de elementos viga (*Beam elements*), associando-lhes a rigidez característica deste tipo de juntas, obtidas de forma empírica (Fig. 22).

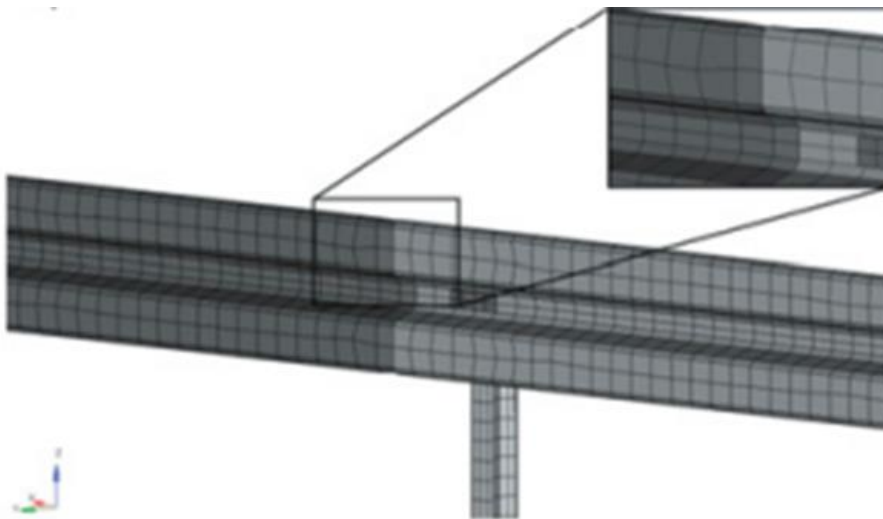


Figura 22 – Pormenor que ilustra a forma de ligação com elementos de viga adotado por (Nycz & Grodek, 2016).

Alternativamente aos casos anteriores, (Qian et al., 2016) representou as ligações aparafusadas através da utilização de elementos de mola (*Spring elements*). Este método de conexão permitiu ao autor considerar ainda a rigidez característica e o modo de dano característico deste tipo de ligações. A Figura

23 permite ilustrar a proximidade existente entre os resultados experimentais e os numéricos, no que diz respeito ao procedimento adotado numericamente para modelar as ligações entre os componentes de um modelo de barreira de segurança.

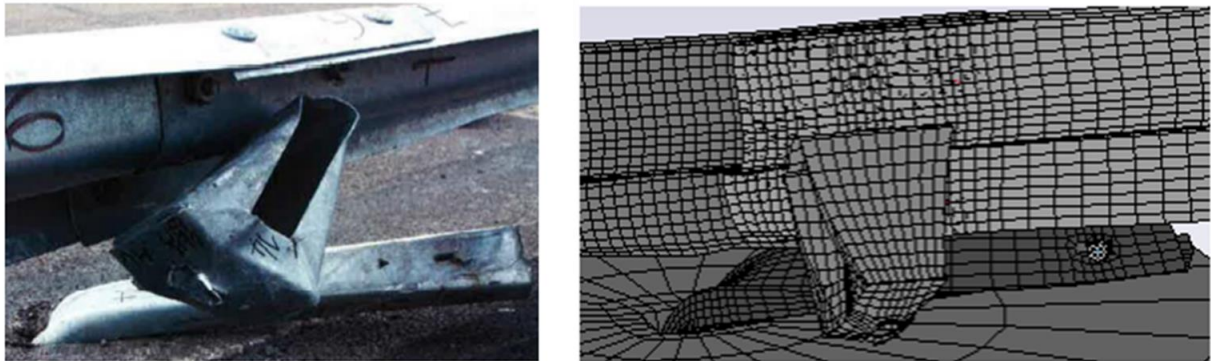


Figura 23 - Pormenor que ilustra a forma de ligação com elementos de mola adotado por (Qian et al., 2016).

Posto isto, dada a proximidade entre os resultados e a possibilidade de se atribuir a rigidez característica dos elementos da junta de ligação aparafusada, na presente dissertação optou-se por adotar este método equivalente nas ligações deste tipo.

Uma vez que o modelo geométrico é bastante complexo, tanto ao nível do número de componentes intervenientes, como ao nível de detalhe geométrico, tornou-se necessário realizar um conjunto de simplificações relativamente à modelação, no sentido de estabelecer um compromisso aceitável entre a exatidão dos resultados obtidos e o tempo requerido para a modelação numérica. Com isto, (Shen et al., 2008) promoveram um conjunto de simplificações geométricas, de modo a gerarem um modelo não só próximo da geometria verdadeira, mas também não excessivamente detalhado (Fig. 24).

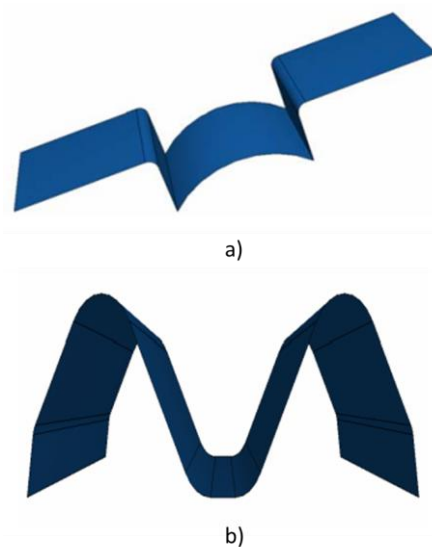


Figura 24 - Modelo geométrico simplificado de componentes de barreiras: a) Componente de ligação viga-prumo, e b) Viga "W" (Shen et al., 2008).

Desta forma, ainda que não seja aplicável a todos os componentes, nem a todos os pormenores, realizaram-se algumas simplificações geométricas em relação a determinados elementos do conjunto, que serão apresentadas e discutidas nos próximos capítulos.

Torna-se ainda extremamente relevante obter uma resposta exata quanto ao comportamento mecânico dos materiais que constituem os modelos de barreira em estudo. Por conseguinte, a atribuição de uma lei constitutiva que permita modelar o comportamento elasto-plástico das estruturas é essencial, uma vez que os componentes estarão submetidos a elevadas deformações. Além disso, a interação entre o solo e os prumos constitui um fator de elevada influência na deformação dos mesmos e, conseqüentemente, nos deslocamentos globais desenvolvidos pela estrutura. Assim sendo, (Sassi, 2011), Figura 25a, e (Klasztorny et al., 2019), Figura 25b, desenvolveram estudos nesse âmbito, permitindo a modelação numérica desta interação, tendo por base o comportamento do solo.

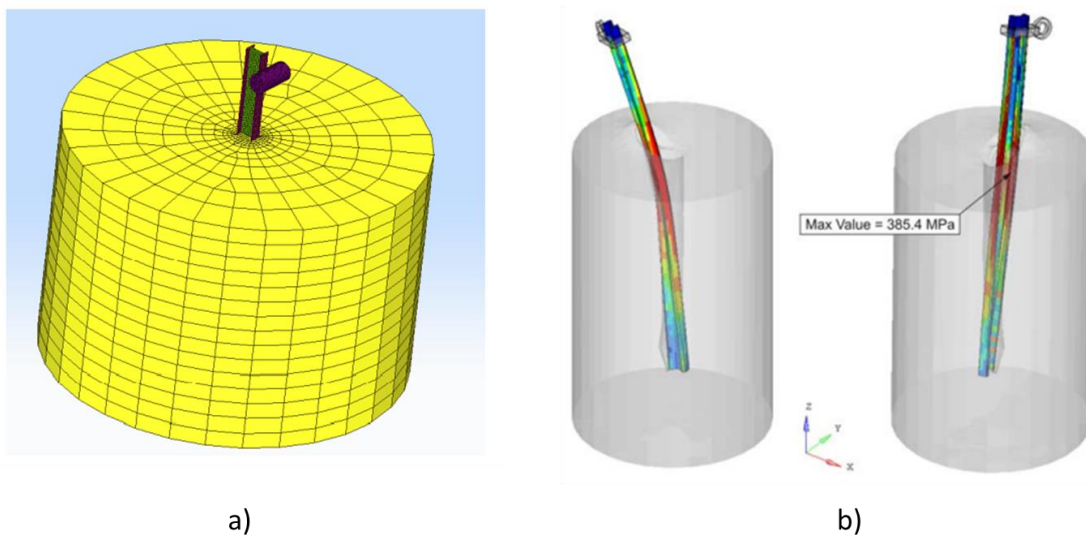


Figura 25 - Estudos realizados no âmbito da interação solo-prumo (Klasztorny et al., 2019; Sassi, 2011).

Ambos os pressupostos utilizados pelos estudos apresentados até este momento foram aplicados na presente dissertação, quer seja pelas dimensões adotadas para o volume representativo do solo, quer seja pelas propriedades físicas e mecânicas atribuídas a esse mesmo volume.

Finalmente, após a pesquisa bibliográfica realizada, é possível aplicar algumas das premissas enunciadas, ao presente caso de estudo, nomeadamente:

- A geometria do veículo deve ser algo detalhada e poderá ser modelada como uma casca;
- O veículo deve apresentar um comportamento deformável;

- O piso da estrada (via) pode ser considerado como um corpo rígido ou então deverá possuir uma massa suficiente elevada que lhe permita atuar como tal;
- A interação solo-prumo é relevante na obtenção de resultados próximos da realidade;
- À semelhança do automóvel, os componentes mecânicos presentes no conjunto das barreiras de segurança devem ser modelados como elementos finitos de casca;
- Elementos geométricos não fundamentais para o comportamento mecânico-estrutural, como é o caso de determinados filetes e furos, devem ser eliminados, no sentido de evitar uma estruturação da malha demasiadamente pormenorizada (e refinada) em determinadas zonas;
- Os elementos de ligação devem ser substituídos por equivalências numéricas, como é o caso da utilização de molas nas ligações aparafusadas (*Spring elements*).

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UMA BARREIRA DE SEGURANÇA RODOVIÁRIA

Neste capítulo far-se-á a exposição de todas as considerações assumidas durante cada grupo de simulações numéricas efetuadas, desde a avaliação e validação da geometria do veículo utilizado, passando pela simulação do modelo geométrico completo (N2W3) que, no final, permitirá conduzir à avaliação e validação dos modelos de barreira de segurança analisados e terminando na avaliação da interação solo-prumo, de forma a proceder à sua inclusão em futuros modelos numéricos. Avaliar-se-á ainda, de forma mais sucinta, a capacidade de contenção de um modelo numérico referente a uma solução alternativa (N2W2).

3.1 Geometria dos Elementos Constituintes das Barreiras de Segurança

O procedimento associado à realização de uma simulação numérica segue um conjunto de etapas, das quais, a primeira, passa pela obtenção do modelo geométrico dos componentes intervenientes em formato CAD. Assim, sendo que o conjunto em análise corresponde a um modelo de barreira de segurança rodoviária, é importante realizar a devida exposição das suas características geométricas. Nesse sentido, o conjunto é composto por: (a) uma viga em “W”; (b) um dispositivo de proteção para motociclistas (DPM); (c) uma suspensão em “C”; (d) um prumo e (e) duas chapas (soldadas ao prumo) destinadas a aumentar a rigidez e a resistência deste (Fig. 26).

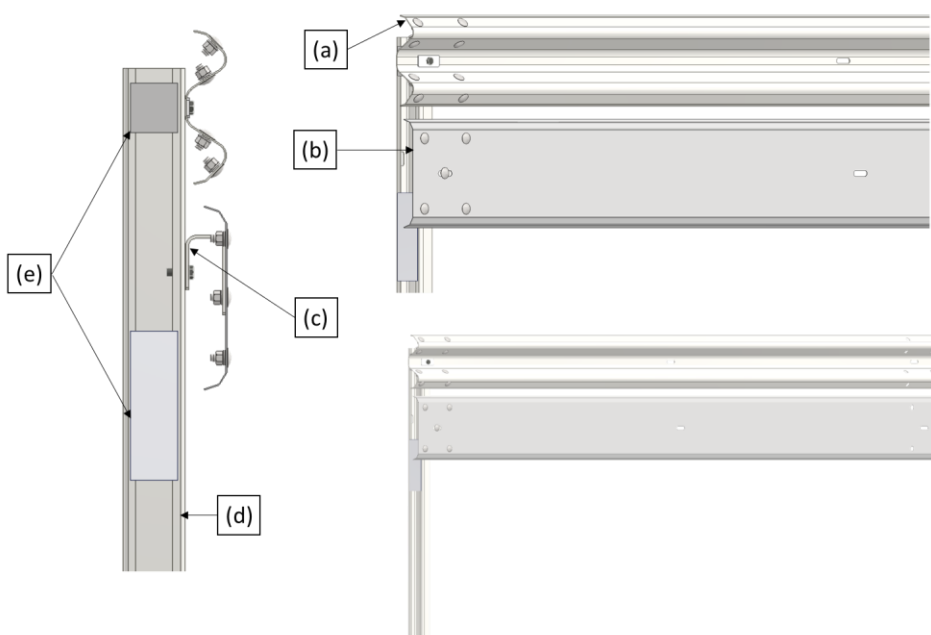


Figura 26 - Modelo de barreira em estudo (N2W3).

Mais informações relativas às dimensões dos componentes, podem ser consultadas no Anexo 1.

3.2 Propriedades dos Materiais Constituintes das Barreiras de Segurança

Os vários elementos mecânicos que compõe o conjunto das barreiras de segurança rodoviárias são fabricados a partir de três tipos de aço distintos: S235 (dispositivo de proteção para motociclistas), S275 (suspensão em “C”, que possibilita a ligação mecânica da barreira de motociclistas aos prumos) e S355 (viga em “W”, prumos e chapas de reforço destinadas a aumentar a rigidez e a resistência mecânica dos mesmos).

Assim sendo, de modo a promover-se uma correta definição dos materiais é importante utilizarem-se modelos constitutivos para esse mesmo efeito. Por conseguinte, na definição do comportamento mecânico dos aços S235 e S355, utilizou-se o modelo de plasticidade de *Johnson-Cook*, ao passo que para a definição do aço S275, utilizou-se uma lei multilinear, denominada por “*Multilinear Isotropic Hardening*”.

3.2.1 *Johnson-Cook*

O modelo constitutivo de Johnson-Cook é utilizado na definição do regime plástico de materiais, tipicamente metais, que se encontrem submetidos a elevadas deformações, elevadas taxas de deformação e elevadas temperaturas. Este modelo traduz a dependência existente da tensão de cedência do material, com a deformação, a taxa de deformação e a temperatura, podendo ser representado através da Equação 3.1 (ANSYS, 2020),

$$Y = [A + B\varepsilon_p^n][1 + C \ln \varepsilon_p^*][1 - T_H^m] \quad (3.1)$$

onde ε_p corresponde à deformação plástica efetiva do material, ε_p^* representa a taxa de deformação plástica efetiva normalizada, proveniente do quociente estabelecido entre a deformação plástica efetiva do material (ε_p) e um valor de referência (ε_p^0) e, por fim, T_H traduz o efeito da temperatura, sendo um parâmetro fornecido pelo seguinte quociente: $\frac{T-T_0}{T_m-T_0}$, onde T_0 corresponde a um valor de temperatura de referência estabelecido e T_m à temperatura de fusão do material modelado. Relativamente aos restantes termos da equação (A, B, C, n e m), estes representam constantes específicas do material (ANSYS, 2020; Gambirasio & Rizzi, 2014, 2016).

Assim sendo, e relativamente a cada um dos três termos que compõe a equação, torna-se possível concluir o seguinte:

- O primeiro termo da Equação 3.1 contempla uma lei de encruamento, sendo representativo do comportamento quase-estático do material, em que A corresponde à tensão de cedência do material a baixas deformações (regime quase-estático) e B e n representam o efeito do encruamento provocado pela deformação gerada.
- O segundo termo da Equação 3.1 revela o efeito da taxa de deformação na variação da tensão de cedência do material. O parâmetro C representa uma constante associada à taxa de deformação do material.
- Por fim, o terceiro termo, apresenta o efeito da temperatura na variação da tensão de cedência do material em estudo. Caso a temperatura em estudo, seja igual à temperatura de referência, este termo deixará de apresentar qualquer influência no comportamento do material, podendo ser desconsiderado.

Posto isto, após consulta da bibliografia, utilizaram-se os parâmetros que se indicam na Tabela 7 para se definir o comportamento dos aços S235 e S355, segundo o modelo de plasticidade de Johnson-Cook.

Tabela 7 - Parâmetros de Johnson-Cook utilizados na definição dos aços S235 e S355.

Parâmetro	Material	
	S235 (Verleysen et al., 2011)	S355 (Škrlec & Klemenc, 2016)
A [MPa]	280	448
B [MPa]	667	782
n	0,72	0,562
C	0,071	0,0247
m	0,269	-

De ressaltar o facto de que o parâmetro relativo à temperatura, para o aço S355, foi negligenciado e, por isso, foi atribuído o valor de 0. Esta decisão resultou do facto de, numa situação corrente, a temperatura que se faz sentir numa via pública não exerce qualquer influência no comportamento mecânico dos componentes do modelo de barreira de segurança que se pretende estudar neste trabalho.

3.2.2 *Multilinear Isotropic Hardening*

O modelo multilinear é correntemente utilizado em simulações numéricas, onde os corpos intervenientes estão submetidos a elevadas taxas de deformação. A sua definição é conseguida com base na curva tensão-deformação do material em análise, pelo que os seus valores deverão ser

fornecidos somente a partir do regime plástico. Ou seja, o primeiro ponto da curva deverá apresentar uma deformação plástica igual a zero, sendo acompanhada pelo valor da tensão de cedência do próprio material (ANSYS, 2020).

Deste modo, os valores utilizados na definição do aço S275, podem ser consultados na Tabela 8 (Yun & Gardner, 2017)(Sousa Pereira, 2021).

Tabela 8 - Conjunto de valores utilizados na definição do aço S275.

<i>Deformação Plástica</i>	<i>Tensão [MPa]</i>
0	275
0,02853	300
0,04214	325
0,05654	350
0,0756	375
0,12082	400
0,19859	425
0,27955	450
0,3607	475
0,44186	500
0,52303	525
0,60419	550
0,68536	575
0,76653	600
0,8477	625
0,92887	650
1,01004	675

Uma vez que o *software ansys* apenas oferece a possibilidade de definir a curva com um máximo de 10 pontos, alguns dos valores apresentados na Tabela 8 foram removidos para que a definição do material fosse possível. Relativamente às restantes propriedades do material, estas foram transversais aos 3 tipos de aço utilizados (Tabela 9).

Tabela 9 – Propriedades elásticas dos aços.

Material	Massa Específica [kg/m ³]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson
S235	7 850	200	0,3
S275			
S355			

3.3 Avaliação Numérica do Veículo

A avaliação do modelo geométrico representativo do veículo constitui uma etapa relevante no processo de avaliação de um modelo de barreiras de segurança rodoviária. Isto verifica-se, uma vez que o automóvel utilizado nos ensaios experimentais e, por consequência, nas simulações numéricas, deve cumprir um conjunto de requisitos, não só dimensionais, mas também inerciais, capazes de satisfazer a norma EN 1317. Assim, nesta seção descreve-se o processo de construção de um modelo numérico simplificado de um ensaio de impacto de uma viatura com uma parede vertical, que serviu de base à construção do modelo numérico do ensaio das barreiras de segurança à escala real. Na construção deste modelo numérico efetuou-se a montagem (*assembly*) de um conjunto de componentes que formam o veículo, designadamente a carroçaria e as rodas, assim como o piso e a parede rígida. Uma informação relevante que resultou desta análise foi o aspeto da deformada e o valor máximo de deslocamento desenvolvido.

3.3.1 Geometria Utilizada

Recorrendo à bibliografia, adquiriram-se informações relevantes no que diz respeito aos modelos de veículos utilizados pelos organismos certificados para a realização de ensaios experimentais. Posto isto, numa primeira fase optou-se pelo modelo utilizado por (Leikkonen, 2019), na simulação dos ensaios TB 32 (Fig. 27).

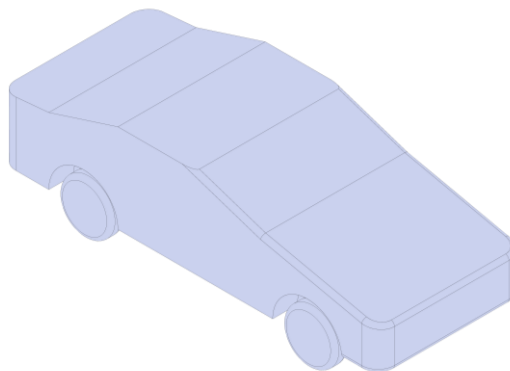


Figura 27 - Geometria inicialmente utilizada para a representação do veículo.

É imperativo que o modelo de automóvel apresente dimensões condizentes com as do utilizado em escala real. Estas especificações constam da norma EN 1317-1, podendo ser consultadas na Tabela 10, sendo acompanhadas pela Figura 28.

Tabela 10 - Especificações do modelo do veículo (BSI, 2010a).

Especificação	EN 1317-1	Modelo Geométrico
Massa [kg]	1 500 ± 75	1 494
Distância entre rodas (<i>Wheel Track - WT</i>) [m]	1,50 ± 15%	1,58
Raio da Roda (<i>Wheel Radius - WR</i>) [m]	Sem referência	0,32
Distância entre eixos (<i>Wheel Base - WB</i>) [m]	Sem referência	2,72
Altura (<i>h</i>) [m]	Sem referência	1,40
Comprimento (<i>L</i>) [m]	Sem referência	4,60
Largura (<i>W</i>) [m]	Sem referência	1,79
Centro de massa		
Distância longitudinal ao eixo dianteiro (<i>Longitudinal distance from front axle</i>) [m]	1,24	1,24
Distância lateral da linha central do veículo (<i>Lateral distance from vehicle centre line</i>) [m]	± 0,08	0,08
Altura acima do solo (<i>Height above ground</i>) [m]	0,53	0,53

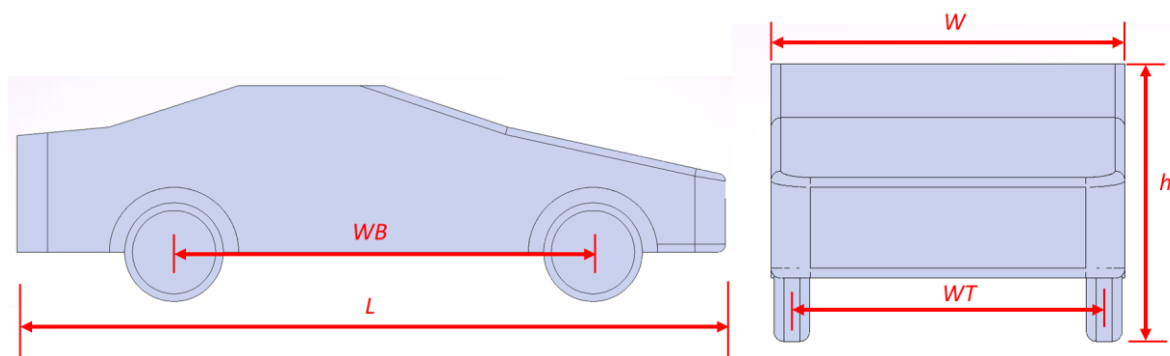


Figura 28 - Dimensões do veículo.

Nestas condições, e após importação do modelo geométrico para o *software* Ansys, constatou-se que a discretização processada com elementos sólidos, exigira um esforço computacional muito significativo. Deste modo, a geometria foi redesenhada com recurso ao *software* Inventor, permitindo assim a geração

de um modelo casca (Fig. 29) com a espessura a ser atribuída, posteriormente, no *software Ansys Explicit Dynamics*.

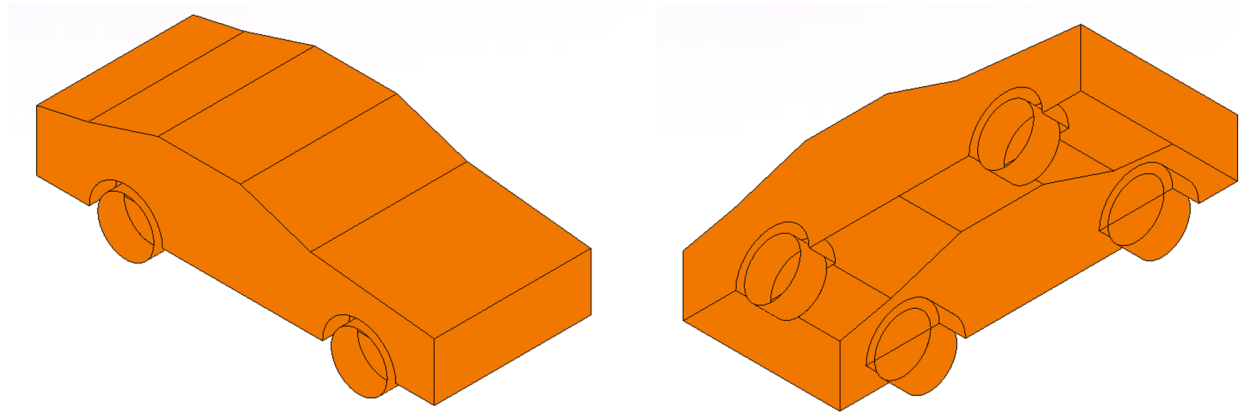


Figura 29 - Modelo geométrico de casca.

Analisando a Figura 29, torna-se perceptível o facto de esta simplificação geométrica remover por completo a espessura existente no interior de cada um dos corpos que compõe o veículo, oferecendo ainda a possibilidade de se atribuir uma dimensão adequada desse mesmo parâmetro, a cada um desses componentes. Para além disso, removeram-se todos os filetes existentes no primeiro modelo, promovendo a posterior geração de uma malha de elementos finitos mais uniforme, e a que corresponde um esforço computacional menos exigente.

Todos estes pressupostos atribuídos ao modelo do veículo foram incluídos na modelação final, o que permitirá atingir a validação do mesmo, estando esta ilustrada na Figura 30.

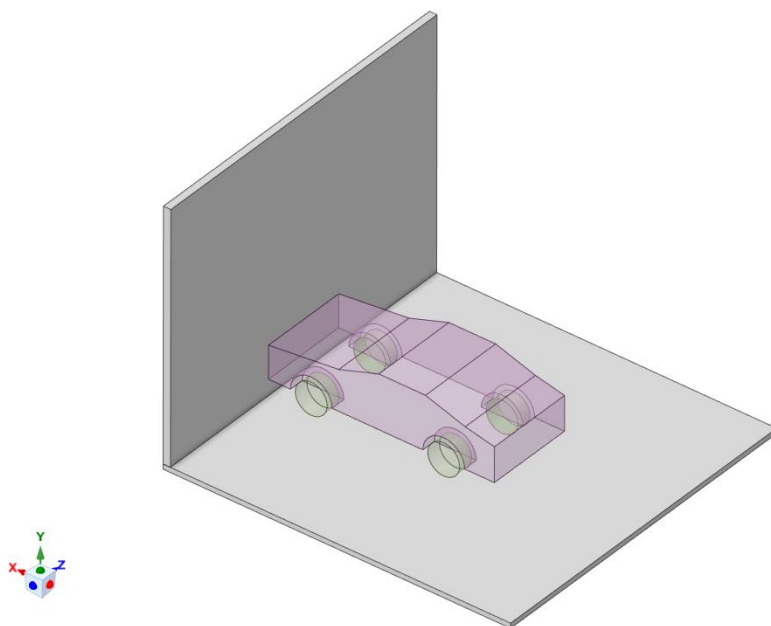


Figura 30 - Modelo geométrico global do método.

3.3.2 Propriedades dos Materiais

Tal como se referiu anteriormente (secções 2.3.2 e 3.2), a correta definição dos materiais representa uma etapa importante no procedimento utilizado para a obtenção das soluções numéricas. Posto isto, uma vez que a carroçaria de um veículo é constituída por uma grande variedade de materiais, nomeadamente, ligas de aço, ligas de alumínio, composições distintas de compostos poliméricos e materiais compósitos, optou-se por atribuir um modelo genérico presente na biblioteca do *software Ansys*, mais concretamente no grupo relativo aos *General Non-Linear Materials*, que melhor se adequasse a esta circunstância. Desta forma, atribuiu-se o modelo denominado por *Aluminum Alloy NL*, isto é, uma liga de alumínio com uma lei bilinear de plasticidade associada. Por sua vez, relativamente às rodas, optou-se pela atribuição das propriedades da borracha, presentes no modelo apresentado por (Simulia, n.d.). Estes parâmetros podem ser consultados nas seguintes Figuras 31a) e 31b).

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2770	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...			
6	Young's Modulus	7,1E+10	Pa		
7	Poisson's Ratio	0,33			
8	Bulk Modulus	6,9608E+10	Pa		
9	Shear Modulus	2,6692E+10	Pa		
10	Bilinear Isotropic Hardening				
11	Active Table	Total			
12	Yield Strength	2,8E+08	Pa		
13	Tangent Modulus	5E+08	Pa		
14	Specific Heat Constant Pressure, C _p	875	J kg ⁻¹ C ⁻¹		

a)

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7311	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...			
6	Young's Modulus	246	GPa		
7	Poisson's Ratio	0,323			
8	Bulk Modulus	2,3164E+11	Pa		
9	Shear Modulus	9,2971E+10	Pa		
10	Specific Heat Constant Pressure, C _p	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹		

b)

Figura 31 - Propriedades dos materiais utilizados no modelo do Veículo: a) *Aluminum Alloy NL*; b) *Rubber*.

Por fim, tendo presente os valores associados à massa específica e ao volume de cada uma destas geometrias, atribuiu-se a espessura de modo a que o conjunto em avaliação (composto pela carroçaria e pelas 4 rodas), respeitasse a massa total do veículo exigida pela norma, ou seja, $1\ 500 \pm 75$ kg.

3.3.3 Interações e Contactos

As interações entre corpos (*body interactions*) e contactos (*contacts*) no *software Ansys* encontram-se inseridos na seção referente às conexões (*connections*). Esta seção estabelece o modo como os diversos componentes mecânicos intervenientes na análise interagem entre si, quando em contacto, o que permite representar de forma confiável as situações desenvolvidas durante o evento real. No modelo numérico utilizaram-se dois tipos de contactos, nomeadamente da tipologia ligado (*bonded*) e com existência de atrito (*frictional*) (Figs. 32a) e 32b)).

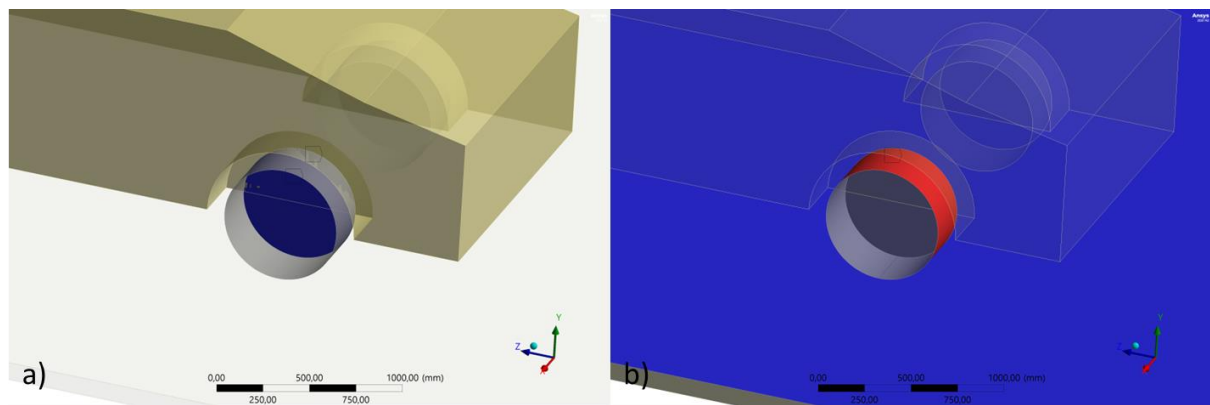


Figura 32 - Representação dos contactos utilizados: a) *Bonded contact*, b) *Frictional contact*.

Os contactos de tipologia ligado (*bonded*) foram atribuídos ao conjunto definido pelas rodas e pelo veículo, permitindo efetuar a sua fixação. Relativamente aos contactos que permitem simular o efeito do atrito (*frictional*), estes foram designados ao conjunto composto pelas rodas e pelo próprio solo/estrada. De salientar o facto de se ter definido um coeficiente de atrito igual a 0,7, de forma a representar a interação existente entre esses elementos (Shen et al., 2008).

No que diz respeito às interações de contacto, estas foram definidas de acordo com a predefinição estabelecida pelo *ansys*, tendo-se mantido a opção sem atrito (*frictionless*).

3.3.4 Criação da Malha de Elementos Finitos

Gerou-se uma malha estruturada do veículo e da parede vertical (Fig. 33), constituídos por elementos de casca, de modo a que posteriormente pudessem ser aplicados na simulação global, num compromisso aceitável entre o esforço computacional requerido e a exatidão dos resultados obtidos. O solo foi modelado com elementos sólidos, formando igualmente uma malha estruturada.

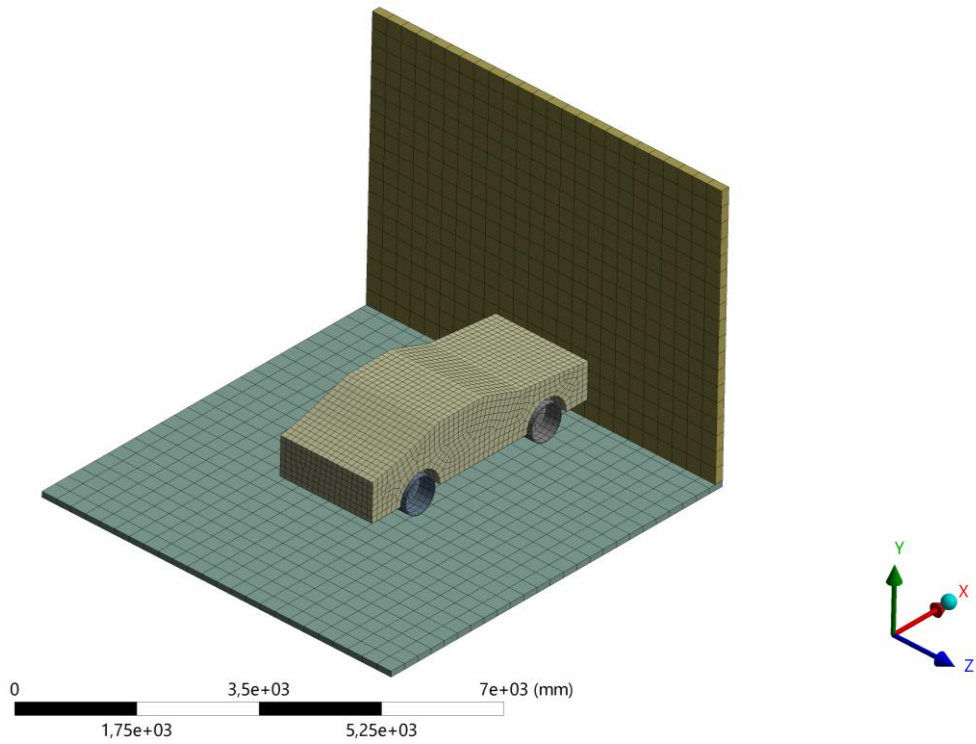
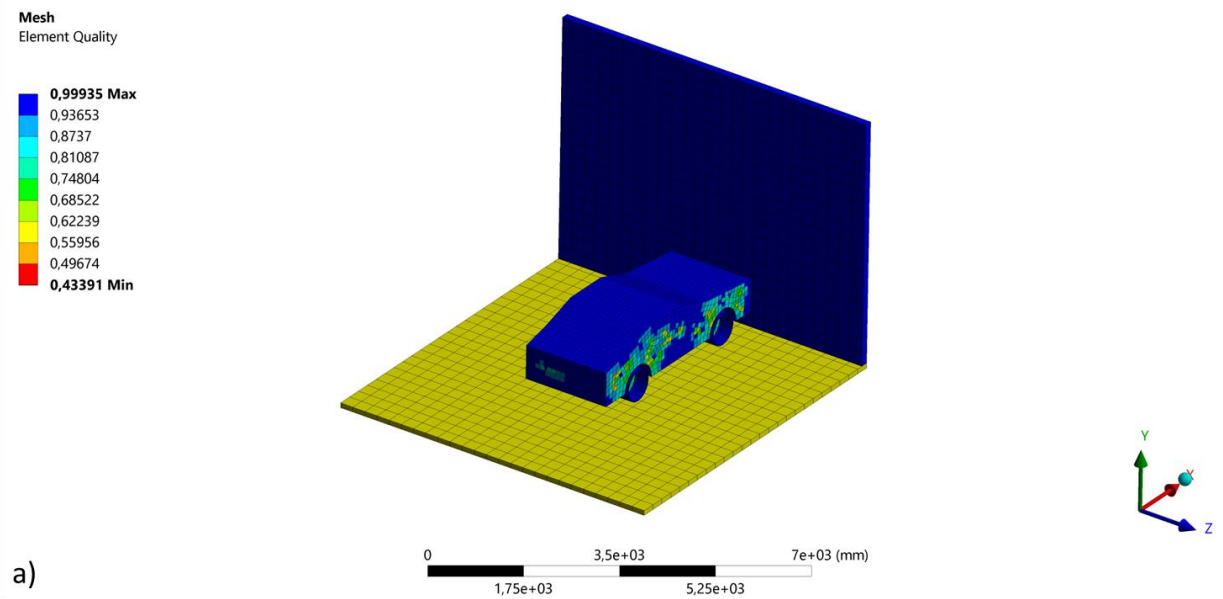


Figura 33 - Malha de elementos finitos aplicada ao modelo do veículo.

A qualidade da malha pode ser avaliada e validada com recurso a um conjunto de funcionalidades oferecidas pelo *software Ansys*, das quais se utilizaram: *Element Quality*, *Orthogonal Quality* e a *Skewness* (Figs. 34a) a c)).



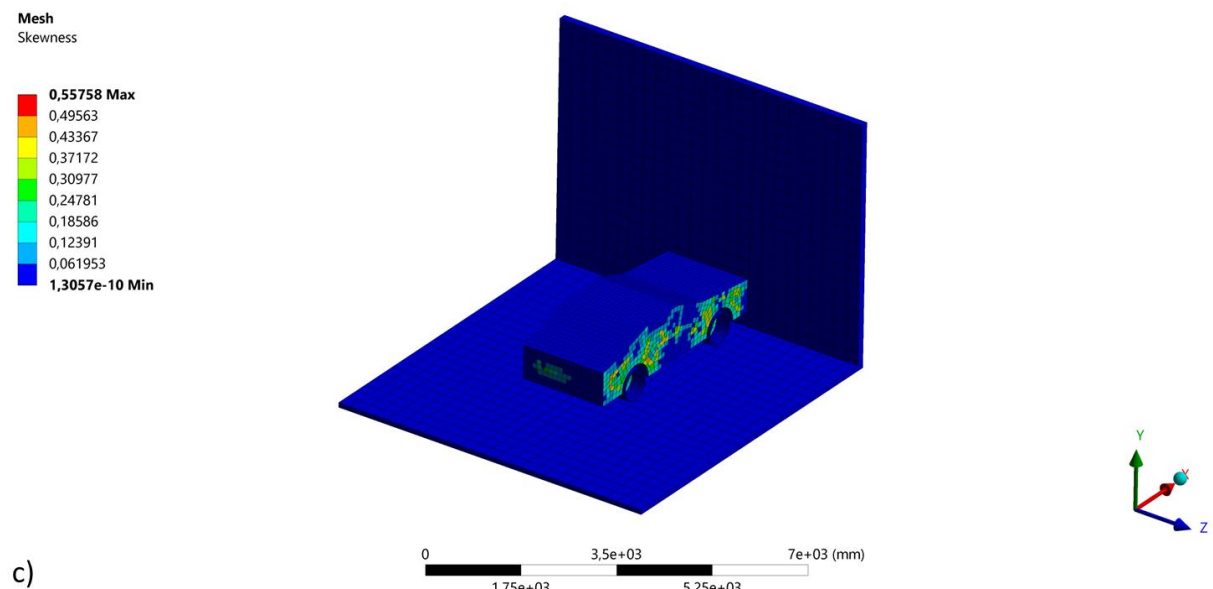
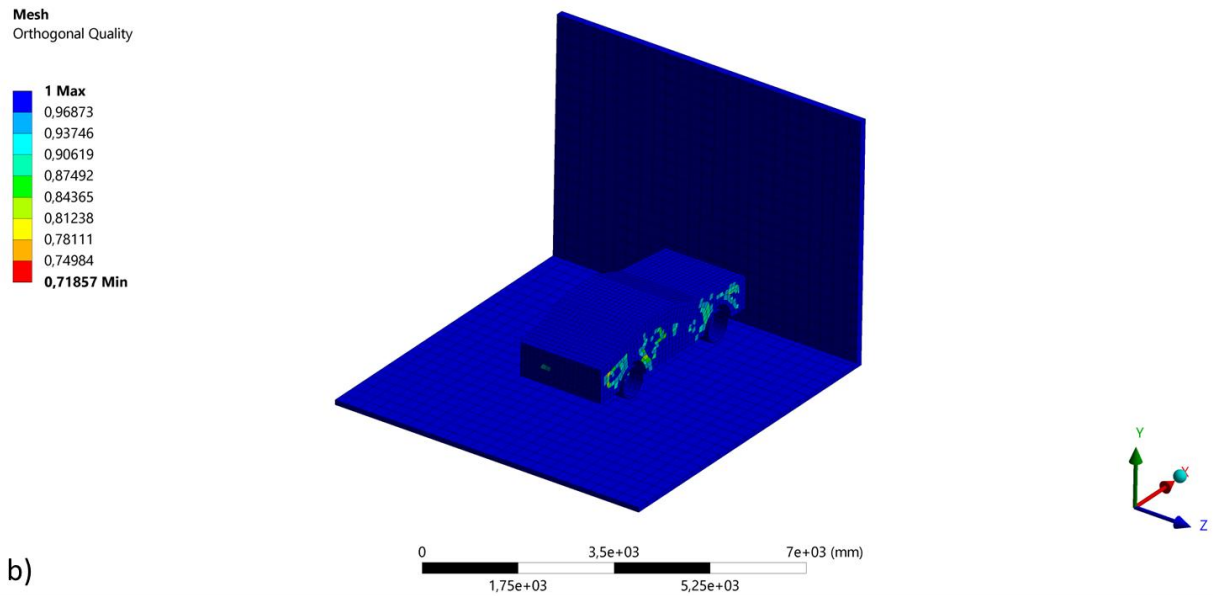


Figura 34 – Modelo do veículo: a) *Element Quality*, b) *Orthogonal Quality*, c) *Skewness*.

Avaliando o campo cromático existente em cada uma das ilustrações das Figuras 34a)-c) é possível concluir que a malha utilizada apresenta uma qualidade desejável para a obtenção dos resultados. Uma vez que o foco desta etapa passa pela avaliação do veículo, é mais importante verificar os resultados que advêm da malha desse modelo, pelo que a informação resultante dos modelos da parede e do solo não apresentam tanto interesse. Assim, de acordo com este procedimento, quanto mais próximo da cor azul se verificar cada uma das figuras, maior qualidade apresentará a malha (estruturada).

A Tabela 11 resume o tipo e o número de elementos finitos utilizados no modelo numérico.

Tabela 11 - Características da malha utilizada no modelo numérico do veículo.

Corpo	Tipo	Designação ¹	Tamanho [mm]
Carroçaria	Casca	Quad4/Tri3	100
Rodas	Casca	Quad4/Tri3	Predefinido
Parede	Casca	Quad4	Predefinido
Solo	Sólidos	Hex8	Predefinido

A informação apresentada anteriormente é igualmente visualizável graficamente, tendo por base a *characteristic length* do modelo (Fig. 35).

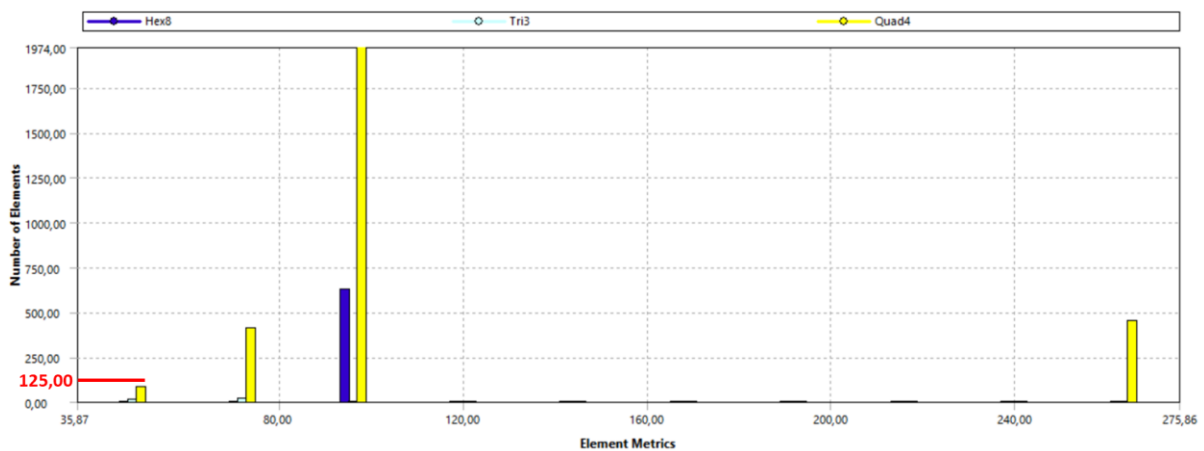


Figura 35 - *Charatheristic length* do Modelo do Veículo.

Tendo por objetivo obter tempos de simulação comportáveis, é necessário analisar o gráfico anteriormente apresentado (Fig. 35), com o propósito de estabelecer uma relação equilibrada entre o menor valor de *element metrics*, neste caso corresponde a 35,87 mm, e o número de elementos (*Number of Elements*) empregues na simulação, neste caso menor do que 125,00. Isto permite concluir que a presente simulação explícita é curta, pelo que apresenta uma duração total de, aproximadamente, 25 a 30 minutos, para um *End Time* definido no valor de 2 s.

Finalmente, o modelo completo é composto por um total de 3 517 elementos e 4 839 nós, distribuídos por elementos 2D (Casca) e 3D (Sólidos).

¹ Quad4: Elemento isoparamétrico de 4 nós; Tri3: Elemento isoparamétrico de 3 nós; Hex8: Elemento hexaédrico de 8 nós.

3.3.5 Condições de Fronteira

As condições de fronteira aplicadas ao presente modelo numérico correspondem a dois encastramentos (*Fixed supports*) e um deslocamento (*Displacement*), realizando ainda a prescrição de uma velocidade (*Velocity*). Para além disso, contabilizou-se ainda a influência da aceleração gravítica. Estas condições têm por objetivo limitar os graus de liberdade associados ao conjunto de nós seleccionados para o efeito em cada análise.

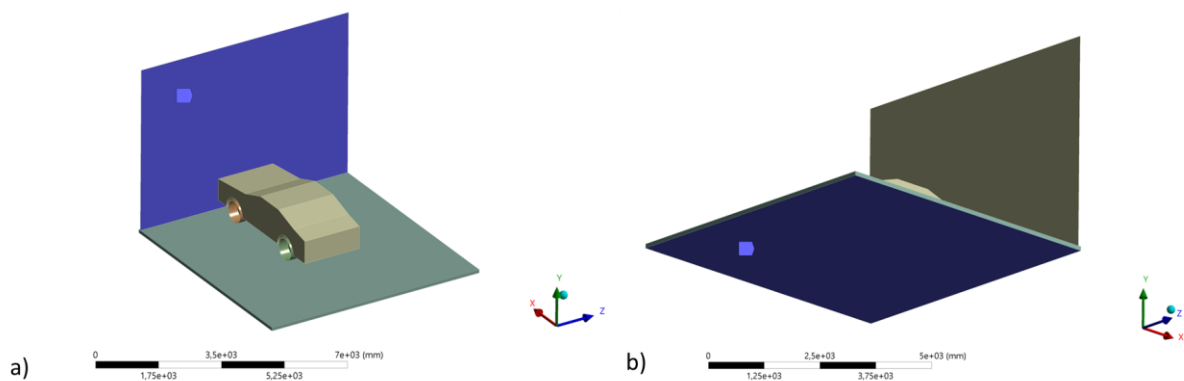


Figura 36 - *Fixed supports*: a) Parede; b) Solo.

Relativamente aos *fixed supports*, verifica-se, pela análise da Figura 36, que estes foram aplicados à parede (definido a partir do corpo/*body*) e ao solo (definido a partir da superfície). As diferenças em termos de definição residem no facto de a parede ter sido modelada como um corpo rígido (*Rigid body*), isto é, não sofre qualquer deformação (permitindo simular um *crash test* frontal com uma barreira rígida), pelo que esse fenómeno é garantido integralmente pelo próprio veículo. Esta opção resulta do facto de se pretender avaliar a capacidade de deformação desse modelo geométrico (i.e. do veículo). Quanto à prescrição de um *fixed support* ao solo, esta consideração surgiu no sentido de evitar a necessidade de definição de um contacto com a parede, para além de funcionar como base de suporte para a aceleração gravítica contabilizada no modelo (Fig. 37).

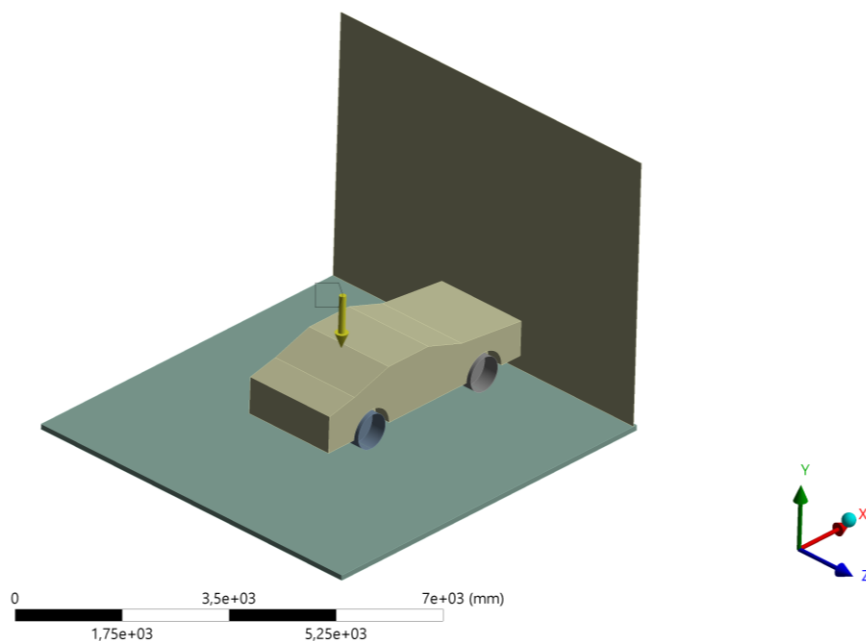


Figura 37 - *Standard Earth Gravity* definida para o modelo do veículo.

A definição da *Standard Earth Gravity* permite contabilizar o efeito que a aceleração gravítica produz nos corpos, tendo sido atribuída a todos os componentes da análise (parede, solo e veículo).

Criou-se ainda uma restrição no movimento do automóvel no sentido vertical (eixo yy), com o objetivo principal de evitar um possível ressalto ou desvio do mesmo aquando do impacto com a parede rígida, de forma a maximizar a absorção de energia por parte do modelo do veículo. Este constrangimento foi promovido às arestas que definem a base da carroçaria do veículo, tendo-se libertado apenas a possibilidade de movimento no eixo xx (normal à parede rígida), como observado na Figura 38.

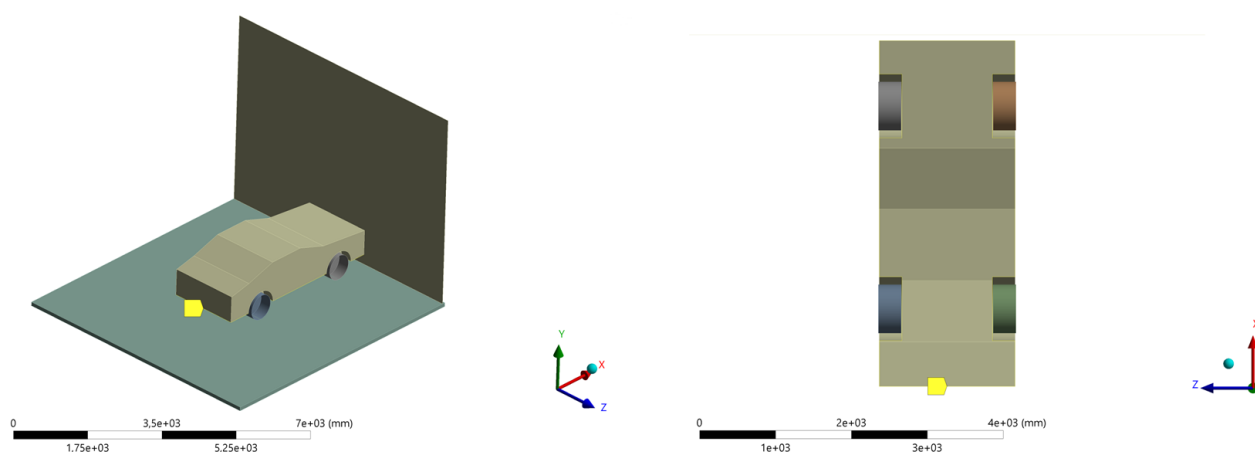


Figura 38 - Ilustração do deslocamento imposto no modelo do veículo.

Por fim, relativamente à velocidade implementada, esta foi atribuída à carroçaria e às 4 rodas do conjunto do veículo, apresentando um valor condizente com a norma EN 1317 para os ensaios TB 32, ou seja, de 110 km/h (Tabela 1), no sentido positivo do eixo xx (Fig. 39).

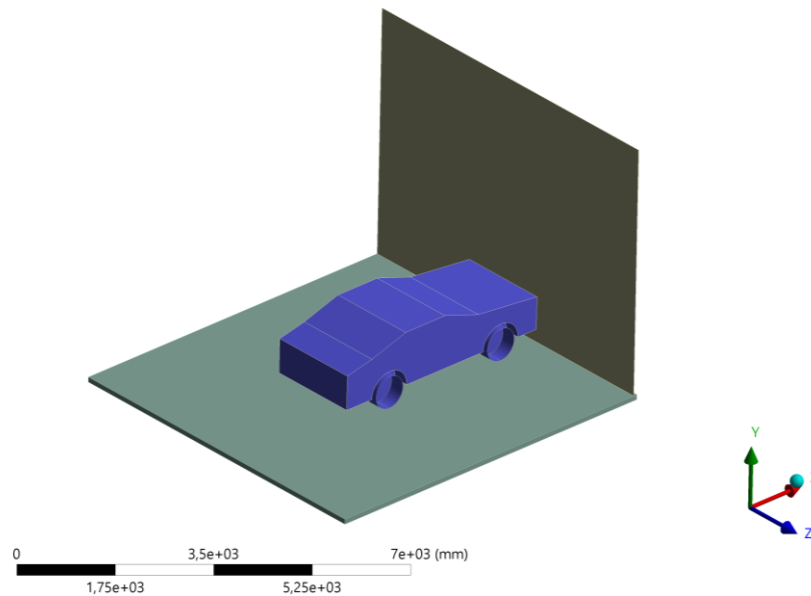


Figura 39 - Ilustração da prescrição da velocidade no modelo do veículo.

3.3.6 Soluções Obtidas

Decorrida a análise foi possível obter um conjunto de resultados que permitiram tirar algumas conclusões acerca da estratégia de modelação geométrica adotada. Visto que o principal objetivo desta validação passou pela avaliação da deformação do modelo utilizado, é relevante retirar conclusões a esse respeito. Assim, os resultados mais relevantes para o presente caso de estudo remetem para os deslocamentos nas direções cartesianas, particularmente segundo a direção do vetor velocidade (*Directional deformation*) e, por fim, a diminuição da velocidade do veículo ao longo do impacto (*Velocity probe*).

Relativamente à evolução da velocidade do veículo ao longo da simulação, esta pode ser analisada na Figura 40.

Evolução da Velocidade Instantânea do Veículo

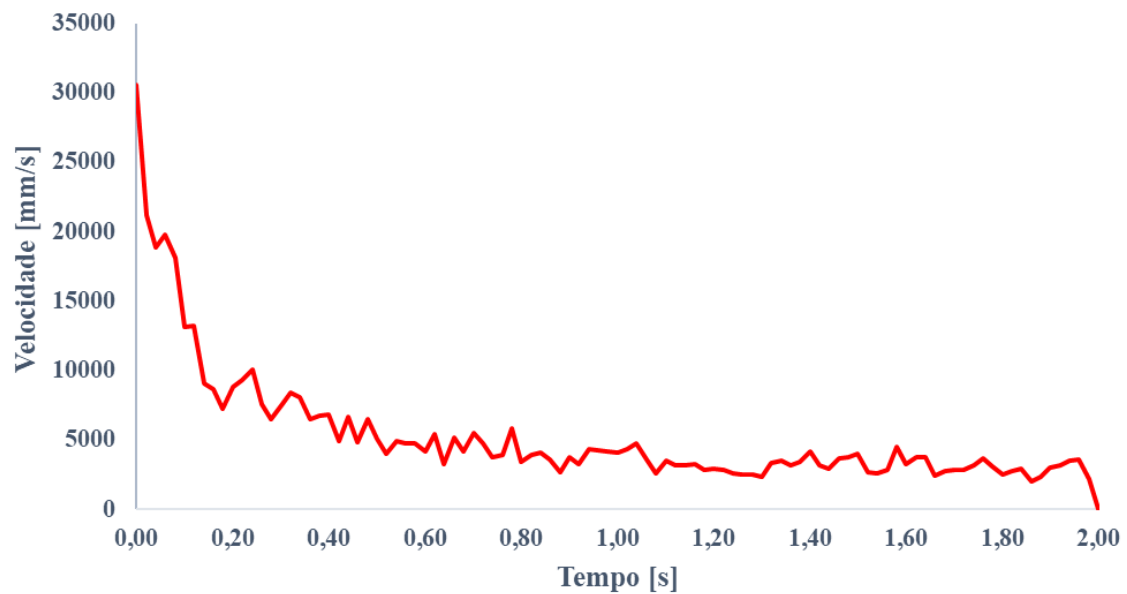


Figura 40 - Evolução gráfica da velocidade do veículo.

Analisando o gráfico, constata-se um decréscimo abrupto da velocidade escalar do veículo nos instantes iniciais (0,20 s), sendo este intervalo de tempo coincidente com os primeiros momentos de embate com a parede rígida, pelo que apresenta coerência com o fenómeno. Posto isto, uma vez concluída a simulação, o veículo apresenta a deformada representada na Figura 41.

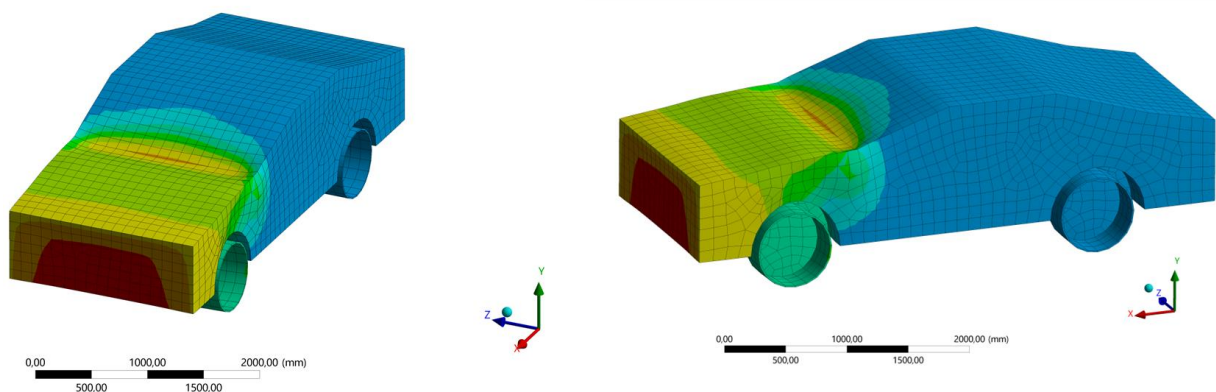


Figura 41 – Campo de deslocamentos gerado no veículo (eixo xx).

Analisando a configuração da deformada representada na Figura 41, constata-se a existência de um efeito espúrio de encurvadura local no veículo, na zona periférica do *capot*. Este fenómeno acontece devido ao facto do modelo do veículo ter sido gerado sob a forma de uma casca, algo que na realidade não se verifica. Assim sendo, tendo presente os resultados obtidos, é possível retirar o valor máximo de

deslocamento que o modelo geométrico adotado para o veículo proporciona, numa condição de impacto frontal com uma parede rígida (Tabela 12).

Tabela 12 - Resultados numéricos obtidos.

Resultado	Valor
Deslocamento máximo [mm]	187,25
Deslocamento após retorno elástico [mm]	144,17
Energia absorvida [mJ]	696 000 000

Analisando os resultados anteriores, conclui-se que o presente modelo geométrico empregue na representação do veículo, quando solicitado na totalidade para absorver a energia existente, apresenta um deslocamento máximo no valor de 187,25 mm. A Figura 42 ilustra um ensaio experimental realizado à escala real por organismos certificados (EuroNCAP), com um modelo semelhante ao utilizado na presente dissertação.

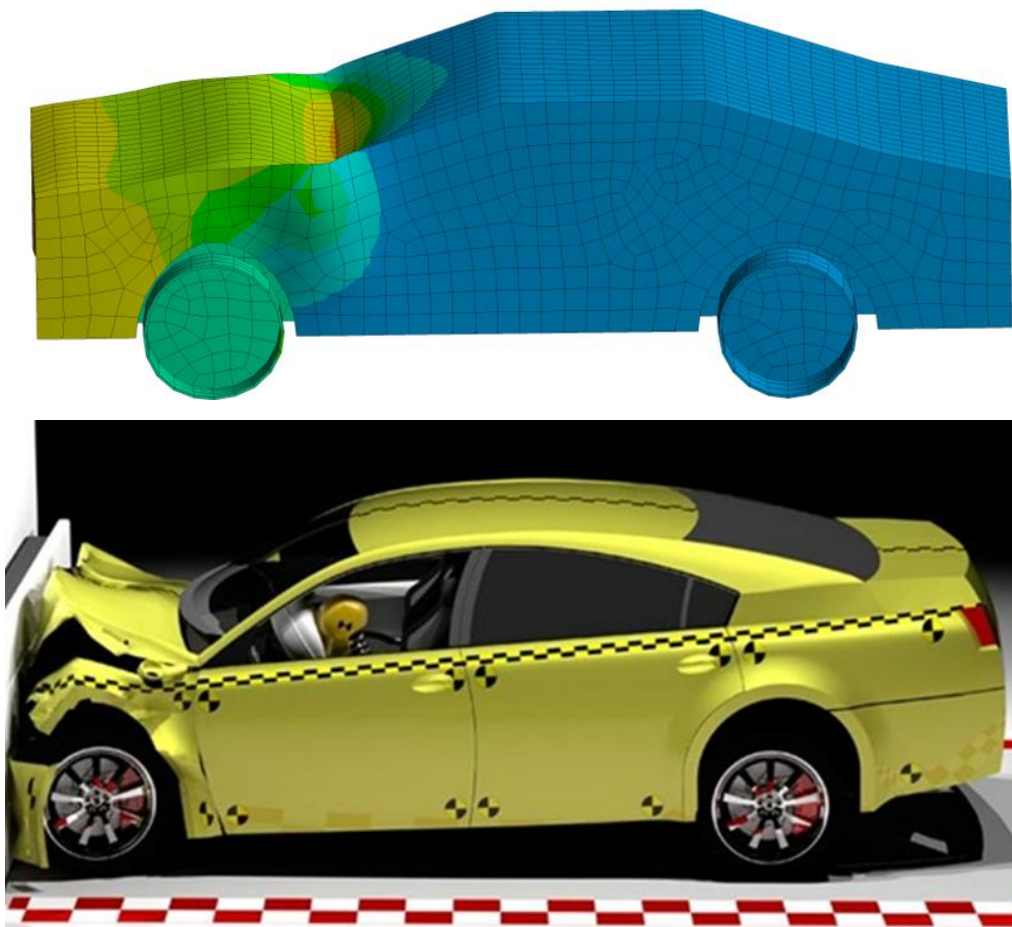


Figura 42 - Comparação qualitativa de resultados (Proteste, 2021).

Finalmente, com base nos resultados obtidos, torna-se possível retirar um conjunto de conclusões acerca do modelo geométrico desenvolvido para o veículo.

- A utilização de um modelo casca é fundamental para garantir o equilíbrio entre o tempo computacional dispendido e a exatidão dos resultados;
- De modo a dissipar a totalidade da energia existente, apenas 4% da geometria se deforma.

Concluindo, o facto do veículo não se deformar significativamente, tal como acontece na realidade, fará com que a barreira seja responsável pela absorção de grande parte da energia envolvida, não sendo esta partilhada com o próprio automóvel. Com isto, constata-se assim que o veículo não apresenta uma geometria totalmente favorável para contribuir ativamente na dissipação da energia existente. Contudo, e ainda que apresente baixa capacidade, este modelo sofre alguma deformação, pelo que poderá ser uma opção viável no sistema.

3.4 Modelo Numérico Global (N2W3)

O presente subcapítulo irá expor o processo responsável pela avaliação global do comportamento mecânico das barreiras de segurança rodoviárias em análise. Serão apresentados os modelos geométricos utilizados e respetivas alterações promovidas aos mesmos, assim como simplificações numéricas responsáveis pela avaliação dos elementos de ligação. Por fim, após indicação dos parâmetros de pré-processamento considerados, realizar-se-á uma análise crítica dos resultados obtidos com a simulação numérica desenvolvida.

3.4.1 Geometria Utilizada

Relativamente à modelação utilizada na avaliação do conjunto, esta é composta pelos diversos elementos intervenientes na análise, desde os componentes mecânicos constituintes da barreira de segurança rodoviária (viga em “W”, viga para proteção de motociclistas, prumo e suspensão em forma de “C”), até ao próprio veículo (Fig. 43).

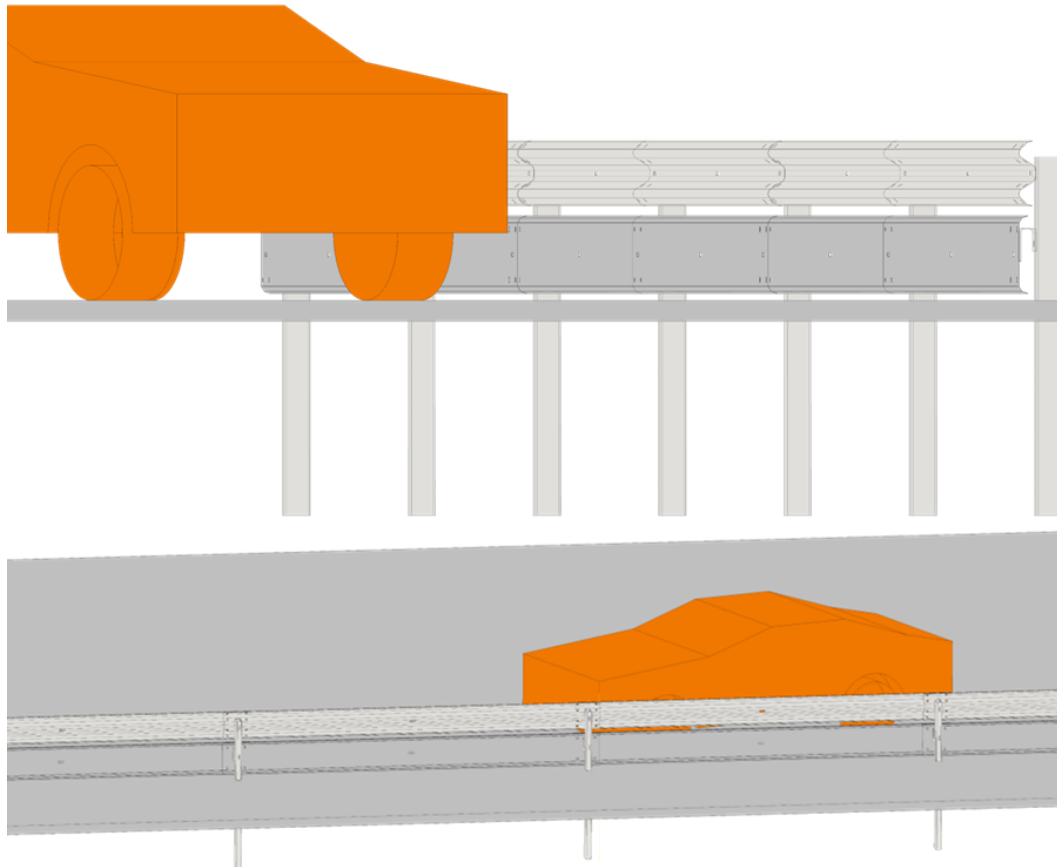


Figura 43 - Modelo da geometria final utilizada.

No que diz respeito às barreiras de segurança rodoviárias, como referido anteriormente, a geometria e dimensões dos elementos constituintes, correspondem a informações provenientes dos modelos desenvolvidos pela empresa Metalgalva S.A., cujos desenhos técnicos podem ser analisados em anexo. Em relação ao veículo, como apresentado na secção 2.4, as suas dimensões advêm de um estudo realizado por (Leikkonen, 2019) na área, tendo sido efetuada uma validação mais pormenorizada do mesmo numa secção precedente (3.3).

Por fim, relativamente à disposição do conjunto pretendeu-se representar as considerações impostas pela norma EN 1317-2 (veículo posicionado com um ângulo de impacto a 20° e a $1/3$ do comprimento total da barreira), o que permite assegurar a validação da análise. Em relação ao seu comprimento, utilizou-se um conjunto composto por 6 barreiras.

3.4.2 Simplificações do Modelo

Devido à complexidade inerente ao modelo a analisar, quer seja associada ao número e geometria dos componentes em análise, quer seja associada ao próprio modelo numérico, torna-se necessário

realizar um conjunto de simplificações, que possibilitem a obtenção da sua solução de forma viável. Assim sendo, essas mesmas simplificações serão expostas sequencialmente na presente seção.

1. Transformação do Modelo Sólido, num Modelo de Casca

A utilização da geometria real torna-se dispendiosa, a nível computacional, para o presente caso de estudo. Posto isto, e tendo como alicerces os pressupostos adquiridos pela revisão bibliográfica realizada (Seção 2.4), o emprego de elementos casca, ao invés de elementos sólidos, pode tornar-se uma alternativa viável na obtenção de resultados coerentes (Fig. 44). Assim, é importante realizar a preparação prévia da geometria sólida, de forma a convertê-la num modelo constituído por cascas. Este procedimento pode ser conseguido com o auxílio do *ansys spaceclaim*, no qual os componentes sólidos são transformados tendo por referência a sua superfície média.

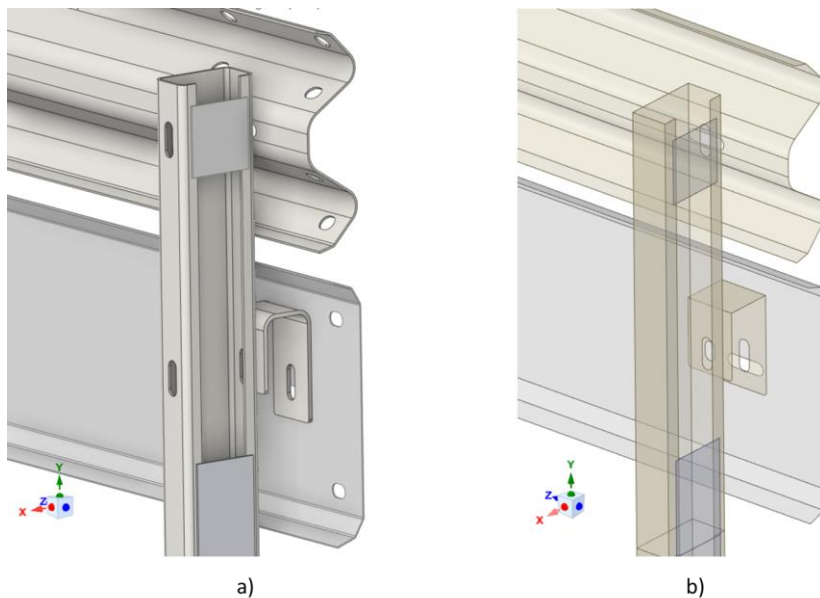


Figura 44 - Processamento realizado: a) Geometria inicial sólida; b) Geometria final casca.

Esta simplificação elimina, fisicamente, a espessura dos componentes mecânicos selecionados pelo que se atinge o fim pretendido, eliminando a necessidade de se utilizarem elementos sólidos na constituição da malha de elementos finitos.

2. Simplificações Geométricas

Levando em consideração o facto da geometria dos componentes apresentar algum detalhe, nomeadamente ao nível dos filetes, bem como pela quantidade e pela forma dos furos que possui, as primeiras simplificações surgiram no sentido de eliminar esses pormenores, considerados não preponderantes nos resultados finais (Tabela 13).

Tabela 13 - Conjunto de simplificações geométricas realizadas.

Componente	Simplificação
Prumo	Filetes (Fig. 45)
	Furos opostos aos utilizados na fixação das vigas (Fig. 45)
Suspensão em "C"	Filetes (Fig. 46)
Viga em "W"	Furo central (Fig. 47)
	Alguns filetes (Fig. 48)
	Furos de ligação (Vigas presentes nas extremidades) (Fig. 49)
DPM	Furo central (Fig. 47)
	Alguns filetes (Fig. 48)
	Furos de ligação (Vigas presentes nas extremidades) (Fig. 49)

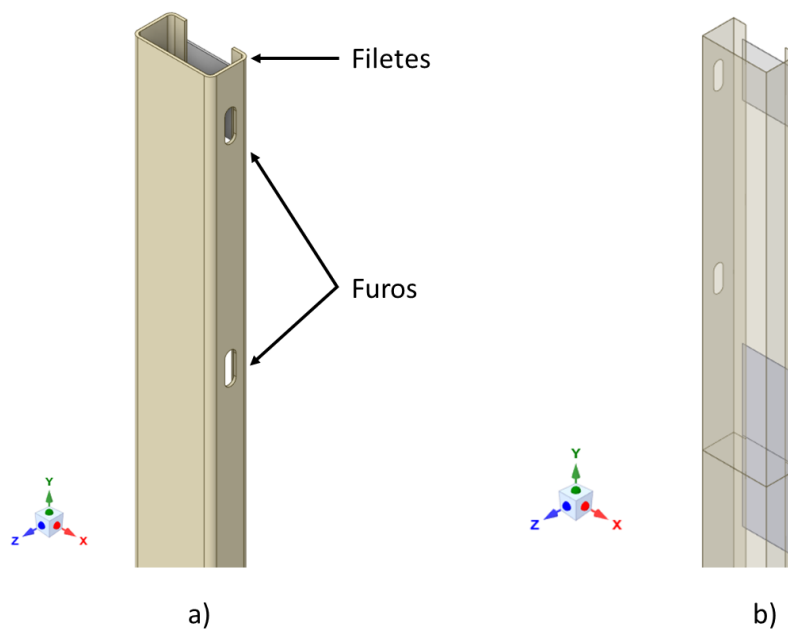


Figura 45 - Processamento realizado: a) Geometria inicial com filetes e furos; b) Geometria final simplificada.

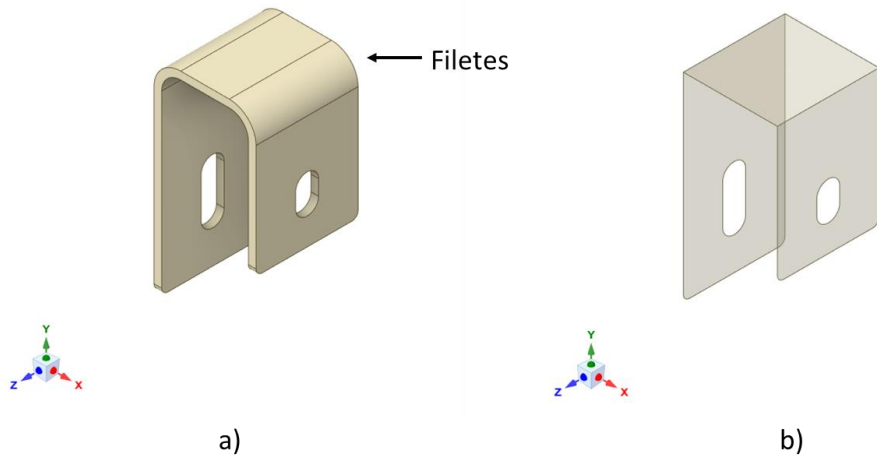


Figura 46 - Processamento realizado: a) Geometria inicial com filetes; b) Geometria final simplificada.

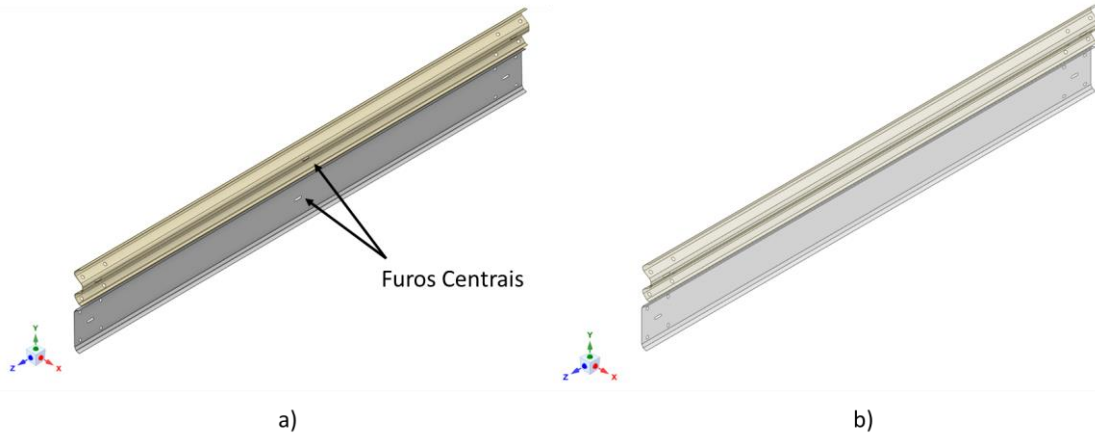


Figura 47 - Processamento realizado: a) Geometria inicial com furos centrais; b) Geometria final simplificada.

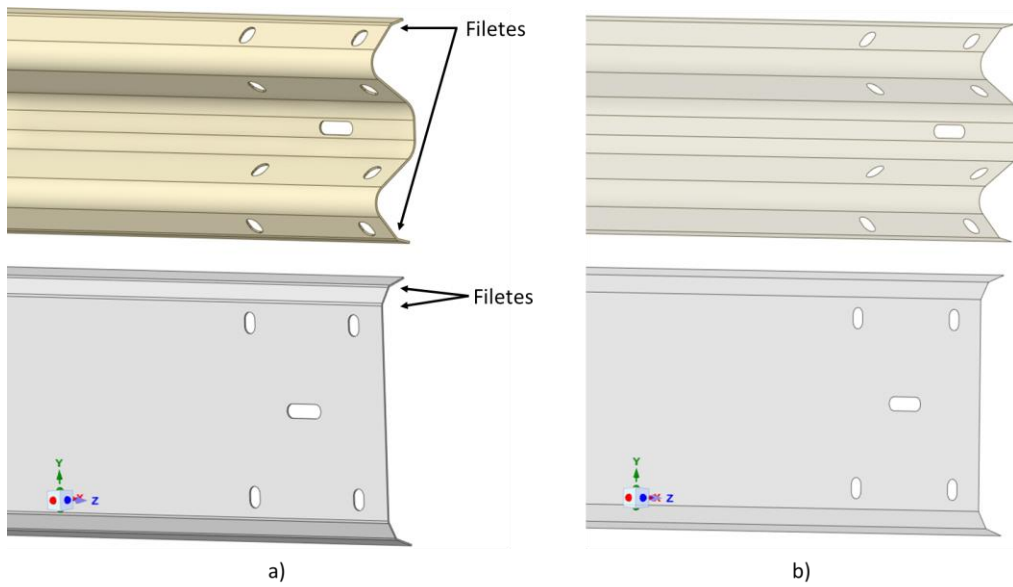


Figura 48 - Processamento realizado: a) Geometria inicial com filetes; b) Geometria final simplificada.

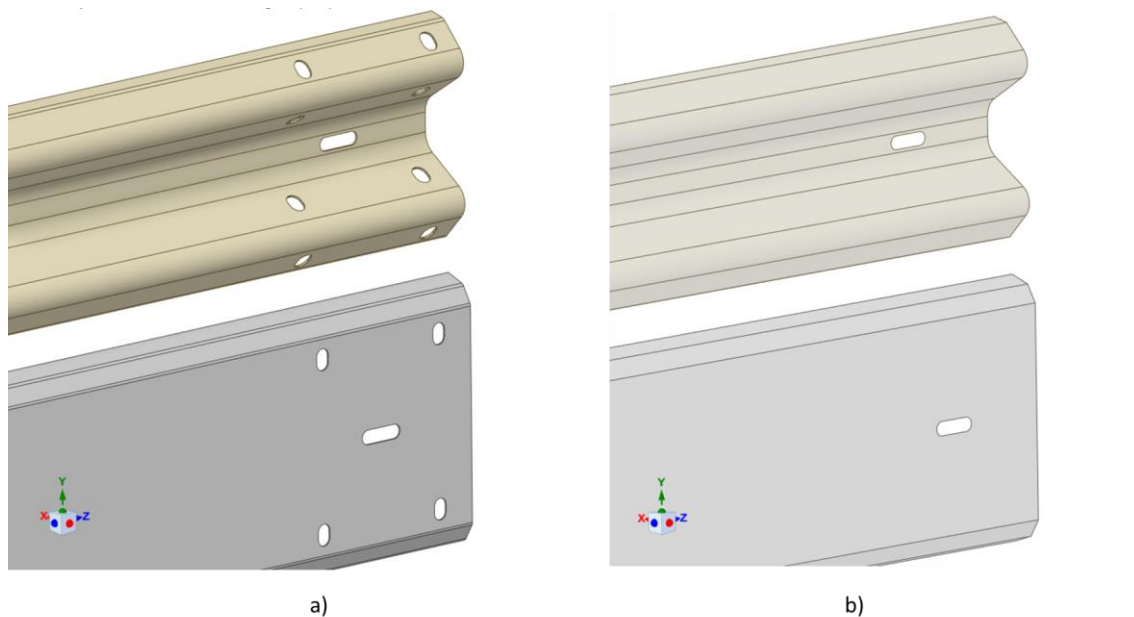


Figura 49 - Processamento realizado: a) Geometria inicial com furos na extremidade; b) Geometria final simplificada.

As eliminações destes detalhes visam contribuir para uma estruturação da malha de forma mais homogênea, evitando ainda a necessidade de se utilizarem diferentes tipos e tamanhos de elementos para se representarem pormenores geométricos algo complexos que, no final, não desempenham um papel relevante a nível estrutural. Além disso, os furos presentes nas extremidades do conjunto das barreiras foram preenchidos, levando em consideração o facto de serem redundantes, no sentido em que não vão necessitar de ser utilizados para ligações adicionais com outras vigas.

3. Simplificações Numéricas

A ligação entre os componentes mecânicos é promovida por intermédio de vários conjuntos de parafusos (Fig. 50).



Figura 50 – Modelação geométrica dos parafusos utilizados para a ligação da suspensão em "C" com o prumo.

A representação física destes elementos de ligação torna-se bastante dispendiosa a nível computacional, pelo que existem procedimentos numéricos aplicáveis, que permitem uma viável reprodução do seu comportamento. Desta forma, tendo por base o trabalho desenvolvido por (Qian et al., 2016), assim como (Endeavos Innovation Inc., 2018), optou-se por realizar a representação das ligações aparafusadas, com o auxílio de elementos de mola (*Spring elements*) (Fig. 51).

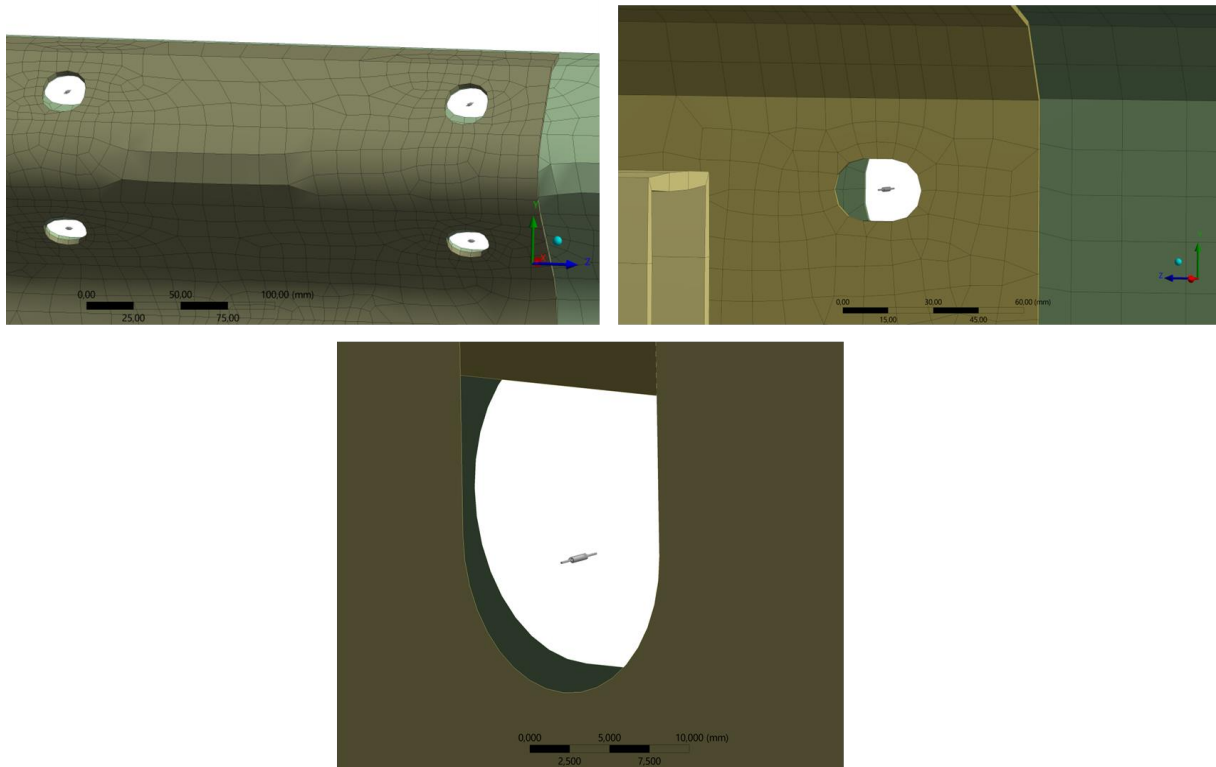


Figura 51 - Ligações aparafusadas promovidas por *springs*.

As *springs* não são mais do que um elemento elástico, que retorna à sua forma original após removidos os esforços atuantes, podendo ser utilizado para estabelecer dois tipos de ligações: *body-to-body* (utilizada) ou *body-to-ground*. Uma das vantagens da utilização deste tipo de elementos, passa pela possibilidade de se caracterizar a sua rigidez, através da atribuição do parâmetro referente à sua *longitudinal stiffness* (tendo-se atribuído um valor de 750 000 N/mm, a cada um destes elementos). Além disso, como os parafusos estarão submetidos, ao longo do seu funcionamento, a esforços de tração e compressão, o comportamento (*spring behavior*) das molas foi definido de modo a respeitar estas solicitações (ANSYS, 2020). De referir que, dentro do módulo *explicit dynamics*, a atribuição de uma pré-tensão aos parafusos não é possível, pelo que a sua influência foi desconsiderada.

Contudo, a utilização das *springs* surge associada à necessidade de se definirem *remote points* que, por sua vez, se encontrarão relacionados com as geometrias a conectar, neste caso associados às arestas que definem as furações, permitindo o estabelecimento final dos elementos de ligação (Fig. 52).

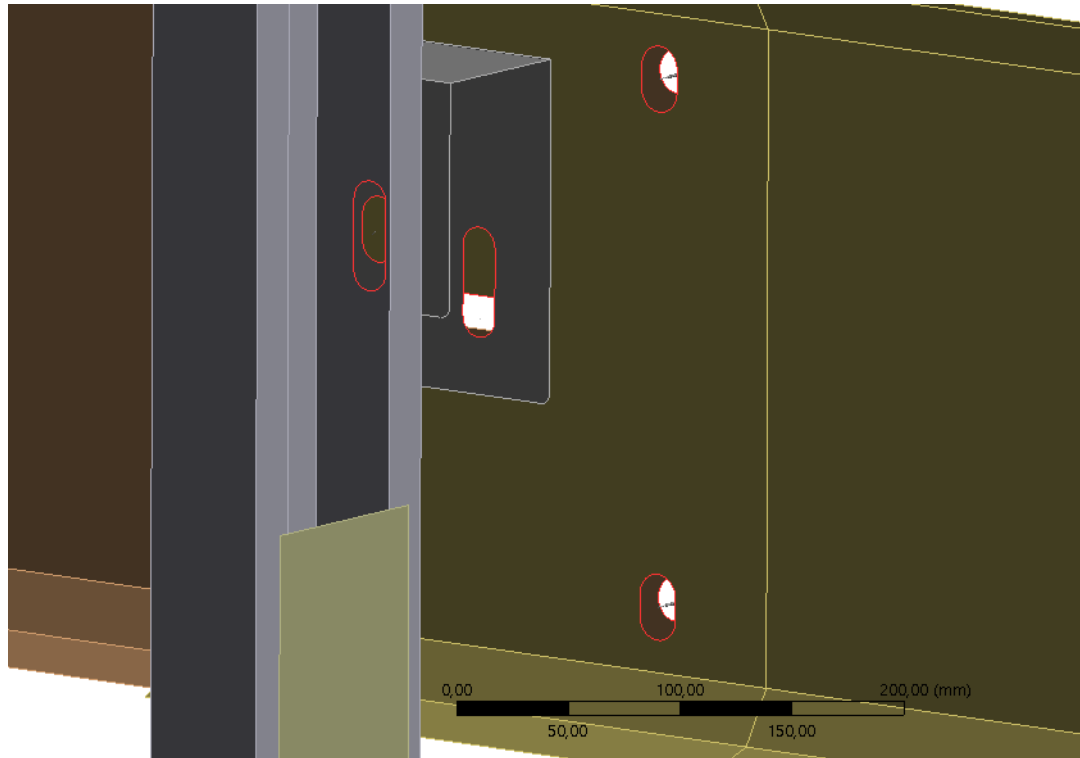


Figura 52 - Representação dos *remote points*, nas arestas dos furos (a vermelho).

Os *remote points* representam assim um método auxiliar que permite eliminar a necessidade de se utilizarem modelos sólidos, bastando apenas a presença de faces, vértices ou arestas. Após aplicados e associados às respetivas conexões, neste caso *springs*, o próprio *solver* utiliza equações multi-ponto (MPC), que irão governar a solução. De referir que o comportamento dos *remote points* deve ser obrigatoriamente definido como rígido.

4. Comportamento dos Corpos

Em relação aos componentes que constituem as barreiras de segurança, tendo presente o facto de que correspondem ao principal objeto de avaliação, o seu comportamento deve ser considerado como deformável. Por sua vez, em relação ao veículo, visto que este também apresenta alguma responsabilidade na tarefa relacionada com a dissipação de energia, o mesmo também deveria assumir um comportamento deformável. Porém, após realização das primeiras simulações numéricas, constataram-se alguns erros associados a interpenetrações existentes entre o próprio automóvel e as barreiras (Fig. 53).

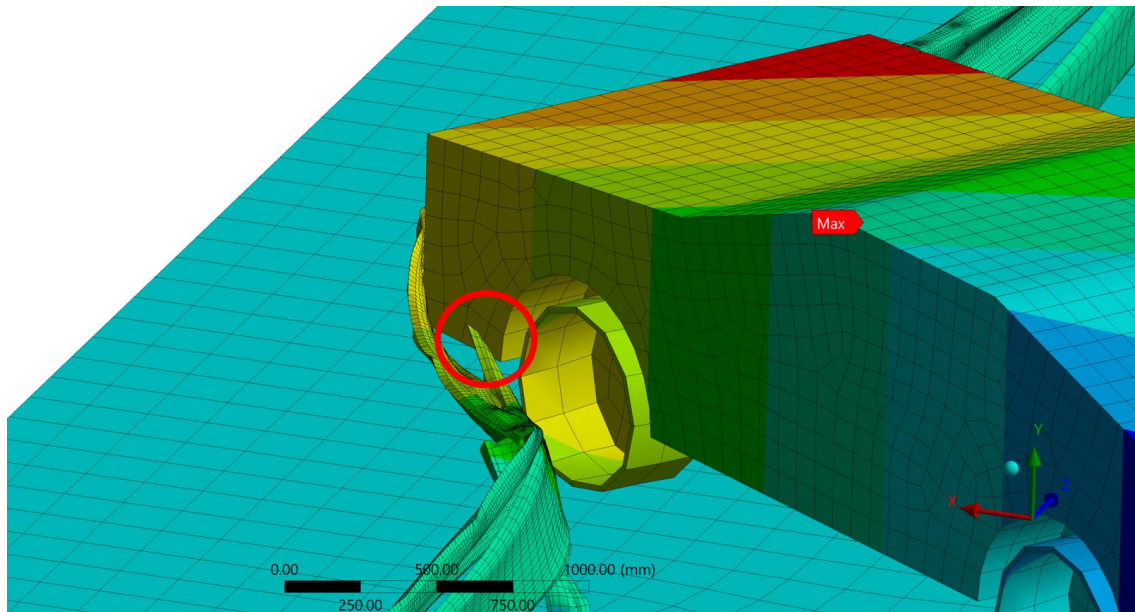


Figura 53 - Interpenetração existente entre o carro e a viga.

Esta problemática gera resultados irrealistas, não só pela penetração existente na barreira, mas também pelo facto de conferir deformações adicionais ao sistema, inexistentes em situação real.

Posto isto, a solução encontrada passou pela atribuição de um comportamento rígido à carroçaria do veículo, resolvendo de forma permanente esta contrariedade.

Deste modo, a implementação de um comportamento rígido ao automóvel, elimina a sua capacidade de deformação (tanto elástica, como plástica), pelo que não existe a necessidade de se definir uma lei de plasticidade para o modelo, havendo apenas a preocupação de se atribuir o valor da massa específica correta, de forma a assegurar o cumprimento da massa segundo a norma (ANSYS, 2012). Por outro lado, definiu-se a posição do centro de massa do veículo (através da funcionalidade *point mass* do ANSYS). Estes procedimentos não se traduziram em alterações sensíveis da deformação registada no modelo do veículo.

3.4.3 Propriedades dos Materiais

Os materiais utilizados e as leis constitutivas que os definem, como tem vindo a ser abordado, assumem elevada preponderância na resposta final do conjunto. Posto isto, tendo em conta o facto de que a totalidade dos materiais utilizados, assim como as suas propriedades, já foram anteriormente apresentados na seção 3.2 de forma detalhada, a Tabela 14 terá a responsabilidade de os expor de forma sumária.

Tabela 14 - Materiais Utilizados e respectivos Componentes.

Componente	Material	Modelo do Material	Seção
Prumo	S355	<i>Johnson-Cook Strength</i>	3.2.1
Placa Rígida			3.2.1
Viga em “W”			3.2.1
DPM			3.2.1
Suspensão em “C”	S275	<i>Multilinear Isotropic Hardening</i>	3.2.2
Carroçaria	<i>Aluminum Alloy NL</i>	<i>Bilinear Isotropic Hardening</i>	3.4.2
Rodas	<i>Rubber</i>	<i>Isotropic Elasticity</i>	3.4.2
Solo	<i>Soil</i>	-	3.5.3

Em relação ao solo utilizado na presente simulação numérica, uma vez que este não é objeto de estudo, nem apresenta uma influência direta nos resultados finais, servindo apenas para permitir a atribuição do coeficiente de atrito entre este e as rodas, foram-lhe atribuídas propriedades que o tornassem infinitamente rígido, através da alteração dos parâmetros relativos à sua massa específica (de forma a maximizar a massa total) e ao módulo de elasticidade. Este procedimento poderia ter sido efetuado igualmente através da sua definição como *rigid body*.

3.4.4 Interações e contactos

As interações entre corpos (*body interactions*) e os contactos (*contacts*) correspondem ao método como os contactos desenvolvidos entre os diferentes corpos se estabelecem ao longo da simulação numérica. Assim sendo, estas interações detetam automaticamente a influência mútua entre os corpos que poderão vir a entrar em contacto durante a análise. Por sua vez, os contactos definem a relação existente entre corpos que já se encontram em contacto nos momentos iniciais da análise. Desta forma, nesta fase estabelece-se o comportamento desenvolvido pelas superfícies em contacto durante o impacto, evitando alguns problemas numéricos como, por exemplo, a ocorrência de interpenetrações. Os contactos inicialmente conhecidos dizem respeito, essencialmente, aos existentes entre as rodas e o veículo, bem como entre as rodas e o solo, pelo que estes foram automaticamente definidos (Fig. 54).

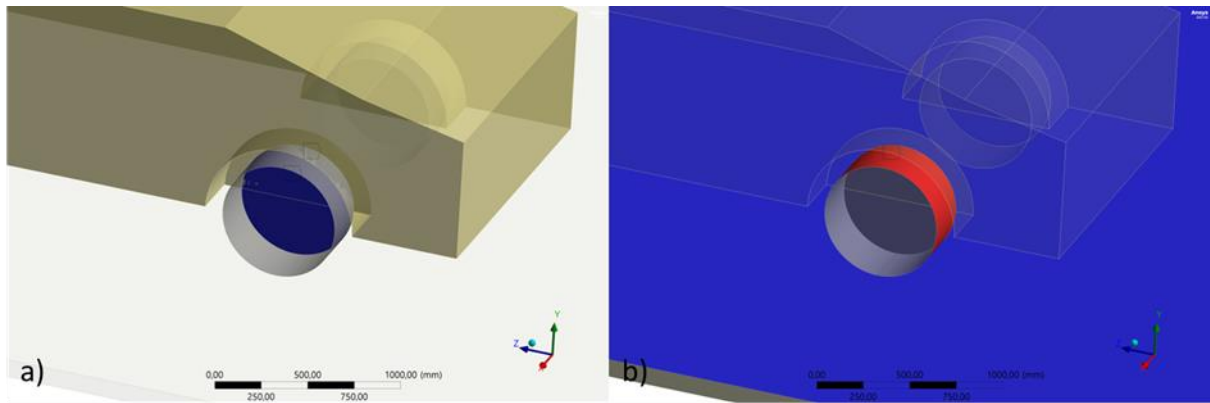


Figura 54 - Representação dos contactos utilizados: a) *Bonded contact*, b) *Frictional contact*.

Estes contactos são de tipologia ligado (*bonded*), estabelecidos entre a carroçaria e as rodas, pelo que fixam os rodados ao próprio veículo durante a análise, e de atrito (*frictional*), pelo que permitem simular o atrito existente entre o solo e as rodas do veículo. O coeficiente de atrito atribuído assumiu um valor de 0,7 (Shen et al., 2008). Foram, portanto, introduzidos manualmente um total de 8 pares, sendo que os restantes contactos detetados previamente pelo programa, foram desativados, surgindo do facto de alguns dos elementos mecânicos, aquando da sua união, apresentarem um pequeno afastamento (*offset*), pelo que não se encontram diretamente em contacto na fase inicial da simulação e, por isso, a sua contabilização pode ser atingida com recurso às interações definidas no modelo (*body interactions*) (Figs. 55 e 56).

[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	wheel2_LuisSerra\Srf3
Target Bodies	solo_to_solo_prumo\Solid21
Contact Shell Face	Bottom
Shell Thickness Effect	No
Protected	No
[-] Definition	
Type	Frictional
Friction Coefficient	0,7
Dynamic Coefficient	0,
Decay Constant	0,
Scope Mode	Automatic
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Trim Tolerance	27,513 mm
Suppressed	No

a)

[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	wheel2_LuisSerra\Srf3
Target Bodies	simplesurfacecar2\Srf1
Contact Shell Face	Program Controlled
Target Shell Face	Program Controlled
Shell Thickness Effect	No
Protected	No
[-] Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Maximum Offset	1,e-004 mm
Breakable	No
Suppressed	No

b)

Figura 55 - Detalhes dos contactos estabelecidos manualmente: a) *Frictional*, b) *Bonded*.

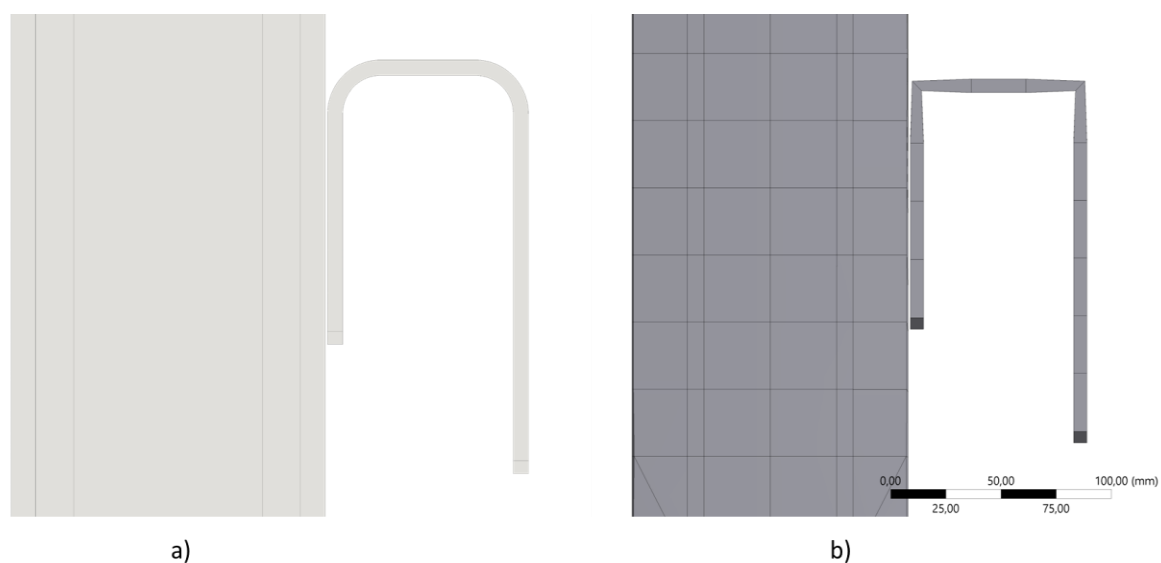


Figura 56 - Offsets: a) *Inventor*; b) Após estruturação da malha no *Ansys*.

Relativamente à possibilidade de se ativar a função associada ao *shell thickness effect*, esta inicialmente foi considerada. Contudo, após algumas revisões da literatura, concluiu-se que não teria influência sobre os resultados finais (SimuTech, 2022).

Por fim, em relação às interações de corpo (*body interactions*), optou-se por aceitar a pré-definição atribuída pelo *Ansys*, na qual a detecção automática dos contactos desenvolvidos ao longo da análise é processada de acordo com o tipo sem atrito (*frictionless*), concedida à totalidade dos corpos.

3.4.5 Criação da Malha de Elementos Finitos

A malha de elementos finitos utilizada nos modelos numéricos, representa uma etapa fundamental na obtenção de resultados realistas e com grande aproximação de resultados aos verificados experimentalmente. Para além disso, é imperativo estabelecer-se uma relação otimizada entre o tempo de processamento e a exatidão dos resultados, pelo que a malha apresenta um papel fulcral nesse equilíbrio. A Figura 57 apresenta a malha global utilizada no conjunto.

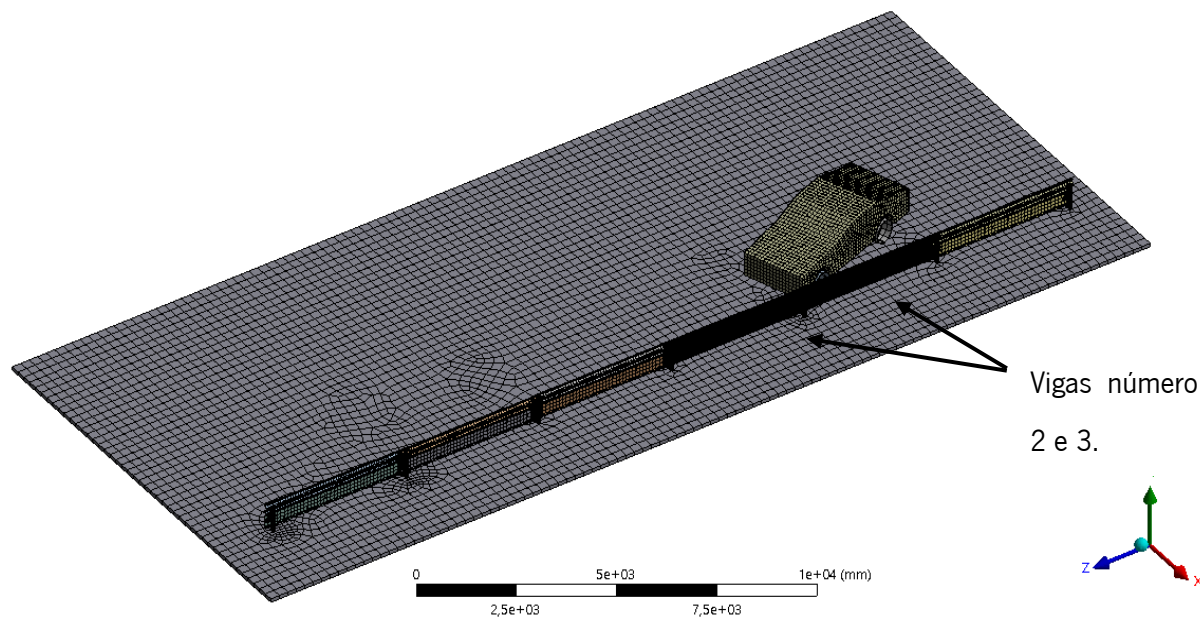


Figura 57 - Malha de elementos finitos aplicada ao modelo global (N2W3).

Todos os elementos representados no modelo geométrico desempenham um papel relevante no comportamento global do conjunto das barreiras de segurança rodoviária. Contudo, é de salientar o facto de que, tanto na presente simulação como nos casos reais observados no quotidiano, alguns desses elementos mecânicos irão revelar-se mais ativos do que outros no processo de dissipação de energia, nomeadamente os que são responsáveis por sofrer não só o primeiro momento de impacto, mas também os subsequentes. Nesse sentido, um refinamento de malha mais pronunciado foi atribuído às vigas responsáveis por susterm esses primeiros eventos (Viga “W” número 2 e 3), alargando-se posteriormente aos restantes elementos de dissipação da energia primária existentes nesses conjuntos, ou seja, aos DPM número 2 e 3, como pode ser observado na Figura 58. Relativamente aos prumos, às placas e à suspensão, estes apresentam um refinamento semelhante entre todos os componentes, pelo que não existem quaisquer dispositivos mais ou menos refinados em relação a outros.

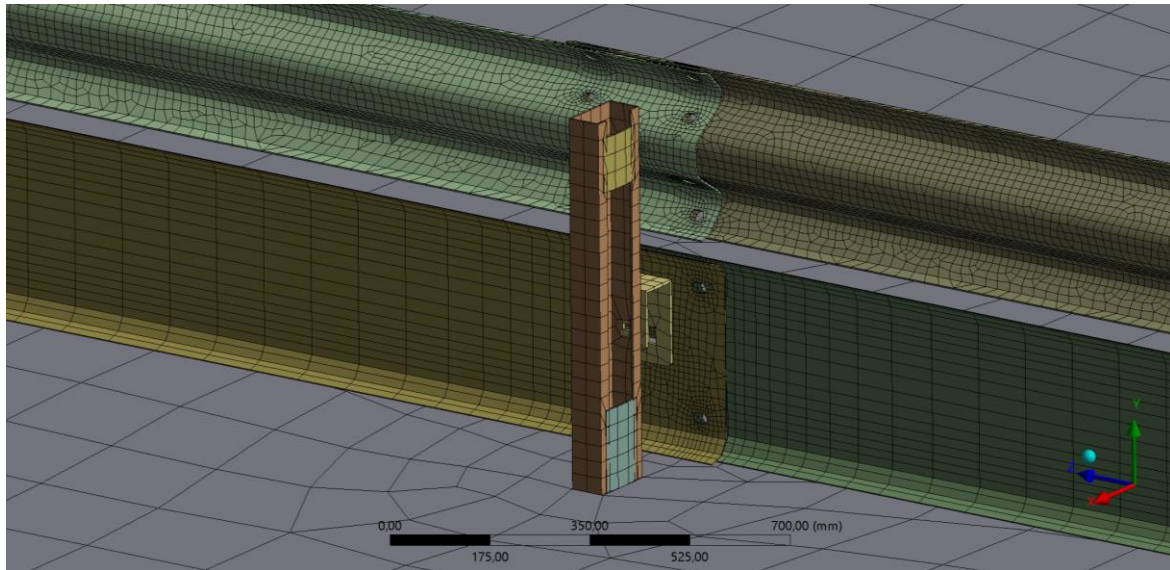


Figura 58 - Refinamento de malha aplicado.

É possível verificar o tamanho reduzido de elementos utilizado na composição de cada uma das vigas, permitindo uma reprodução bastante positiva não só dos furos, mas também das curvaturas que caracterizam cada um destes elementos responsáveis pela dissipação de energia.

Relativamente ao conjunto composto pelo prumo e placas responsáveis por conferir rigidez e resistência à estrutura, foi-lhes atribuído um tamanho de elemento capaz de gerar igualmente resultados satisfatórios (cerca de 30 mm). Para além disso, o método de conexão/contacto estabelecido entre esses 3 corpos, passou pela utilização de uma *mesh connection* (Fig. 59).

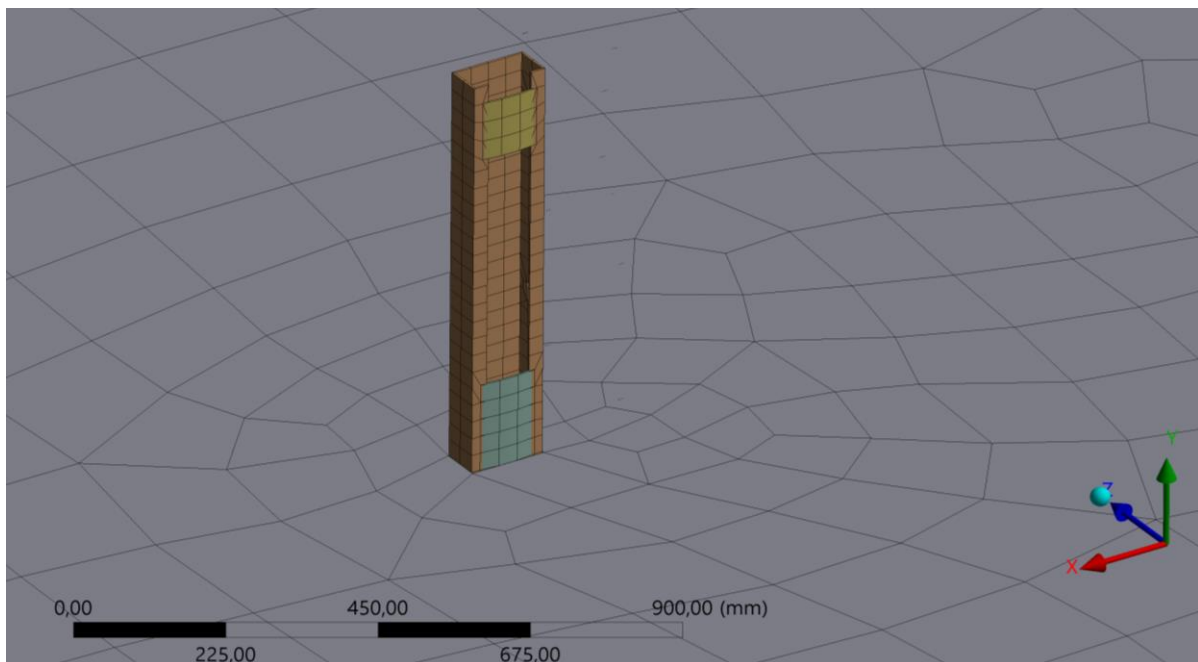
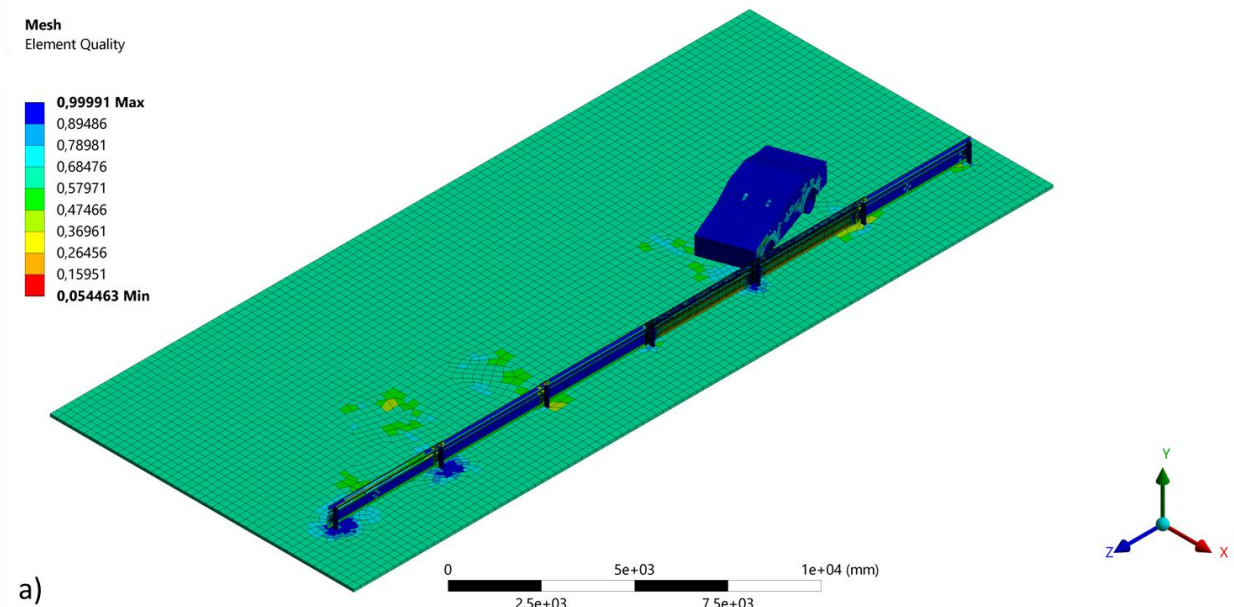


Figura 59 - *Mesh connection* aplicado ao conjunto formado pelos prumos e placas (N2W3).

A *mesh connection* corresponde a um procedimento capaz de unir *surface bodies* que se encontrem topologicamente desconectados, tendo por base as malhas associadas a cada um deles (ANSYS, 2012). A qualidade desta ligação é fortemente dependente do tamanho de elemento utilizado, bem como das diferenças existentes entre a malha de elementos aplicada aos diferentes corpos a unir. Deste modo, devem ser levados em consideração dois aspetos, visando obter-se uma correta ligação através das malhas:

- O refinamento de malha dos corpos a conectar deve ser o adequado, estruturando corretamente a geometria;
- O tamanho de elemento atribuído aos corpos a unir deverá ser o mais semelhante possível.

Todos estes pressupostos apresentados anteriormente podem ser avaliados e validados com recurso a um conjunto de funcionalidades oferecidas pelo ANSYS, das quais se utilizaram: *Element Quality*, *Orthogonal Quality* e a *Skewness* (Fig. 60).



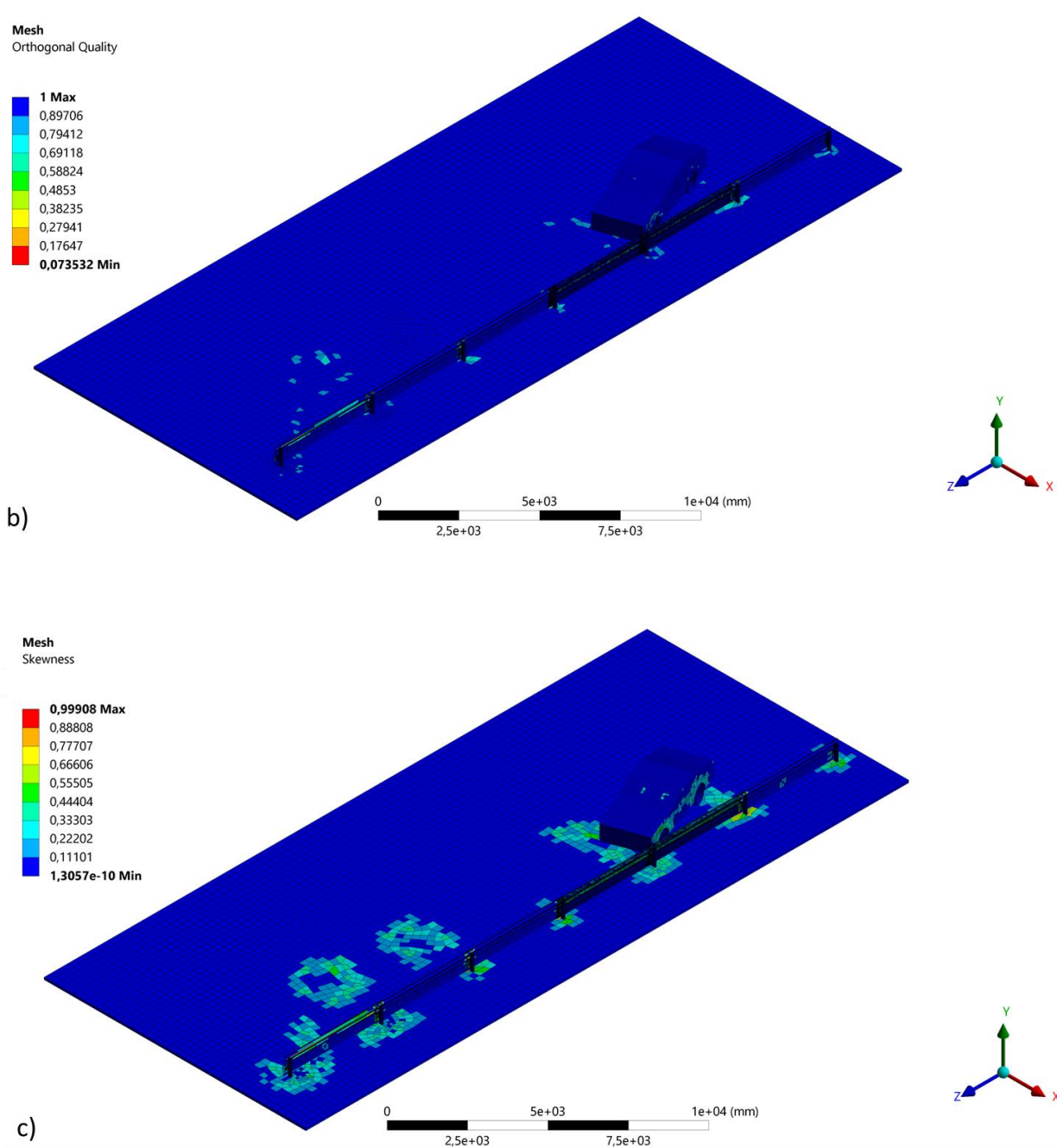


Figura 60 – Modelo global: a) *Element Quality*; b) *Orthogonal Quality*; c) *Skewness*.

Avaliando o campo cromático existente em cada uma das ilustrações é possível concluir que, ainda que de uma forma não totalmente ideal, a malha utilizada apresenta uma qualidade desejável na obtenção de resultados fidedignos. Assim, quanto mais extensa for a área pigmentada a azul, em resultado da aplicação deste procedimento, mais adequada será a malha estruturada.

Posto isto, no que diz respeito ao tipo e número de elementos utilizados, assim como ao método aplicado na geração da malha de elementos finitos, esta informação encontra-se detalhada na Tabela 15.

Tabela 15 - Características da malha utilizada no modelo numérico.

Corpo	Tipo	Designação	Método	Tamanho [mm]
Prumo	Casca	Tri3 e Quad4	<i>Multizone</i>	30
Placas/Chapas	Casca	Quad4		30
Suspensão	Casca	Tri3 e Quad4		25
Viga "W" 2	Casca	Tri3 e Quad4		Predefinido
Viga "W" 3	Casca	Tri3 e Quad4		Predefinido
Viga "W" Restantes	Casca	Tri3 e Quad4		75
DPM 2	Casca	Tri3 e Quad4		<i>Multizone</i>
DPM 3	Casca	Tri3 e Quad4	<i>Multizone</i>	Predefinido
DPM Restantes	Casca	Tri3 e Quad4	<i>Multizone</i>	100
Solo	Sólido	Hex8 e Wed6		Predefinido
Carro	Casca	Tri3 e Quad4		100
Rodas	Casca	Tri3 e Quad4		Predefinido

De referir que, em relação às DPM número 2 e 3, a malha predefinida foi apenas atribuída nas zonas de contacto entre vigas, isto é, na zona periférica aos furos, com o auxílio de partições, sendo que a zona central foi estruturada com uma malha formada por elementos de tamanho igual a 100 mm. A informação apresentada anteriormente é igualmente visualizável graficamente, oferecendo ainda a possibilidade de estimar a duração do processo de simulação, tendo por base uma opção denominada por *characteristic length* (Fig. 61).

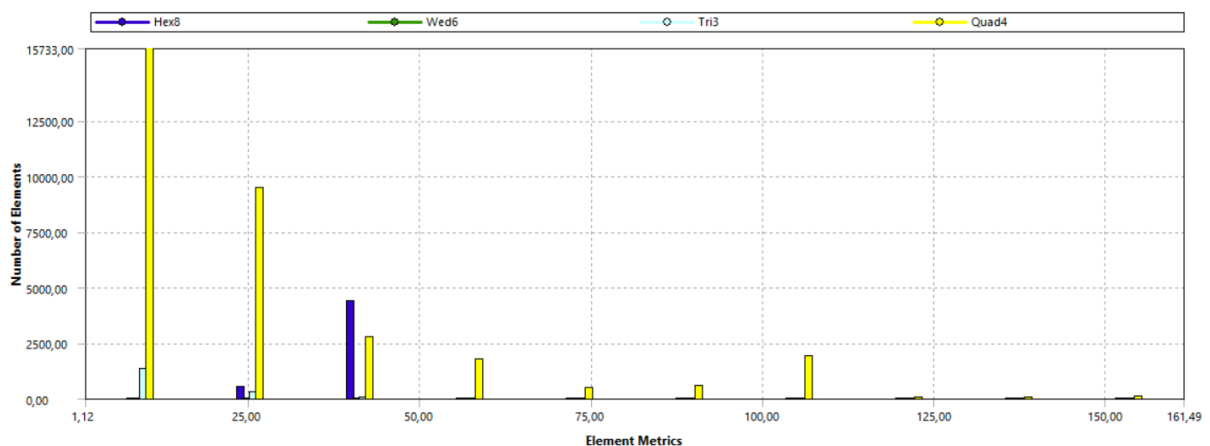


Figura 61 - *Charatheristic length* do modelo global.

Assim sendo, de forma a se obterem tempos de simulação admissíveis, é necessário analisar o gráfico apresentado na Figura 61, com o objetivo de estabelecer uma relação equilibrada entre o menor *element metrics*, neste caso corresponde a 1,12 mm, e o número de elementos (*Number of elements*) associados à mesma malha, neste caso 15 733. Além disso, utilizou-se um tipo de análise preferencial designada por *Low Velocity*, assim como um erro de energia máximo no valor de 0,5, associado a um número de ciclos máximo de $1e^{+07}$ e à funcionalidade de *mass scaling*.

Finalmente, o modelo completo é composto por um total de 39 378 elementos e 46 090 nós, distribuídos por elementos 2D (de casca) e 3D (sólidos).

3.4.6 Condições de Fronteira

As condições de fronteira aplicadas ao presente modelo numérico correspondem a dois encastramentos (*Fixed supports*), um deslocamento prescrito (*Displacement*) e à prescrição de uma velocidade (*Velocity*). De forma idêntica ao realizado na validação do modelo do veículo, utilizou-se a funcionalidade *standard earth gravity*. Assim, os encastramentos foram aplicados ao solo e ao conjunto definido pelos prumos e pela placa inferior, havendo a necessidade de se realizar um pré-processamento geométrico a estes últimos componentes (Fig. 62).

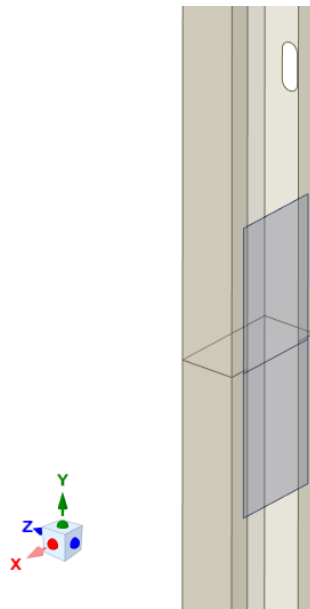


Figura 62 - Pré-processamento realizado ao conjunto prumo-placa.

Este processamento visou gerar arestas na zona de encastramento (680 mm), tanto no prumo, como na chapa a ele ligada, com recurso à ferramenta *split*, no sentido de permitir dividir o componente em dois, e representar um encastramento teoricamente perfeito nessa zona, em substituição do solo. Após

este procedimento, atribuiu-se o encastramento às faces inferiores às arestas, tanto no prumo, como na chapa. Em relação ao solo, definiu-se um encastramento na sua base, de forma a impedir qualquer tipo de movimento (Fig. 63).

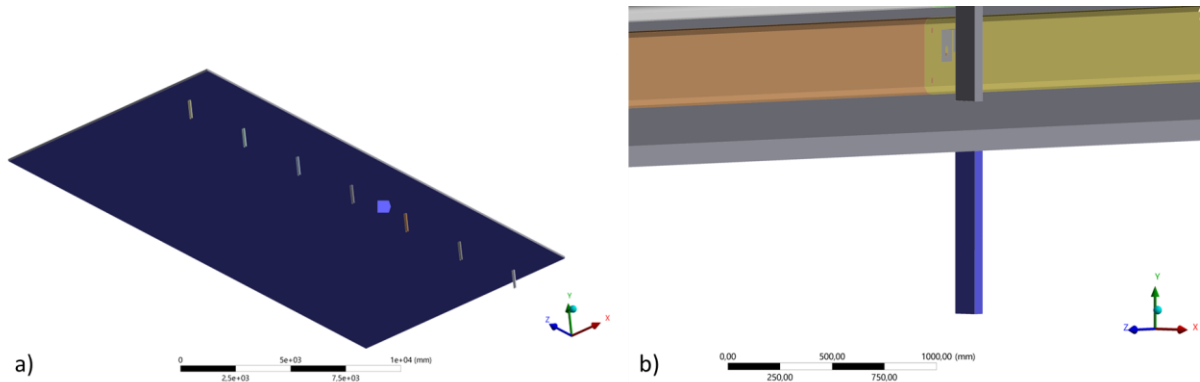


Figura 63 - *Fixed supports*: a) Solo; b) Conjunto prumo-chapa.

Relativamente à utilização de uma condição de fronteira de deslocamento prescrito (*displacement*), esta foi aplicada à carroçaria do veículo. Esta definição limitou o movimento do carro no sentido vertical (eixo y), obrigando o mesmo a movimentar-se apenas no plano definido pela estrada. Esta imposição não corresponde totalmente ao que poderá acontecer na realidade, uma vez que os veículos podem capotar, aquando do impacto. Contudo, uma vez que o objeto de estudo desta dissertação corresponde ao modelo das barreiras, e não o automóvel, optou-se por maximizar a avaliação da sua capacidade de contenção, o que associado ao facto de o modelo numérico do carro apresentar um comportamento rígido, provoca resultados conservadores do ponto de vista do fabricante das barreiras de segurança, e extremamente seguros do ponto de vista dos condutores (Fig. 64).

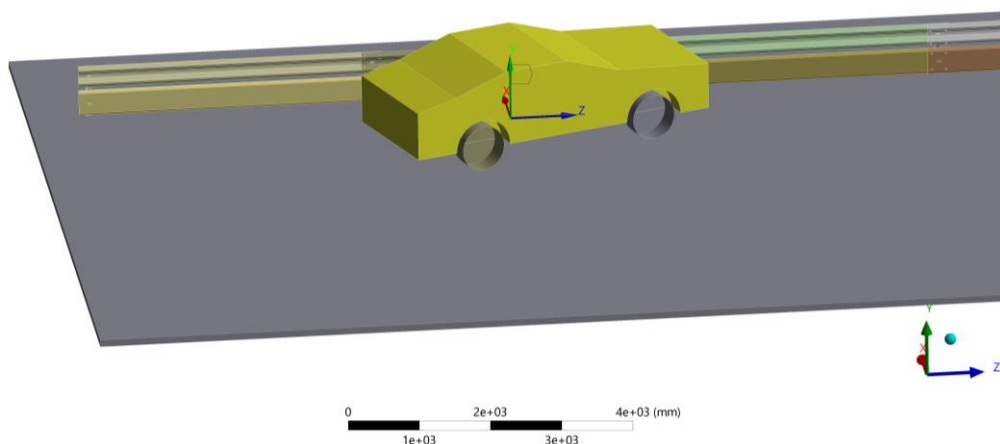


Figura 64 - *Displacement* atribuído ao veículo.

Por fim, relativamente à aplicação da velocidade, esta foi atribuída ao conjunto formado pela carroçaria e pelas rodas, no sentido das barreiras, de acordo com o ângulo de incidência de 20° previamente definido. O valor empregue no conjunto respeita às limitações impostas pela norma EN 1317, para os ensaios TB 32, ou seja, de 110 km/h (Fig. 65).

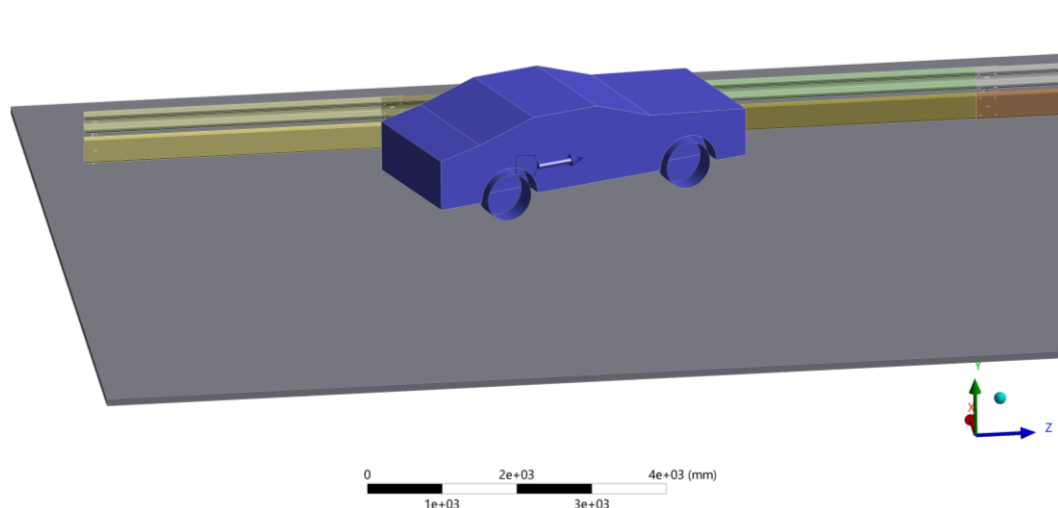


Figura 65 - *Velocity* atribuída ao veículo.

3.4.7 Soluções Obtidas

De acordo com a informação apresentada ao longo desta dissertação, pretende-se que as barreiras analisadas respeitem um nível de contenção N2W3. Posto isto, com base na Tabela 4, o valor máximo do deslocamento normal à barreira existente, não deve exceder os 1 000 mm. Para além disso, do ponto de vista do veículo, este deve cumprir com as seguintes condições:

- Durante e após o momento de impacto, não mais do que uma das rodas do veículo deverá ultrapassar completamente, seja por cima, ou por baixo, a barreira de segurança;
- O veículo não deverá capotar para nenhum dos lados da barreira;
- O eixo do veículo, após o impacto, não deverá atravessar uma linha paralela à faixa de rodagem, sendo ainda capaz de cumprir com as especificações impostas pelo critério da *exit box*.

Assim sendo, realizando-se a simulação numérica, obtêm-se a seguinte resposta inicial e, conseqüente, configuração final do conjunto composto tanto pelos elementos mecânicos em avaliação, como pela estrada e pelo veículo (Figs. 66 e 67).

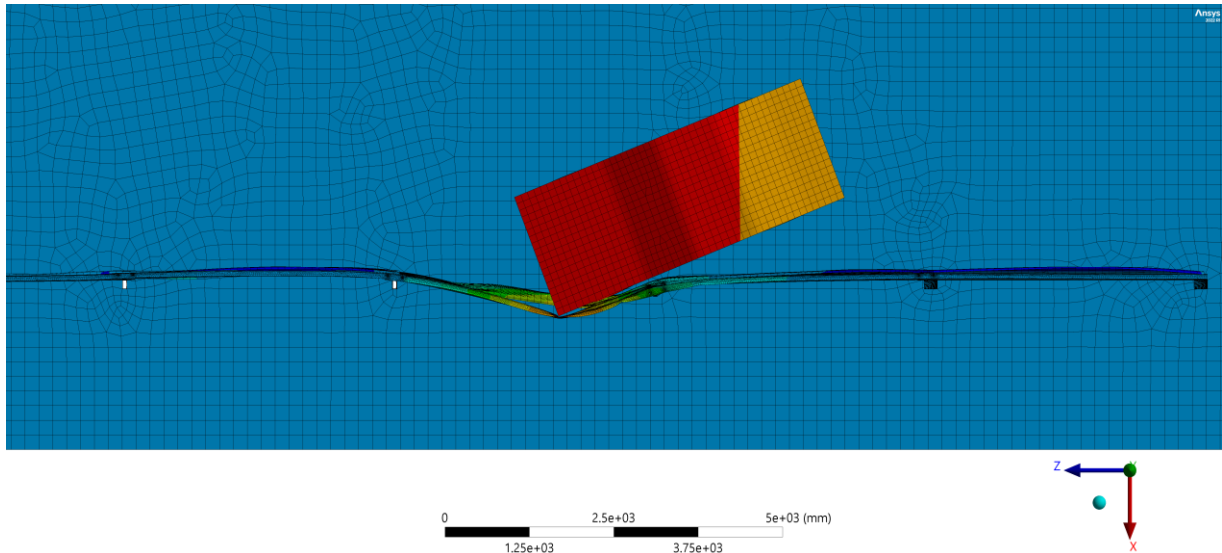


Figura 66 - Instante inicial da simulação numérica realizada.

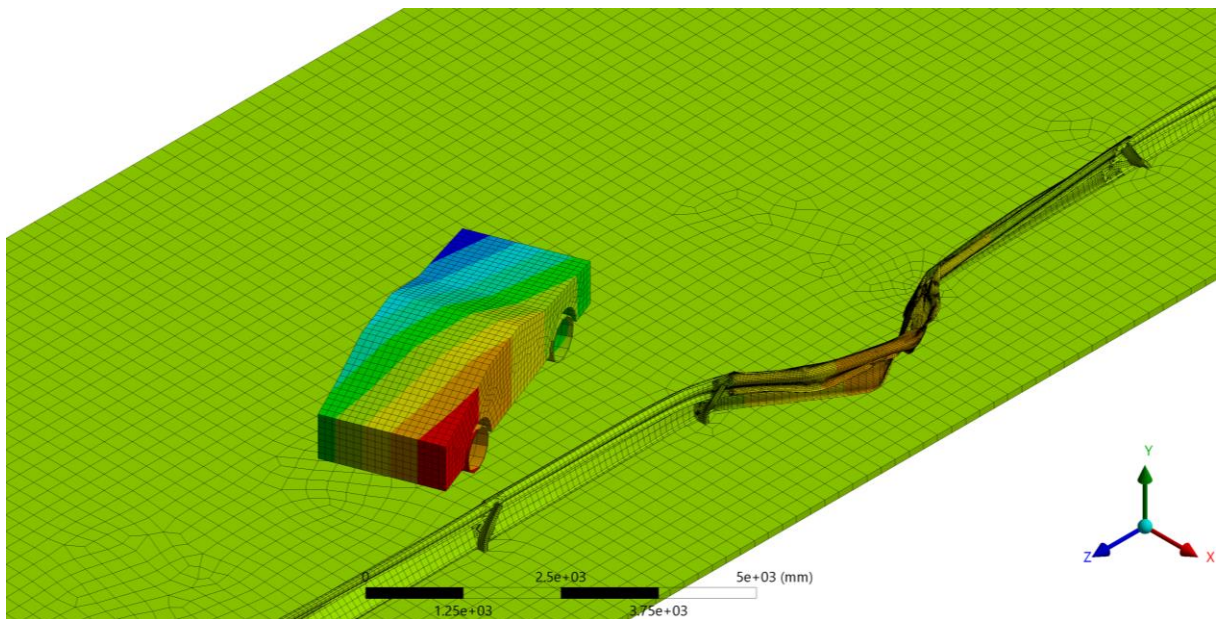


Figura 67 - Instante final da simulação numérica realizada.

Com isto presente, o máximo deslocamento registado pela barreira ao longo da simulação, ocorreu no *time step* 0,1625, apresentando um valor correspondente a 1 433,5 mm, na direção normal ao plano da barreira, ou seja, ao longo do eixo dos *xx* (Fig. 68).

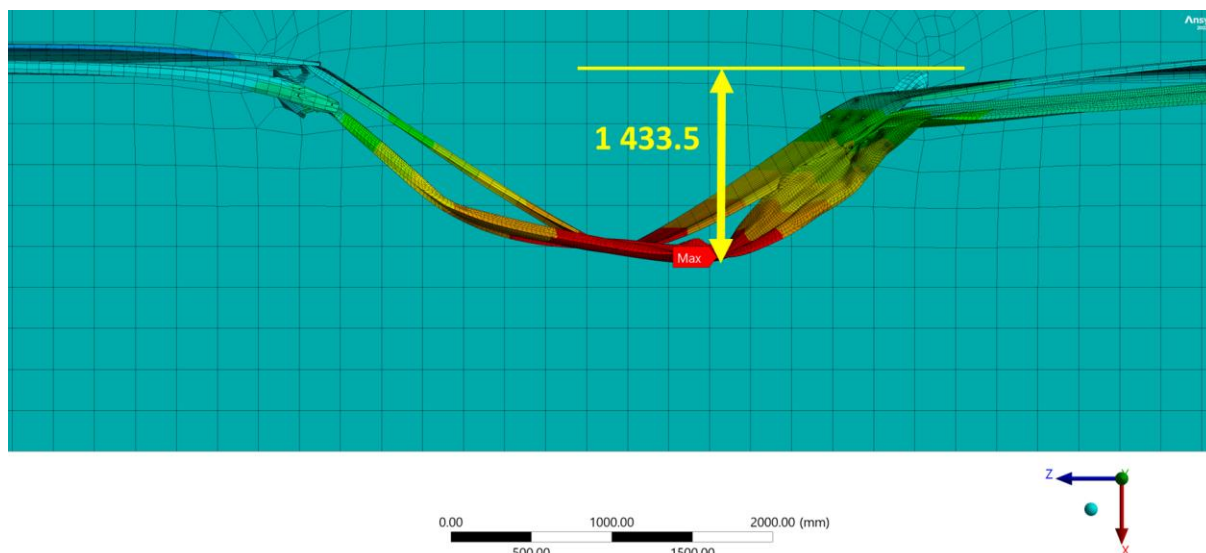


Figura 68 - Deslocamento máximo sofrido pela barreira de segurança.

É de salientar que a barreira apresenta algum retorno elástico, pelo que o deslocamento final (1 251,8 mm) é menor ao especificado anteriormente. Contudo, como o valor utilizado na certificação da mesma é o correspondente ao máximo deslocamento, a sua contabilização é irrelevante.

Relativamente ao prumo que se encontra situado numa zona mais próxima à qual se obteve o máximo deslocamento, este apresenta a configuração final representada da Figura 69.

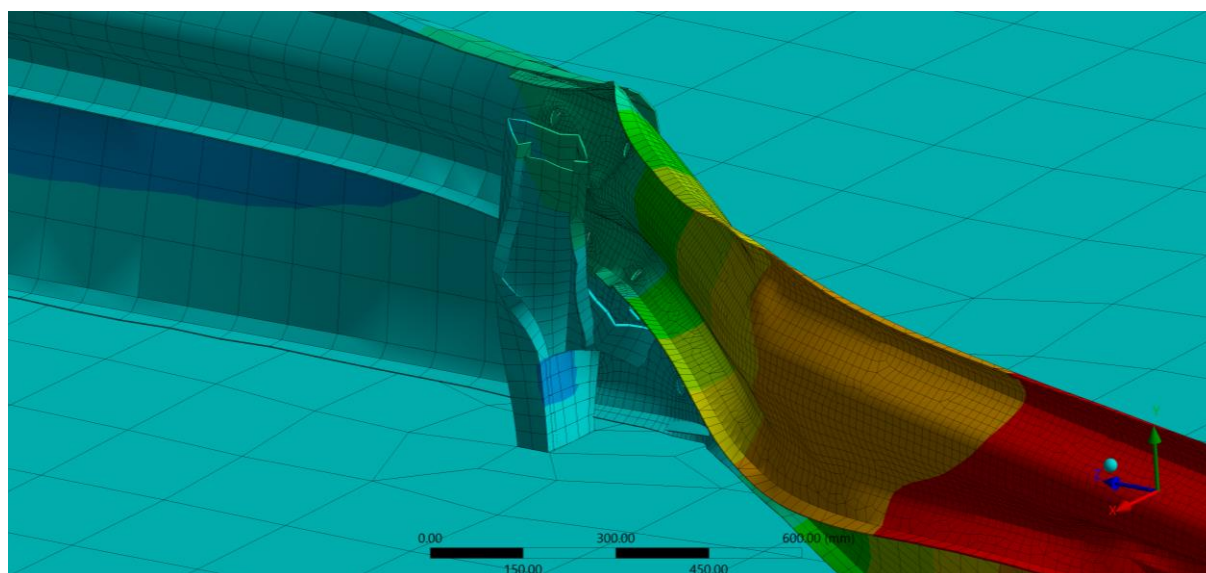


Figura 69 - Configuração final do prumo número 4.

Do ponto de vista do veículo, e recorrendo aos 3 critérios descritos anteriormente, assim como à Figura 70, conclui-se que o primeiro ponto é perfeitamente cumprido, não havendo transposição da barreira por parte das rodas do veículo.

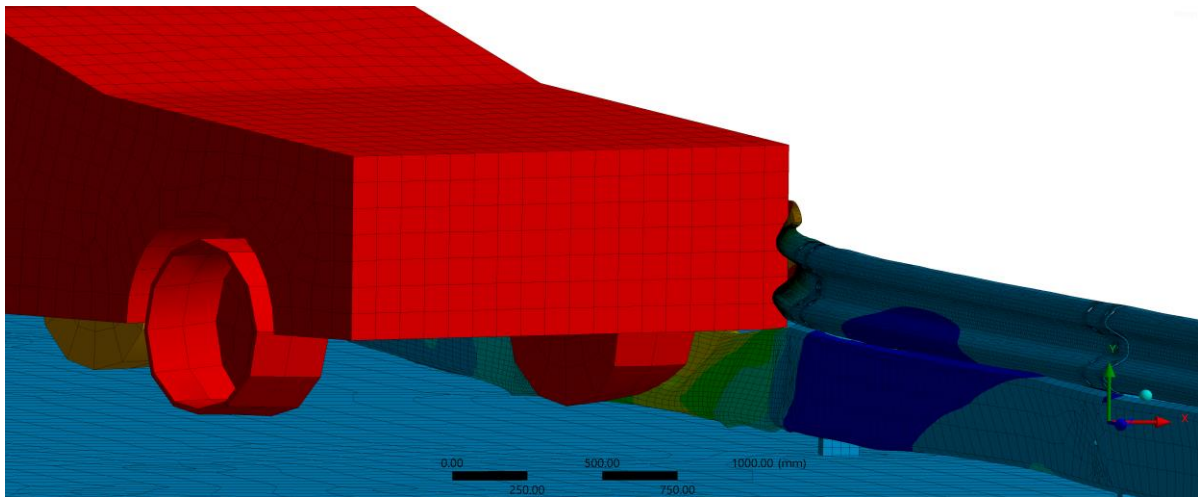


Figura 70 - Visualização da roda frontal esquerda a tocar na barreira.

A Figura 70 refere-se ao instante no qual o veículo esteve mais próximo de não cumprir esta condição, pelo que após este instante, iniciou um movimento de rotação que o foi afastando por completo da barreira. De salientar que, devido ao facto de se ter impedido o movimento do carro na direção vertical, a resposta atribuída ao segundo critério não representa totalmente a realidade, pelo que deve ser desconsiderada na avaliação final.

Em relação ao terceiro e último ponto, correspondente ao denominado critério da *exit box*, segundo a norma, o veículo, quando atinge a sua posição final, não deverá ultrapassar nem os valores de “B” representados na Tabela 6, que correspondem ao comprimento da caixa, nem os valores determinados pela Equação 3.2, para a obtenção da altura da caixa,

$$h = A + V_l + 0,16 \times V_c \leftrightarrow h = 2,20 + 1,79 + 0,16 \times 4,60 \leftrightarrow h = 4,73 \text{ m} \quad (3.2)$$

onde A corresponde a uma variável indicada na Tabela 6, V_l corresponde à largura do veículo e V_c corresponde ao seu comprimento.

Posto isto, a *exit box* deverá ser limitada por um comprimento de 10,00 m e uma altura correspondente a 4,73 m, segundo a sua configuração inicial, isto é, não deformada. A Figura 71 ilustra a *exit box* resultante para o presente modelo numérico. De referir que os pontos assinalados a vermelho dizem respeito ao ponto P, ilustrado na Figura 14, sendo este referente ao último momento de contacto estabelecido entre o veículo e a barreira de segurança, durante o evento de impacto, e no qual se inicia a contabilização do comprimento da caixa.

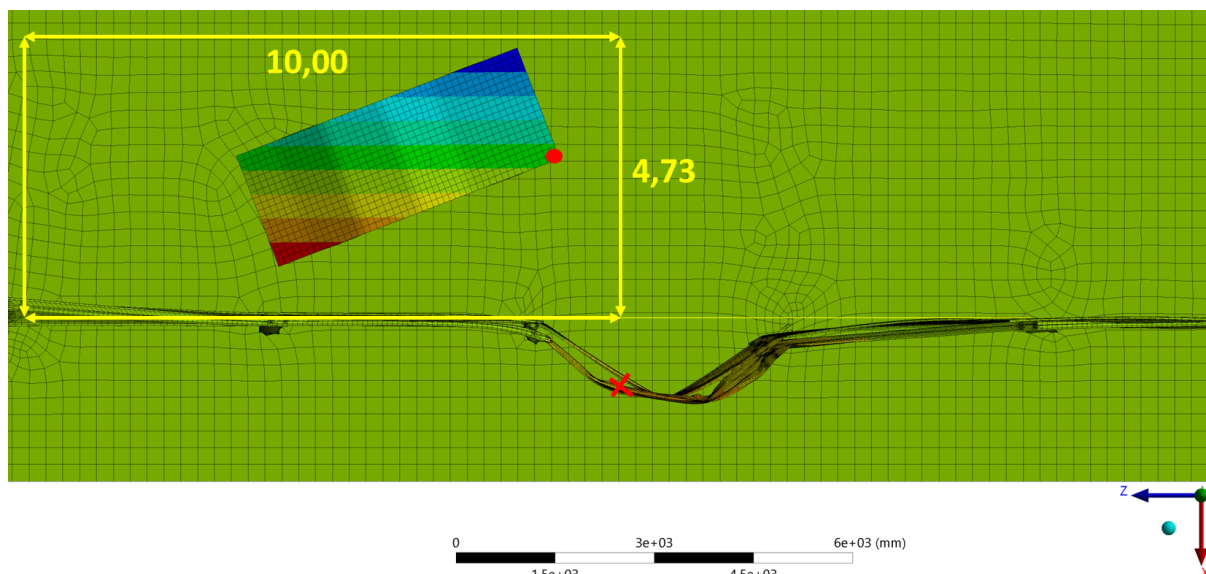


Figura 71 - Distâncias para o critério da *exit box*.

Posto isto, por análise da Figura 71, conclui-se que o veículo permaneceu no interior da denominada *exit box*, cumprindo este critério ao nível das dimensões definidas pela norma. O ponto P pertencente ao veículo, situa-se a uma distância de 2,55 m, relativamente à referência. Porém, e apesar de se encontrar no interior do espaço delimitado pela caixa, por avaliação da Figura 67, verifica-se que o veículo não manteve uma trajetória retilínea, tendo rodado sobre o seu próprio eixo.

Finalmente, os resultados apresentados até este momento, encontram-se sumariados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados finais obtidos.

Parâmetro		Barreira de Segurança	Veículo
Deslocamento máximo (Eixo xx) [mm]		1 433,5	
Deslocamento após retorno elástico (Eixo xx) [mm]		1 251,8	
Energia dissipada [mJ]		$5,3044 \times 10^8$	
<i>Exit Box</i>	h [m]		4,73
	B [m]		10,00

Posto isto, relativamente aos principais resultados obtidos, correspondentes aos pontos de validação do modelo de barreira analisado, conclui-se que:

- O deslocamento máximo medido (1,4 m) e, conseqüentemente, o valor correspondente à largura útil (W_N), não cumprem os pressupostos para os quais a barreira foi projetada (N2W3), apresentando uma capacidade de retenção compatível com o nível N2W5.

- No que concerne à *exit box*, conclui-se que a barreira de segurança cumpre as condições impostas pelo critério. Contudo, o veículo espelha um comportamento perigoso, não condizente com o habitual, uma vez que exhibe uma rotação em torno do seu próprio eixo, pelo que não mantém uma trajetória paralela à barreira, como seria de esperar.

Ainda relativamente ao critério da *exit box*, analisando o valor correspondente à energia dissipada durante o impacto analisado, verifica-se a existência de energia remanescente, uma vez que a energia cinética inicial apresenta um valor de, aproximadamente, 7×10^8 mJ. Ainda que, para além da energia dissipada no embate com a barreira, tal como a energia dissipada pelo atrito existente entre as rodas e o solo, tenha sido contabilizada, o veículo não se imobilizou por completo no final do tempo especificado para a simulação numérica, apresentando ainda uma determinada velocidade que poderia comprometer o cumprimento desta condição. Contudo, visto que o próprio automóvel apresenta um papel relevante na dissipação de energia, e este não foi considerado no presente modelo numérico (veículo apresenta comportamento rígido), pode corresponder a um dos motivos pelos quais essa mesma energia não foi totalmente dissipada. Além disso, não se contabilizou qualquer influência por parte dos travões o que, em condições reais, se constata.

Relativamente à modelação numérica dos parafusos, esta foi efetuada no sentido de permitir o estabelecimento das várias ligações presentes no conjunto. Porém, na realidade, estes elementos de ligação correspondem aos primeiros elementos do conjunto a entrarem em rotura, permitindo o destacamento de alguns dos componentes previamente conectados. Este destacamento é também responsável por alguma dissipação da energia existente e que, adicionada aos restantes métodos utilizados na sua disseminação, poderão contribuir para uma abordagem não tão conservadora do evento de impacto.

Finalmente, conclui-se que a barreira de segurança rodoviária testada pode não cumprir o requisito referente ao seu deslocamento máximo. No que concerne ao modelo numérico desenvolvido, verifica-se que este cumpriu com sucesso o seu propósito, embora apresente simplificações que se traduzem numa abordagem pessimista ao problema, isto é, responsabilizando unicamente o conjunto de elementos mecânicos constituintes da barreira de segurança, pela dissipação da energia cinética transportada pelo veículo.

3.5 Modelo Numérico Global (N2W2)

A presente seção irá expor de forma mais sucinta o processo responsável pela avaliação global do comportamento mecânico de um modelo de barreiras de segurança rodoviária alternativo ao estudado

anteriormente, pretendendo-se atingir um nível de contenção superior (N2W2). Serão apenas apresentados os modelos geométricos utilizados, expondo devidamente as suas diferenças para o anterior. Para além disso, apresentar-se-ão adicionalmente pormenores relacionados com a estruturação da malha e os resultados sob a forma do deslocamento máximo sentido pela barreira. Todos os restantes pressupostos apresentados ao longo da seção 3.4 (simplificações do modelo, propriedades dos materiais, condições de fronteira e interações e contactos) serão iguais aos utilizados no modelo numérico atual.

3.5.1 Geometria Utilizada

Comparativamente à solução correspondente ao modelo de barreira de segurança N2W3, a única diferença reside na utilização de uma única chapa na constituição do conjunto do prumo, de modo a maximizar a rigidez e resistência dos elementos de ancoragem da barreira ao solo (Fig. 72). Esta alteração confere ao prumo um aspeto fechado, contrariamente ao verificado na solução original.

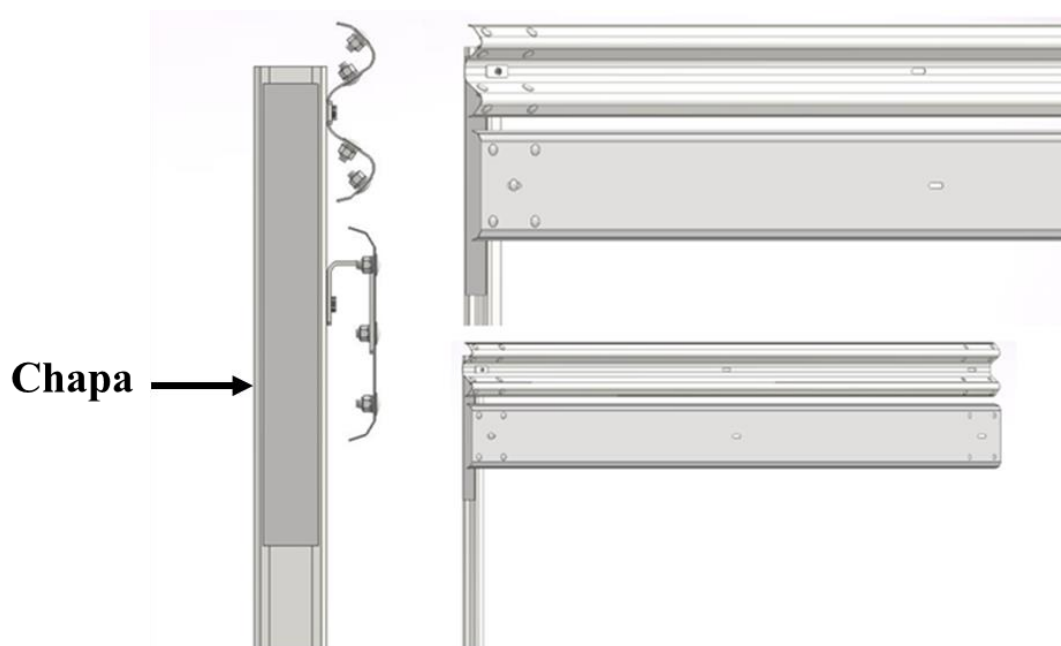


Figura 72 - Modelo de barreira em estudo (N2W2).

Em relação aos restantes componentes do conjunto, a sua geometria e dimensões são iguais às anteriormente avaliadas, correspondendo a informações provenientes dos modelos desenvolvidos pela empresa Metalgalva S.A., cujos desenhos técnicos podem ser analisados nos Anexos.

Por fim, relativamente ao comprimento do conjunto, sendo este traduzido pelo número de barreiras empregues no mesmo, assim como o posicionamento do veículo, representam considerações impostas

pela norma EN 1317-2 (veículo posicionado com um ângulo de incidência de 20° e a 1/3 do comprimento total da barreira), o que permite assegurar a validação da análise.

3.5.2 Criação da Malha de Elementos Finitos

A malha de elementos finitos utilizada nos modelos numéricos, representa uma etapa fundamental na obtenção de resultados realistas e com grande aproximação de resultados aos verificados experimentalmente. Para além disso, é imperativo estabelecer-se uma relação otimizada entre o tempo de processamento e a exatidão dos resultados, pelo que a malha apresenta um papel fulcral nesse equilíbrio. A Figura 73 apresenta a malha global utilizada no conjunto.

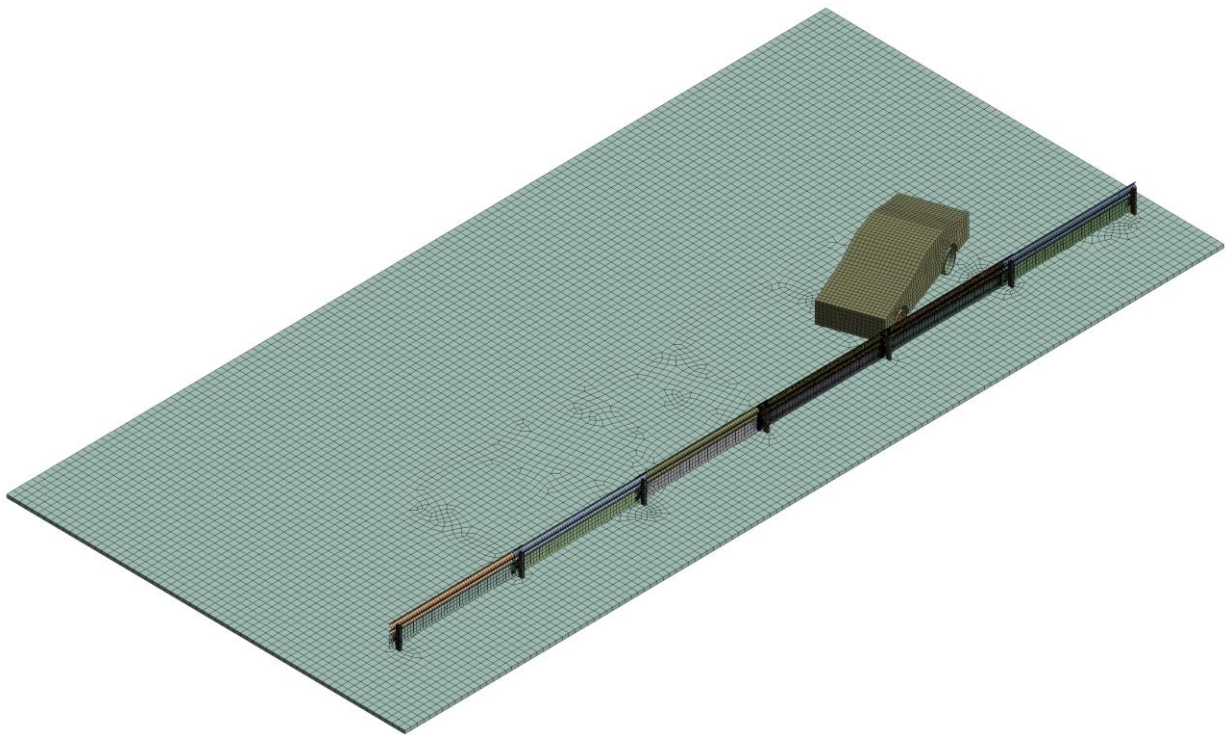


Figura 73 - Malha de elementos finitos aplicada ao modelo global (N2W2).

Mais uma vez, e à semelhança do que foi realizado no modelo numérico N2W3, procedeu-se a um refinamento de malha, de forma mais pronunciada nos componentes responsáveis por susterm a viatura no primeiro momento de impacto, atribuindo-se, portanto, às vigas em “W” número 2 e 3, alargando-se posteriormente aos restantes elementos de absorção da energia primária existentes nesses conjuntos, ou seja, aos DPM número 2 e 3, como pode ser observado na Figura 74. Relativamente aos prumos, às placas e à suspensão, estes apresentam um refinamento semelhante entre todos os componentes, pelo que não existem quaisquer dispositivos mais ou menos refinados em relação a outros.

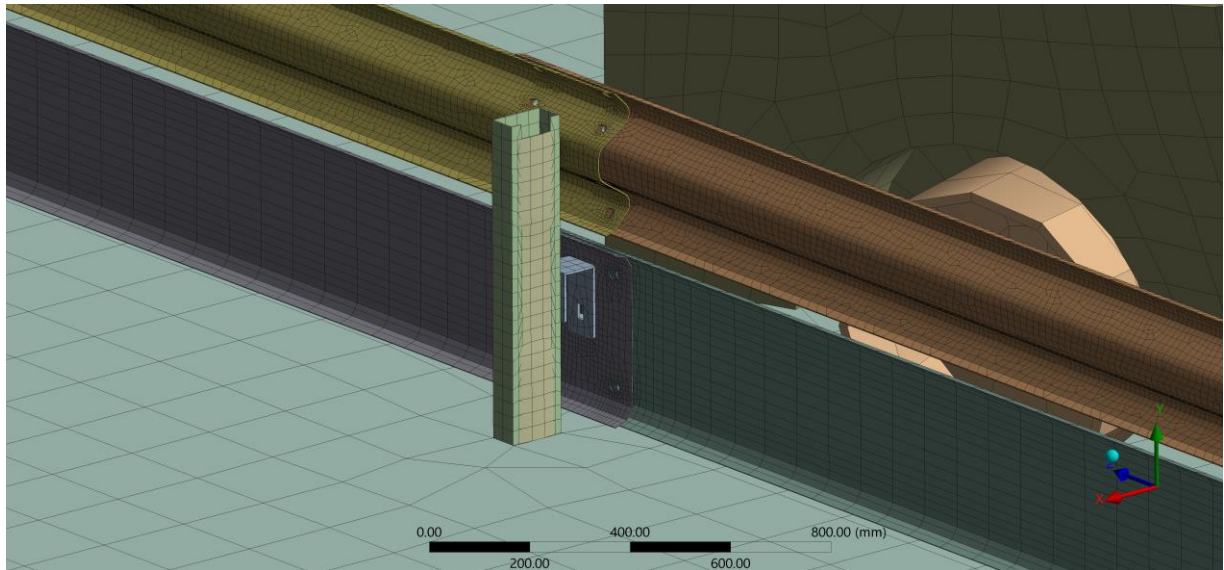


Figura 74 - Refinamento de malha aplicado.

É possível verificar o tamanho reduzido de elementos utilizado na composição de cada uma das vigas, permitindo uma reprodução bastante positiva não só dos furos, mas também das curvaturas que caracterizam cada um destes elementos responsáveis pela dissipação de energia.

Relativamente ao conjunto composto pelo prumo e pela placa responsável por conferir rigidez e resistência mecânica à estrutura, foi-lhes atribuído um tamanho de elemento capaz de gerar igualmente resultados satisfatórios (30 mm). Para além disso, e tal como realizado no modelo referente à barreira de segurança N2W3, o método de conexão/contacto estabelecido entre esses 3 corpos, passou pela utilização de uma *mesh connection*.

Finalmente, a malha estruturada nas barreiras de segurança rodoviária é composta por elementos isoparamétricos de 3 (Tri3) e 4 (Quad4) nós, sendo que o modelo global apresenta na totalidade 43 783 elementos e 54 058 nós.

3.5.3 Soluções Obtidas

Pretende-se que esta solução alternativa respeite um nível de contenção N2W2. Posto isto, com base na Tabela 4, o valor máximo do deslocamento normal à barreira, não deve exceder os 800 mm.

Assim sendo, realizando-se a simulação numérica, obtém-se a resposta inicial (0,065 s) ilustrada na Figura 75 para o conjunto formado tanto pelos elementos mecânicos em avaliação, como pela estrada e pelo veículo.

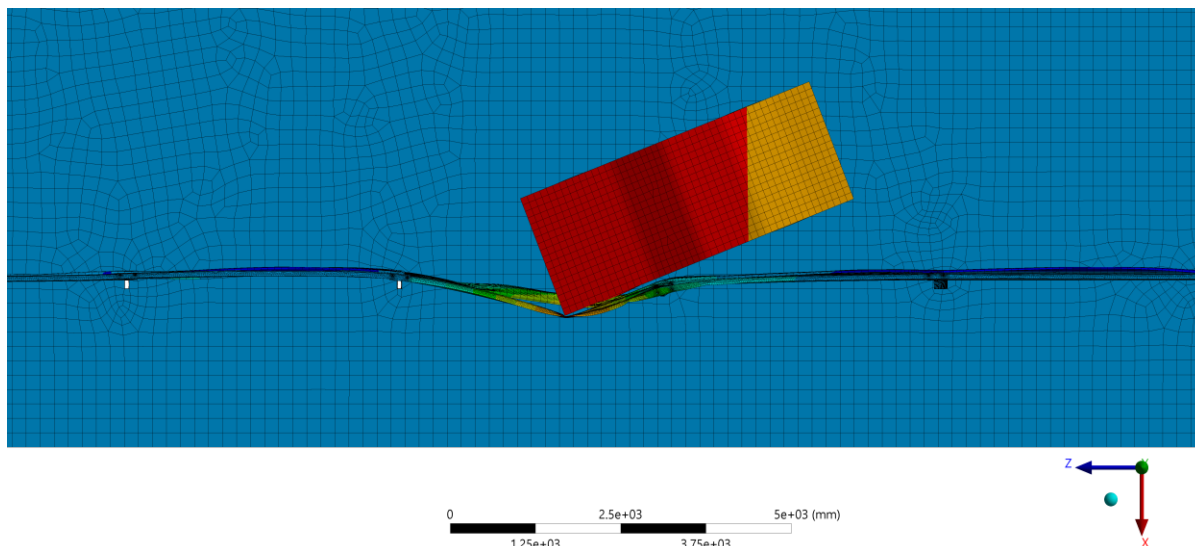


Figura 75 - Instante inicial da simulação numérica realizada.

De referir que a resposta inicial demonstrada por este modelo é em tudo semelhante ao comportamento verificado pela barreira de segurança anteriormente analisada (Fig. 66), pelo que permite aferir que numa fase prematura do evento, ambos os modelos revelam o mesmo comportamento.

Posto isto, e como o principal critério de validação das barreiras de segurança rodoviária passa pelo cumprimento do deslocamento máximo admitido, esse será o método dominante. Após o término do evento de impacto, a barreira de segurança apresenta a configuração ilustrada na Figura 76.

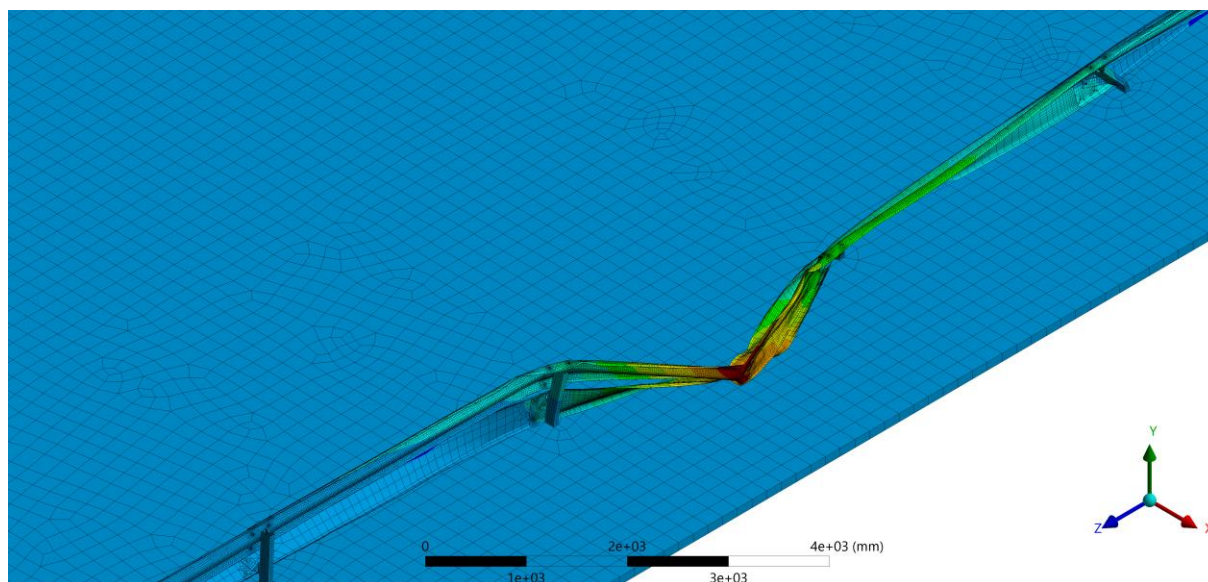


Figura 76 - Instante final da simulação numérica realizada.

Com isto presente, o máximo deslocamento registado pela barreira ao longo da simulação ocorreu ao incremento de tempo 0,17 s, apresentando um valor correspondente a 1 206,3 mm, na sua direção normal, ou seja, ao longo do eixo dos xx (Fig. 77).

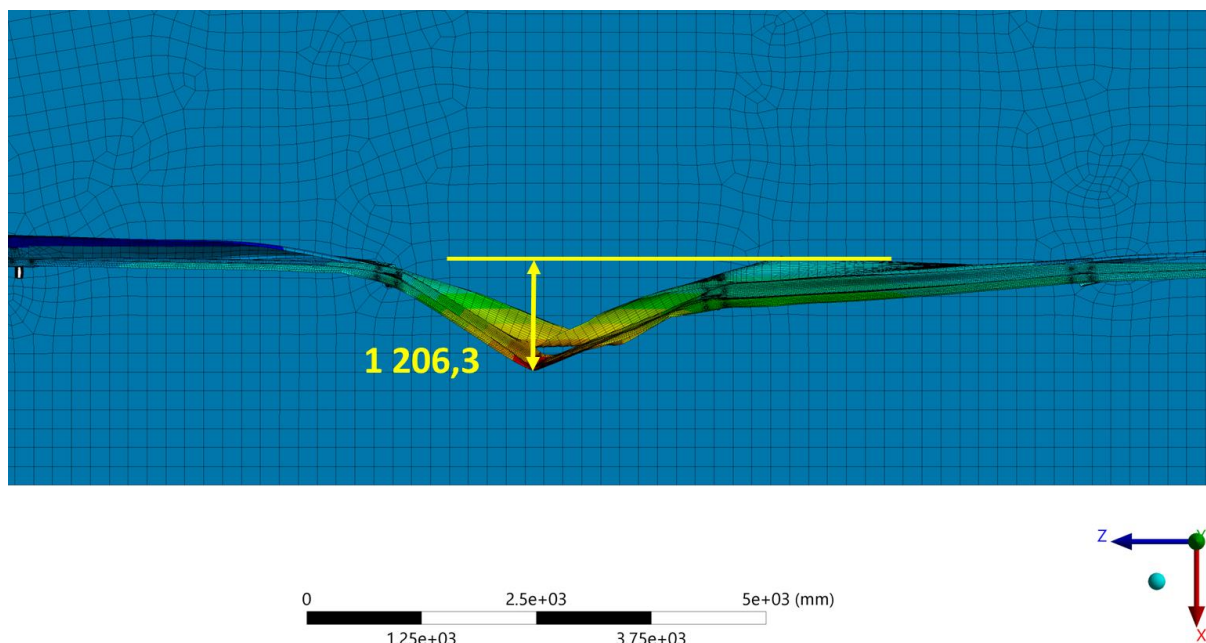


Figura 77 - Deslocamento máximo sofrido pela barreira de segurança.

Assim, uma vez que o deslocamento máximo resultante é superior ao exigido pela norma (i.e., 800 mm), conclui-se que este modelo de barreira de segurança não respeita as suas considerações, podendo não apresentar a capacidade de contenção exigida. Contrariamente ao realizado no modelo anterior, não se apresenta o segundo critério de validação (*exit box*).

3.6 Interação Solo-Prumo

Como se referiu na secção 2.4, uma das considerações mais relevantes no estudo das barreiras de segurança rodoviárias passa pela análise da interação entre os prumos e o solo onde estes elementos serão encastrados. Uma aproximação conservadora a este fenómeno consiste na definição de um encastramento perfeito (atribuído nas análises globais precedentes), isto é, assumir que os prumos se encontram fixos ao solo de forma perfeita (i.e., sem sofrer deformação abaixo da cota de afloramento do solo), não sofrendo qualquer deslocamento na zona de interação com o solo em resultado do impacto com o veículo. Contudo, isso dificilmente se verifica na realidade, pelo que é extremamente relevante contabilizarem-se diferentes tipos de solos, com diferentes tipos de taxas de compactação e capacidade de fixação dos elementos mecânicos. Nesta secção realizar-se-á a exposição desse estudo, sob o ponto de vista da atuação de uma carga dinâmica, tendo por base um conjunto de avaliações desenvolvidas por (de Castro Barbosa, 2022; Klasztorny et al., 2019; Sassi, 2011).

3.6.1 Geometria Utilizada

No que diz respeito à geometria utilizada na validação da interação solo-prumo, recorreu-se à fixação do componente mecânico estudado (cuja geometria foi previamente fornecida pela empresa Metalgalva S.A.) a um elemento de volume representativo (EVR) do solo, cujas dimensões (diâmetro e altura iguais a 1 000 e 1 520 mm, respetivamente) foram obtidas após consulta bibliográfica (Klasztorny et al., 2019). Este volume representativo consiste num cilindro com um furo central, com configuração compatível com a geometria do próprio prumo, permitindo a sua posterior fixação (Fig. 78).

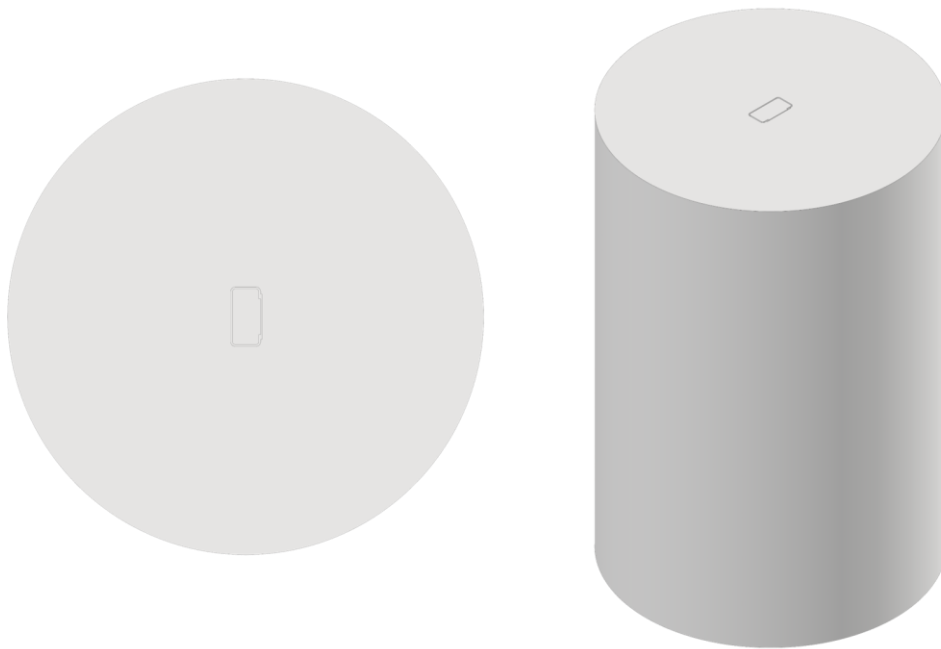


Figura 78 - Geometria adotada para a representação do solo.

A análise da interação solo-prumo foi realizada considerando o efeito de uma carga de impacto que atua junto da extremidade superior do prumo, na direção horizontal. Relativamente ao objeto utilizado para impactar com o prumo, denominado por “impactor”, nesta análise a sua geometria e dimensões foram novamente obtidas com base na bibliografia consultada, tendo-se utilizado um objeto cilíndrico, com 100 mm de diâmetro e 137,5 mm de comprimento (Sassi, 2011). No que diz respeito à localização da carga de impacto com o prumo, tal como se referiu anteriormente, esta estabeleceu-se na região superior do prumo, próxima do primeiro furo de fixação aos restantes componentes da barreira. Assim sendo, o modelo geométrico completo utilizado na simulação numérica do problema encontra-se ilustrado na Figura 79.

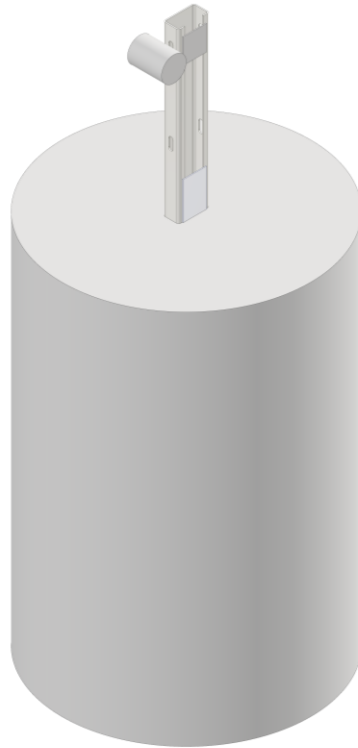


Figura 79 - Modelo geométrico completo.

De forma a permitir a posterior inserção do modelo numérico do conjunto solo-prumo, no modelo da simulação global, realizou-se a avaliação de uma versão simplificada do modelo geométrico presente na Figura 79, na qual foram retirados ao prumo, os seus filetes e alguns furos que não intervêm nem no seu comportamento estrutural, nem no estabelecimento de uma ligação com os restantes componentes mecânicos (Fig. 80).

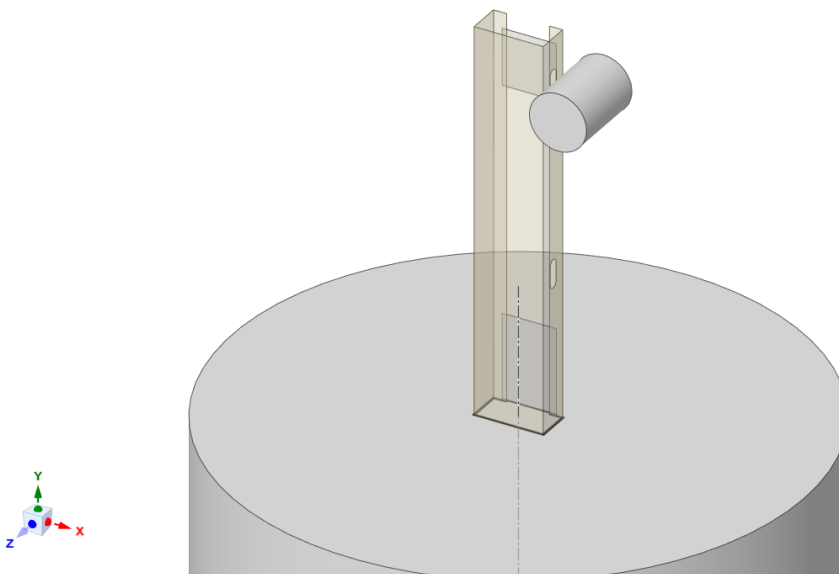


Figura 80 - Modelo geométrico sem a presença de filetes e furos adicionais.

3.6.2 Propriedades dos Materiais

O critério de Mohr-Coulomb constitui a abordagem mais comum no contexto da análise do comportamento mecânico de geomateriais, com especial aplicação em solos (Owen & Hinton, 1980; Pietruszczak, 2010). Segundo este critério, o colapso do material ocorre quando a tensão de corte atuante iguala a resistência ao corte. O critério é estabelecido pela expressão de (Heyman, 1997),

$$|\tau| = S_0 + \sigma \tan \phi \quad (3.3)$$

segundo a qual S_0 representa a resistência inerente ao corte, também designada coesão c , σ é a tensão normal, ϕ é o ângulo de atrito interno, com coeficiente de atrito interno $\mu = \tan \phi$. A representação gráfica deste critério no diagrama de Mohr corresponde a uma linha reta diagonal ao longo do eixo σ , formando com este um ângulo ϕ (Fig. 81).

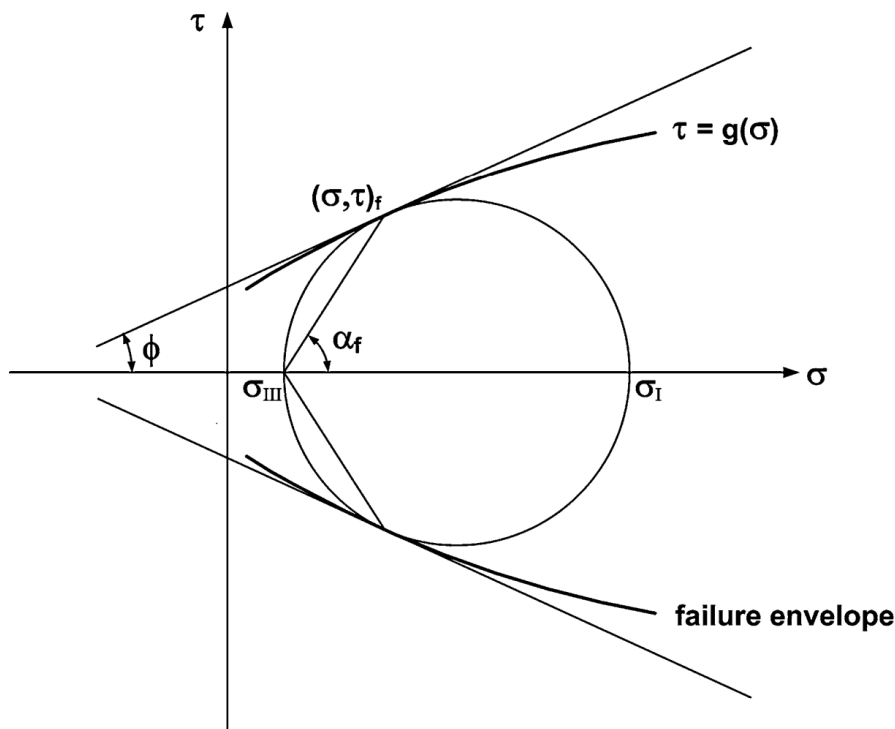


Figura 81 - Representação gráfica do critério de Mohr-Coulomb (Labuz & Zang, 2012) exibindo o envelope de ruptura.

Construindo assim um círculo de Mohr tangente a esta reta (estado de tensão de tensão associado à ruptura), e empregando relações trigonométricas, estabelece-se uma relação alternativa à Eq. (3.4) em termos das tensões principais,

$$(\sigma_I - \sigma_{III}) = (\sigma_I + \sigma_{III}) \sin \phi + 2S_0 \cos \phi \quad (3.4)$$

Uma forma do critério de rotura de Mohr é dada pela expressão,

$$\tau_m = f(\sigma_m) \quad (3.5)$$

sendo $\tau_m = (\sigma_I - \sigma_{III})/2$ e $\sigma_m = (\sigma_I + \sigma_{III})/2$. Conhecida a relação estabelecida na Eq. (3.5), o envelope de Mohr pode ser definido no plano σ, τ (Figura 3.56), sendo que a rotura ocorre se o estado de tensão caracterizando o dano, i.e., o círculo de diâmetro $(\sigma_I - \sigma_{III})$ for tangente ao envelope de rotura $\tau = g(\sigma)$. Constata-se assim que o critério de Mohr é equivalente à assunção do envelope linear de Mohr.

O critério de Mohr-Coulomb é estabelecido através da expressão,

$$\begin{aligned} \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} &= a \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + b \\ \pm \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} &= a \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} + b \\ \pm \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} &= a \frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2} + b \end{aligned} \quad (3.6)$$

sendo $a = \frac{m-1}{m+1}$, $m = \frac{C_0}{T_0} = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}$, $b = \frac{1}{m+1}$, $C_0 = \frac{m}{m+1}$, $T_0 = \frac{C_0}{2}(1-\sin\phi)$, e

$0 \leq a \leq 1$.

Nesta expressão T_0 representa a resistência teórica à tração uniaxial de Mohr-Coulomb (Figura 3.57a)), que não se consegue constatar experimentalmente. Ao invés, obtém-se uma resistência T significativamente mais baixa ($\sigma_I = 0, \sigma_{III} = -T$), com o plano de rotura normal a σ_{III} . A grandeza C_0 representa o valor da resistência teórica à compressão uniaxial de Mohr-Coulomb (Fig. 82a).

A configuração da superfície que define o espaço das tensões principais depende da forma do critério de rotura que é usado, podendo ser através de funções lineares para mapeamento de planos, ou então através de funções não-lineares para definição de superfícies. A ilustração da Figura 82b) permite concluir que as Equações (3.6) representam seis planos que se intercetam mutuamente, formando assim uma pirâmide hexagonal, definida um total de seis arestas. A Figura 82b) também ilustra a superfície de rotura na posição correspondente ao estado de tensão hidrostático (iso-pessões), ou plano- π perpendicular ao eixo hidrostático, onde o modelo de Mohr-Coulomb é descrito por um hexágono irregular, de lados iguais. A condição de isotropia requer tripla simetria, atendendo a que a alteração da ordem $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ não deverá influenciar a superfície que permite definir a rotura para um material isotrópico. Deve notar-

se que a superfície definidora do critério de rotura só precisa de ser fornecida numa das regiões orientadas a 60° (Fig. 82b)).

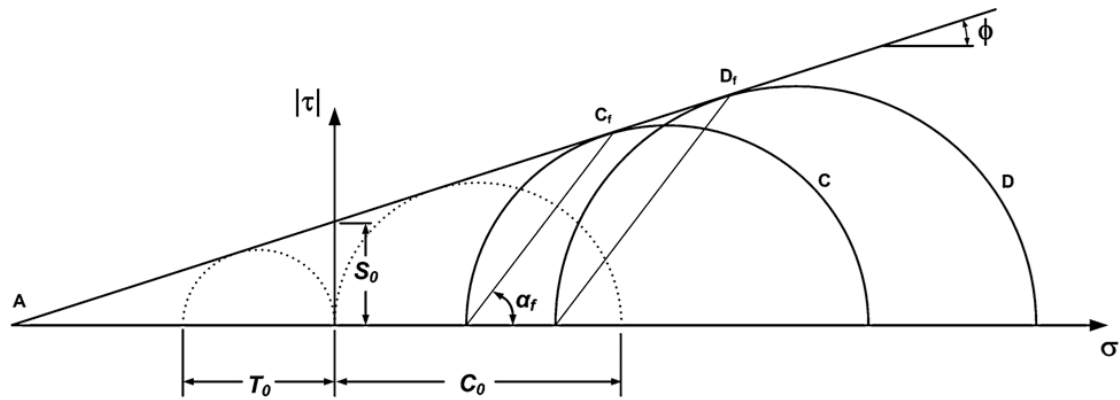
Tenha-se agora presente a transformação do espaço de tensão principal $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ para o diagrama de Mohr (σ, τ) . Não obstante a distância radial que medeia o eixo hidrostático ao ponto correspondente à tensão instalada ser proporcional à tensão desviadora, a posição de um ponto localizado no espaço de tensão principal não indica necessariamente o valor da tensão de corte num plano. No entanto, qualquer ponto localizado na superfície de rotura no espaço das tensões principais corresponde ao círculo de Mohr tangente ao envelope de rotura (Fig. 82a)). Para o caso particular da tensão principal intermédia σ_2 , estabelecida pela ordem $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, a superfície de rotura correspondente é definida pelo lado ACD da pirâmide hexagonal (Figura 3.57b). As tensões principais no ponto D representam o estado de tensão característico do ensaio de compressão triaxial $(\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3)_D$, e o ponto D é definido pelo círculo D do diagrama de Mohr. Da mesma forma, para o ponto C com tensões principais $(\sigma_3, \sigma_1 = \sigma_2)_C$ associadas ao ensaio de tração triaxial, sendo que o ponto C é definido pelo círculo C do diagrama de Mohr. Os pontos D e C podem ser vistos como os extremos de uma variação de tensão intermédia, e as tensões normal e de corte correspondem à rotura que ocorre nos pontos D_f e C_f , respetivamente. Os pontos localizados ao longo do segmento CD (Fig. 82b)) serão então representados pelos círculos compreendidos entre os pontos C e D (Fig. 82a)).

Para valores negativos da tensão principal σ_3 (i.e., a mais baixa), a evidência experimental veio demonstrar que o plano de rotura é perpendicular a $\sigma_{III} = -T$. De facto, o modo de rotura à tração é completamente diferente do modo de rotura ao corte que ocorre devido a tensões normais compressivas, não obstante a rotura em compressão uniaxial ser também diferente, que ocorre sob a forma de fratura/fendilhação axial (Vardoulakis et al., 1998). A rotura por tração foi acautelada pelo conceito introduzido por (Paul, 1961) que definiu limites de tensão (*tension cut-offs*) e um critério de rotura de Mohr-Coulomb modificado que requer três constantes do material, estabelecendo a validade da Eq. 3.5 nos seguintes termos,

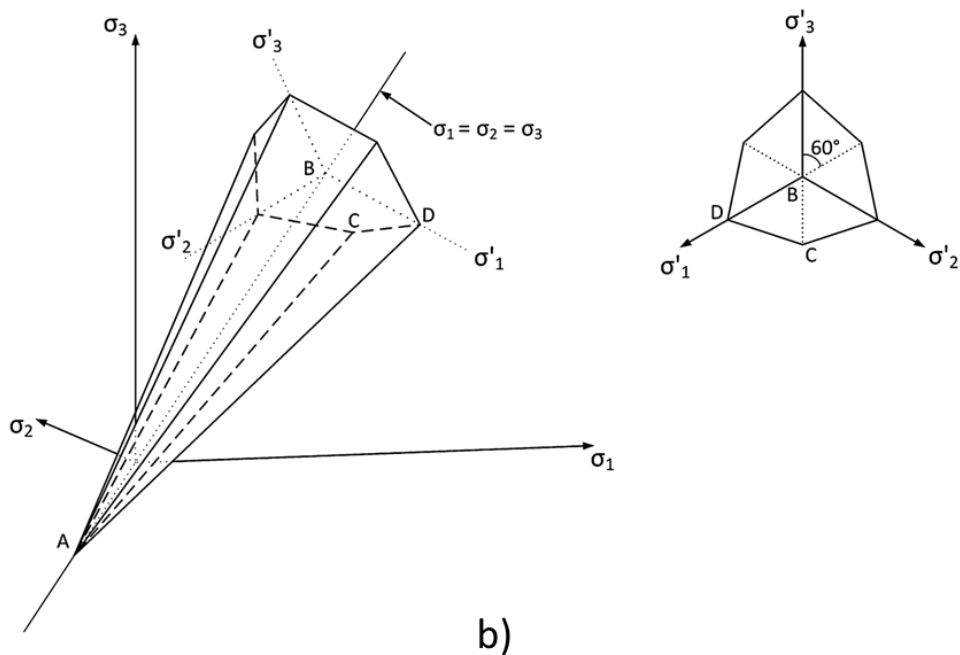
$$\sigma_I = (C_0 - mT) = \sigma_I^* \quad (3.7)$$

sendo modificado se

$$\sigma_{III} = -T \quad \text{quando } \sigma_I < \sigma_I^* \quad (3.8)$$



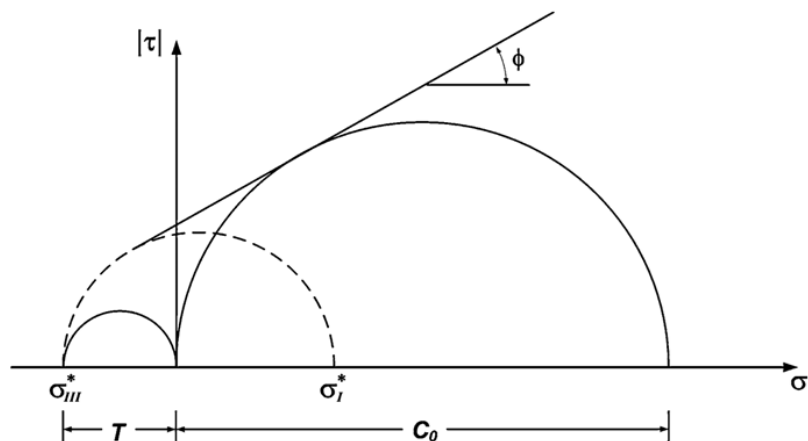
a)



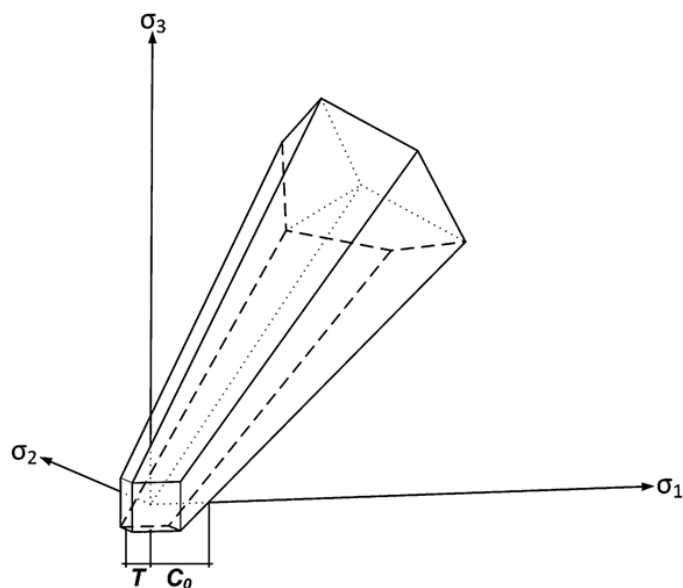
b)

Figura 82 - Critério de rotura de Mohr-Coulomb: (a) Envelope linear no diagrama Mohr; (b) Superfície piramidal no espaço das tensões principais e secção transversal no plano de equipressão.

A Figura 83a) representa os limites de tensão no diagrama de Mohr. Deve notar-se que o estado de tensão ali representado pelo círculo a traço interrompido, definido por $\sigma_I = \sigma_I^* = (C_0 - mT)$, $\sigma_{III}^* = -T$ não faz parte do envelope de rotura. Antes, todos os círculos de Mohr com $\sigma_I < \sigma_I^*$ são tangentes ao envelope no ponto $\sigma_{III}^* = -T$. No espaço das tensões principais, o critério de Mohr-Coulomb modificado com limites de tensão envolve a pirâmide Mohr-Coulomb intercetada por uma segunda pirâmide com três planos perpendiculares aos eixos das tensões principais (Fig. 83b)).



a)



b)

Figura 83 - Limites de tensão dados pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb modificado: (a) Envelope de ruptura no diagrama de Mohr; (b) Representação do espaço de tensão principal.

No que diz respeito aos materiais utilizados na definição do problema, e à semelhança do procedimento adotado para a atribuição das dimensões dos volumes representativos do solo, recorreu-se à bibliografia relacionada com o tópico. Assim, foram analisados 3 tipos diferentes de solo coesivos² (solos Macios (S), Médios (M) e Rígidos (H)), cujas propriedades físicas e mecânicas se encontram sumariadas na Tabela 17. De ressaltar que se utilizaram os valores médios de cada uma destas propriedades na sua definição.

² Solos de grão fino, de baixa resistência e facilmente deformáveis, com tendência para aderência de partículas.

Tabela 17 - Valores referentes às propriedades de solos coesivos (Klasztorny et al., 2019).

Solo	Módulo de Elasticidade E [MPa]		Módulo de Corte G [MPa]		Coeficiente de Poisson ν	
	Gama de Valores	Média	Gama de Valores	Média	Gama de Valores	Média
S	1-15	8	0,5-5	2,75	0,35-0,40	0,375
M	15-30	22.5	5-15	10	0,30-0,35	0,325
H	30-100	65	15-40	27,5	0,20-0,30	0,250

Levando em consideração o facto de que os solos nos quais os prumos são encastrados poderem ser classificados tipicamente como coesivos, é possível estimar o seu módulo volumétrico K (*Bulk Modulus*). Esta constante, algumas vezes referida como incompressibilidade, pretende descrever as propriedades elásticas do solo, quando submetido a uma determinada pressão nas suas faces, pressão essa resultante do impacto de um determinado objeto no próprio prumo (Britannica, 2022). Posto isto, com base nas propriedades listadas na Tabela 17, determina-se o módulo volumétrico através da expressão

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (3.9)$$

Os valores relativos ao módulo volumétrico referente a um carregamento são determinados, encontrando-se listados na Tabela 18. Relativamente ao módulo volumétrico associado ao descarregamento, este pode ser estimado de acordo com a seguinte expressão: $K_u = 3K$.

Tabela 18 - Módulos volumétricos para carregamento e descarregamento de solos coesivos (Klasztorny et al., 2019).

Solo	Módulo Volumétrico K [MPa]	Módulo volumétrico associado ao descarregamento K_u [MPa]
S	10,7	32,1
M	21,4	64,2
H	43,3	129,9

Deve notar-se que os parâmetros anteriormente apresentados visam traduzir o modelo de Mohr-Coulomb para solos coesivos, sendo este capaz de representar de modo realista o comportamento ao corte pretendido.

Ainda relativamente à definição do critério de Mohr-Coulomb, de modo a completar-se na totalidade a sua formulação, é necessário incluir os valores relativos aos parâmetros tradutores da coesão e do ângulo de atrito interno. Estes valores encontram-se listados na Tabela 19.

Tabela 19 - Valores referentes à coesão e ângulo de fricção interna dos vários solos (Klasztorny et al., 2019).

Solo	Coesão c [MPa]		Ângulo de atrito interno φ [°]	
	Gama de Valores	Média	Gama de Valores	Média
S	0,006–0,035	0,020	3-16	10
M	0,012–0,045	0,028	6-20	13
H	0,020-0,060	0,040	10-25	17

Por sua vez, o prumo e as placas foram definidos com a mesma lei de plasticidade utilizada para a sua modelação no modelo numérico global, isto é, a lei de Johnson-Cook, cujos parâmetros se encontram sumariados na seção 3.2.1.

Em relação ao material utilizado para a composição do impactor, e uma vez que este será simulado como um sólido com comportamento rígido (seção 3.6.5), não é necessário definir qualquer tipo de lei de plasticidade, pelo que a única preocupação que foi tida passou por garantir que a sua massa é correspondente à de um veículo condizente com o ensaio de impacto TB 32 (Fig. 84).

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	1,389E+06	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...			
6	Young's Modulus	2E+11	Pa		
7	Poisson's Ratio	0,3			
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		
10	Specific Heat Constant Pressure, C_p	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹		

Figura 84 - Propriedades do material utilizado na constituição do "impactor".

De referir mais uma vez, que tendo em consideração o facto de o objeto de impacto apresentar um comportamento rígido, a lei de elasticidade apresentada na Figura 84 não será utilizada, apenas o parâmetro correspondente à massa específica. Assim, tendo por base esse valor, o objeto apresenta uma massa de 1 500 kg.

3.6.3 Interações e Contactos

As interações entre corpos (*body interactions*) e os contactos (*contacts*) encontram-se inseridos na seção referente às conexões (*connections*) do *Ansys*, permitindo definir os contactos entre os vários corpos. Neste sentido, relativamente aos contactos, utilizaram-se as funcionalidades pré-definidas por defeito, uma vez que se consideraram adequadas para a modelação do fenómeno em questão. Assim, esses contactos são de tipologia ligado (*bonded*) e estabelecidos entre as paredes do prumo que se encontram enterradas no solo e, por isso, em contacto direto com este (Fig. 85).

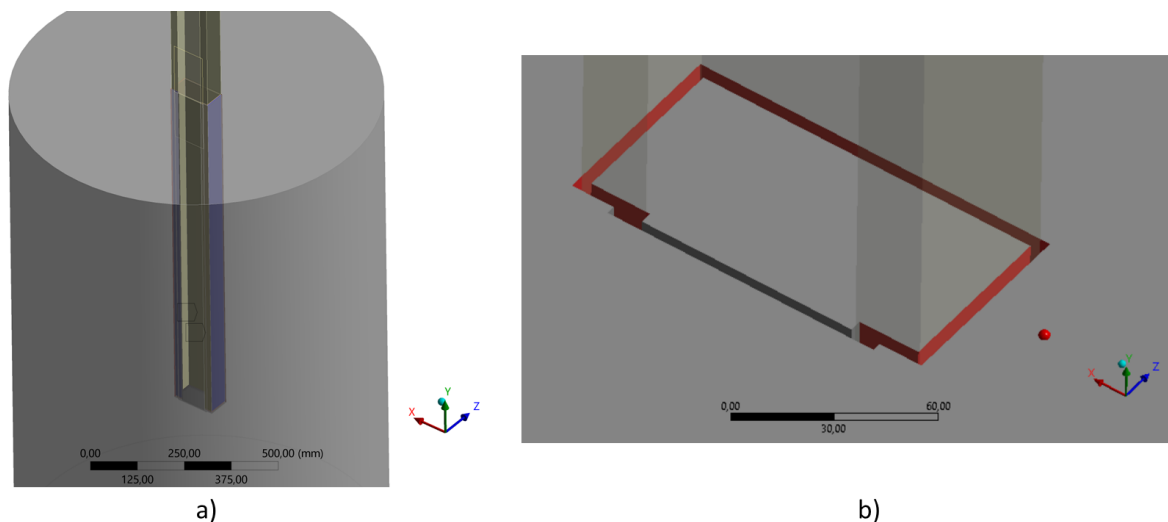


Figura 85 - Representação dos contactos *bonded* utilizados: a) Superfícies do prumo; e b) Superfícies do volume representativo do solo.

A definição deste contacto leva a que as duas entidades definidas se mantenham sempre ligadas ao longo da análise.

Por fim, em relação às interações entre corpos (*body interactions*) atribuídas (neste caso entre o prumo e o objeto de impacto), optou-se mais uma vez por manter a pré-definição sem atrito (*frictionless*).

3.6.4 Criação da Malha de Elementos Finitos

A criação da malha de elementos finitos corresponde a uma etapa preponderante na obtenção de resultados numéricos confiáveis. Este processo é dependente de um conjunto de fatores, nomeadamente do tipo e tamanho de elemento finito utilizado, assim como do refinamento de malha (tamanho do elemento finito) escolhido para determinadas regiões do modelo. A Figura 86, ilustra a malha utilizada no conjunto.

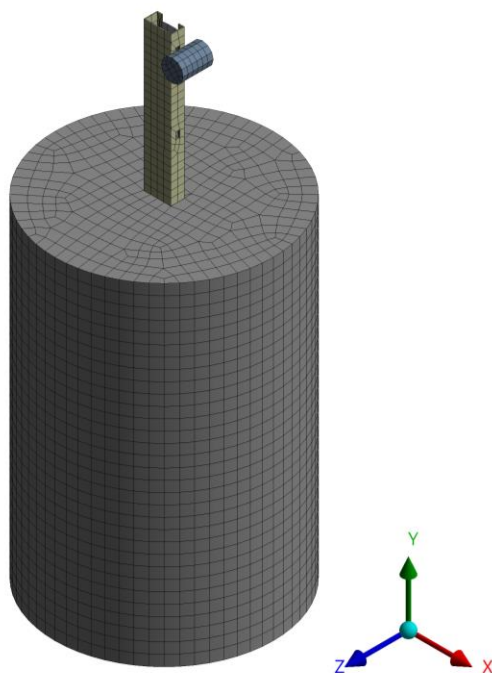
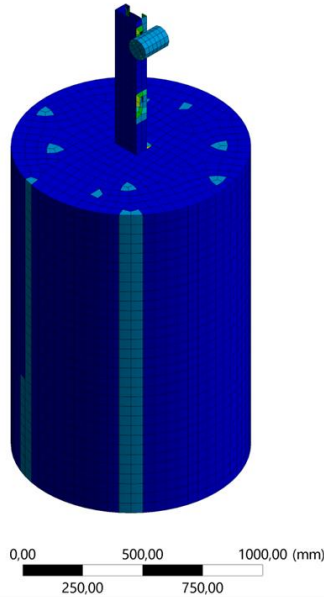
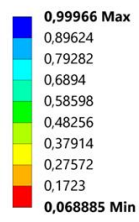


Figura 86 - Malha de elementos finitos aplicada ao modelo solo-prumo.

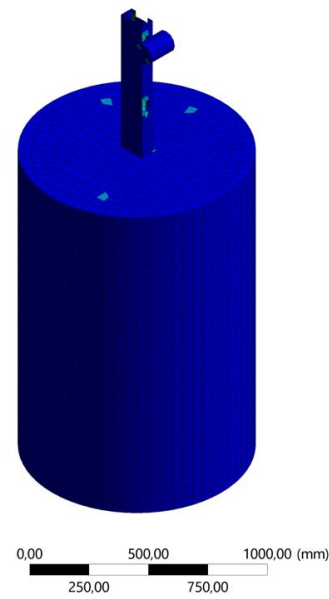
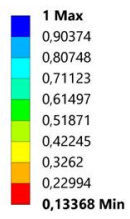
A Tabela 20 resume o tipo e o tamanho médio do elemento finito escolhido na discretização de cada um dos componentes mecânicos que formam o modelo solo-prumo. Uma vez que não existe à disposição nenhum resultado experimental que permita validar o procedimento adotado, a seleção do tipo e do tamanho dos elementos dos prumos e das placas foi realizada com base nas considerações utilizadas nas simulações numéricas globais, enquanto que em relação ao volume representativo, foram utilizados os parâmetros que devolviam uma malha com boa qualidade. Assim, a qualidade da malha pôde então ser avaliada e validada com recurso a um conjunto de funcionalidades oferecidas pelo *software*, das quais se utilizaram: *Element Quality*, *Orthogonal Quality* e a *Skewness* (Fig. 87). Para além disso, o método de conexão/contacto estabelecido entre as placas e o prumo, passou novamente pela utilização de uma *mesh connection* (Seção 3.4.5).

Mesh
Element Quality

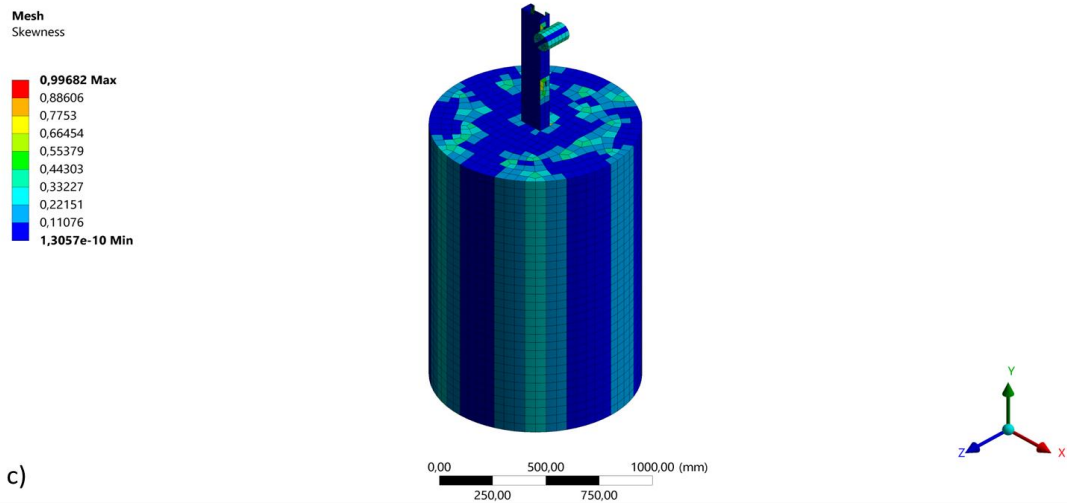


a)

Mesh
Orthogonal Quality



b)



c)

Figura 87 – Conjunto solo-prumo: a) *Element Quality*, b) *Orthogonal Quality*, c) *Skewness*.

A avaliação do campo cromático é em tudo idêntica à adotada nas simulações numéricas anteriores.

Tabela 20 - Características da malha utilizada no modelo numérico do conjunto solo-prumo.

Corpo	Tipo	Método	Designação	Tamanho [mm]
Objeto	Sólido	Nenhum	Hexa8	25
Solo		<i>Multizone</i>	Hexa8	50
Prumo	Casca	<i>Multizone</i>	Quad4/Tri3	30
Placas/Chapas		Nenhum	Quad4	30

A informação apresentada anteriormente é igualmente visualizável graficamente, tendo por base uma opção denominada por *charatheristic length* (Fig. 88).

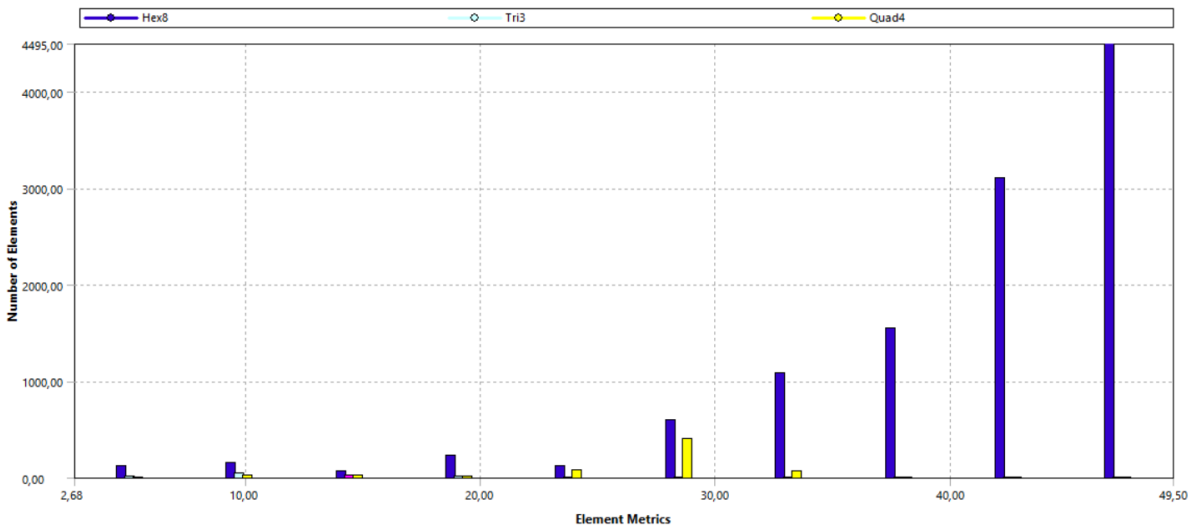


Figura 88 - *Charatheristic length* do modelo solo-prumo.

Finalmente, o modelo completo é composto por um total de 12 176 elementos e 13 944 nós, distribuídos por elementos 2D (Casca) e 3D (Sólidos).

3.6.5 Condições de Fronteira

As condições de fronteira aplicadas ao presente modelo numérico correspondem a um encastramento (*Fixed support*), à prescrição de um deslocamento horizontal (*Displacement*) e à definição da velocidade imposta ao impactor (*Velocity*).

O primeiro foi aplicado à superfície externa do volume representativo do solo, permitindo avaliar unicamente a zona que se encontra em contacto direto com o prumo, eliminando a possibilidade de parte da energia ser dissipada pela deformação do volume representativo do solo. Esta condição permite aproximar a simulação numérica, do comportamento desenvolvido na realidade.

Relativamente ao deslocamento horizontal, este foi atribuído ao objeto de impacto, garantindo que o seu movimento se processava única e exclusivamente no sentido do prumo, direcionando toda a sua energia para o mesmo (Fig. 89).

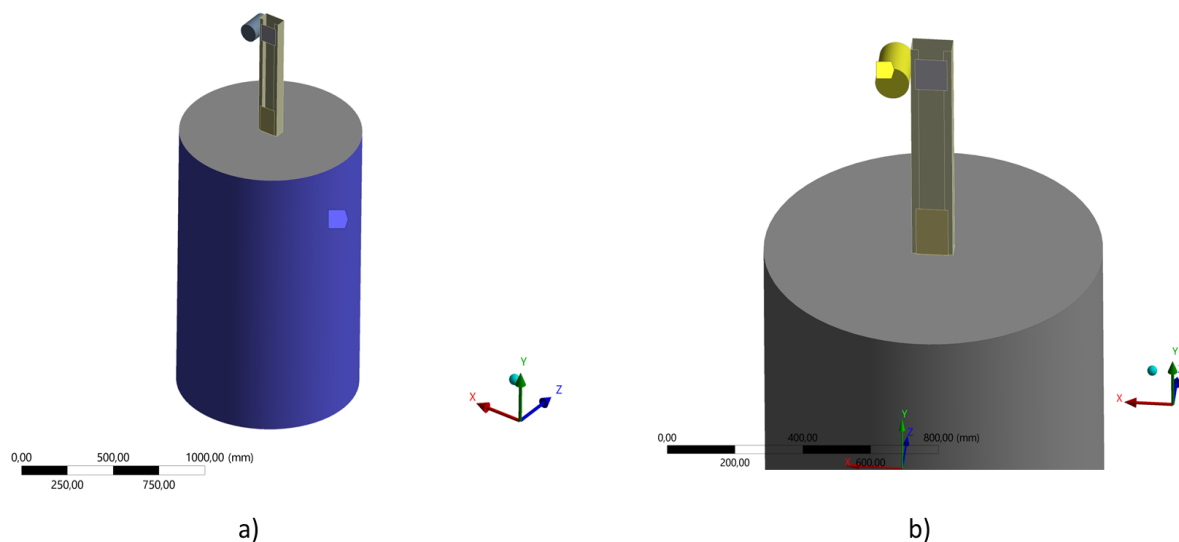


Figura 89 - Ilustração das condições de fronteira utilizadas no modelo solo-prumo: a) *Fixed support*, b) *Displacement*.

Por fim, atribuiu-se uma velocidade instantânea ao objeto de impacto, com uma intensidade igual a 36 km/h, no sentido negativo do eixo *xx* (Fig. 90). De referir o facto de que o impactor ter sido definido como um corpo rígido, pelo que não absorve qualquer parte da energia transmitida ao sistema, e, com isto, permite que o conjunto prumo-solo seja a única fonte de dissipação da mesma.

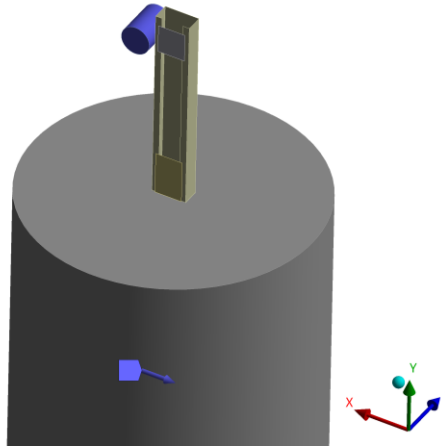


Figura 90 - *Velocity* atribuída ao objeto de impacto.

3.6.6 Soluções Obtidas

O principal objetivo deste modelo numérico, passa por permitir avaliar a resposta do conjunto solo-prumo, quando submetido a um evento de impacto localizado. Desta forma, serão retirados os resultados referentes ao deslocamento desenvolvido pela porção de solo acoplada ao prumo, assim como o deslocamento registado na direção de solicitação e tensões máximas sentidas pelo componente mecânico, em cada um dos tipos de solos analisados. De referir que, em relação ao prumo, serão retirados os valores presentes na zona de contacto com o objeto de impacto, correspondente à localização da viga em “W”.

Assim, do ponto de vista do comportamento dos tipos de solo analisados, obtiveram-se os resultados presentes na Figura 91.

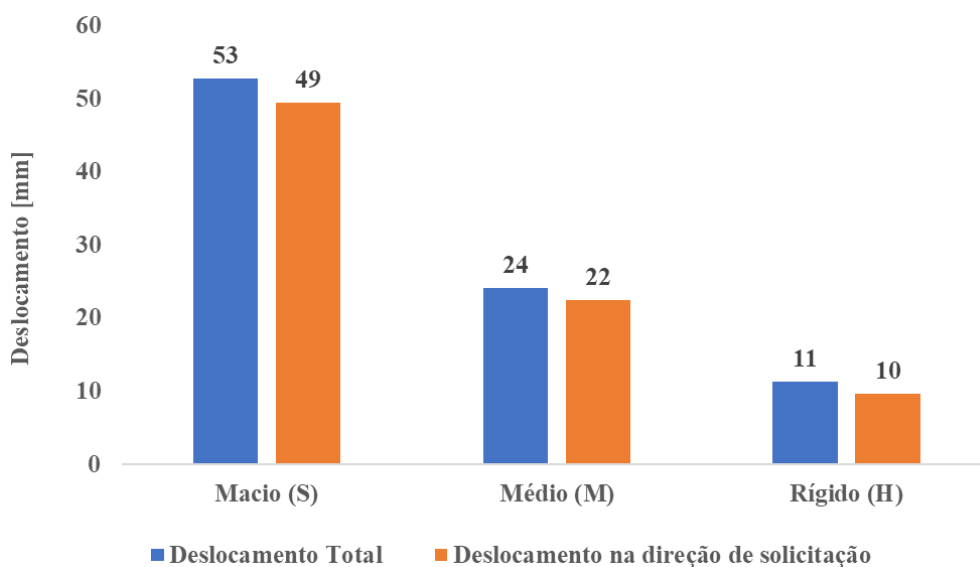
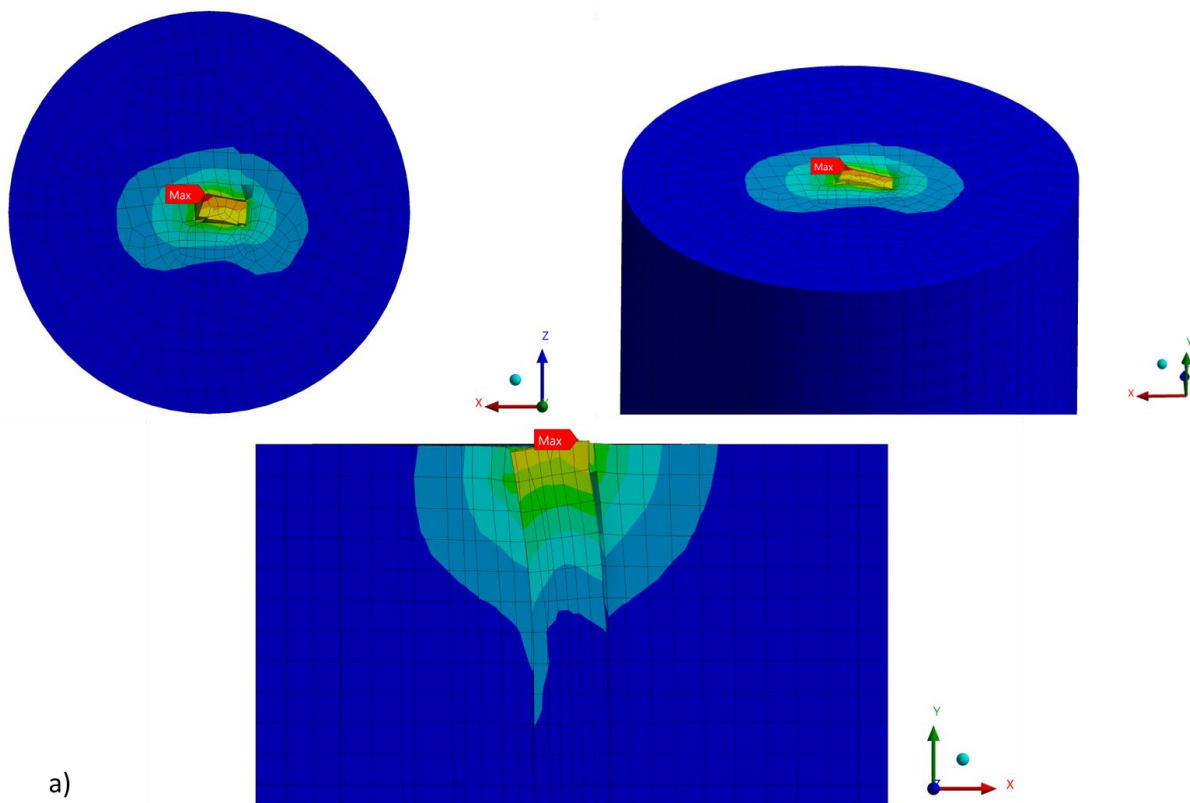


Figura 91 - Deslocamento registado em cada tipo de solo analisado.

Desta forma, conclui-se que o solo macio (*Soft*) apresenta um comportamento mais dúctil comparativamente aos restantes, permitindo-lhe absorver uma maior quantidade de energia transportada pelo objeto de impacto, sob a forma do deslocamento registado pelas suas partículas. Estes resultados comprovam as propriedades utilizadas na definição de cada um destes tipos de solo, uma vez que o solo com maior rigidez, revela uma maior resistência mecânica, não deformando de forma tão significativa como os restantes, verificando-se um decréscimo desta característica à medida que se incrementa o seu amaciamento. Este comportamento faz com que o prumo seja responsável pela absorção de uma maior quantidade da energia disponível, quando introduzido em solos de maior rigidez, comparativamente aos restantes.

A Figura 92 ilustra o campo de deslocamentos totais dos solos, após o evento de impacto.



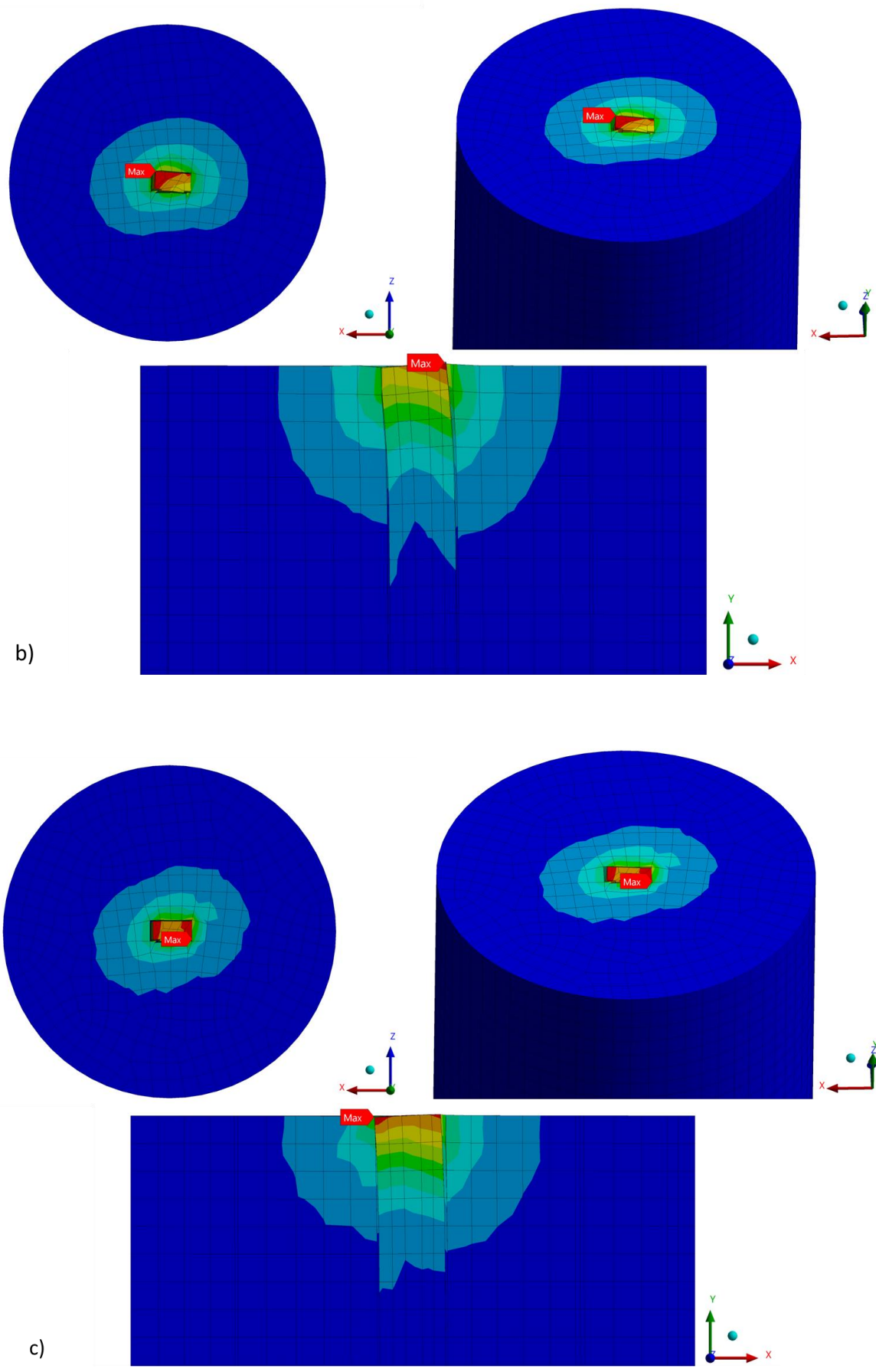


Figura 92 - Campo de deslocamentos totais, em cada um dos solos analisados: a) Macio; b) Médio; c) Rígido.

Relativamente ao prumo, como referido anteriormente, registaram-se os valores obtidos na zona de contacto do mesmo com o objeto de impacto, sendo esta coincidente com o furo de ligação superior e, conseqüentemente, com o principal objeto de dissipação de energia do conjunto das barreiras de segurança, isto é, a viga em “W”. Esta decisão resultou do facto do prumo pertencer a esse mesmo conjunto, sendo de maior relevância efetuar-se o registo dos valores obtidos nessa zona, em detrimento dos valores máximos. Desta forma, as Figuras 93 e 94, apresentam os valores médios dos deslocamentos e das tensões máximas registadas na linha de contacto entre o objeto e o prumo.

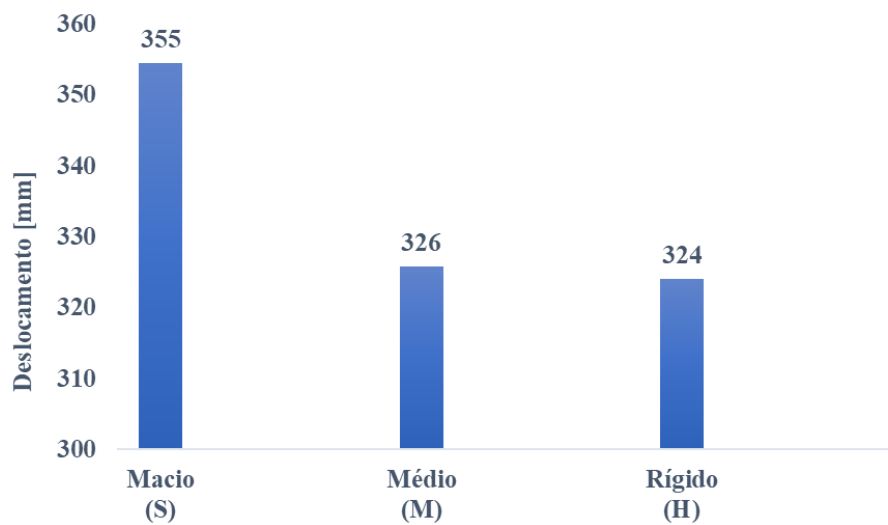


Figura 93 - Deslocamento do prumo na direção de solitação.

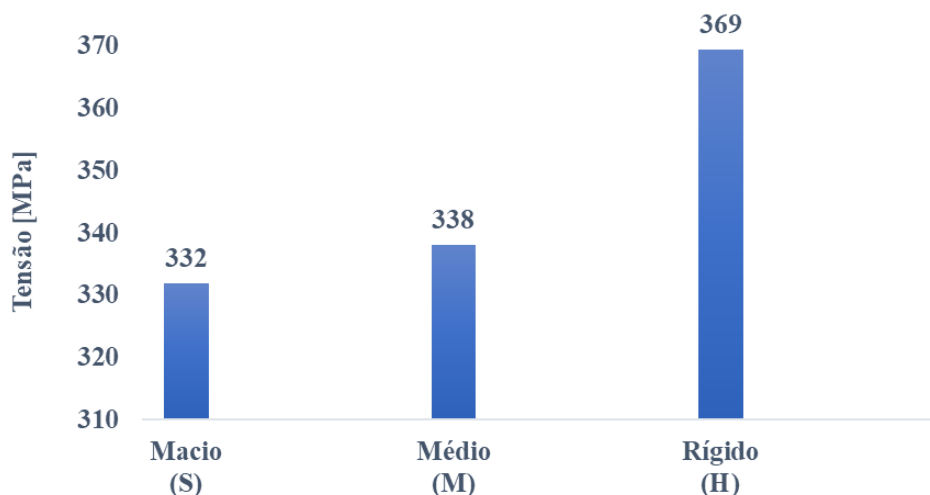


Figura 94 – Tensão equivalente de Von-Mises no prumo.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 93, verifica-se que o deslocamento do prumo é tanto maior, quanto menor for a resistência do solo no qual se encontra encastrado. Isto vai de encontro ao concluído anteriormente em relação aos resultados do solo, ou seja, um solo mais macio (com graus de

compactação inferiores), possibilita um deslocamento superior, comparativamente a solos que apresentem uma maior rigidez.

Por sua vez, observando a Figura 94, conclui-se o inverso. Os solos que apresentam uma rigidez superior, promovem um encastramento mais acentuado no prumo e, conseqüentemente, uma capacidade de deslocamento inferior. Estas diferenças ao nível do encastramento geram tensões mais elevadas nos prumos introduzidos nos solos médios e rígidos, resultantes da maior fixação promovida por esses mesmos elementos, em relação aos solos com características macias, uma vez que estes últimos permitem uma maior adaptação e acomodação das tensões instaladas, devido à maior facilidade proporcionada aos prumos para se deslocarem no próprio solo, fruto da menor compactação existente. As Figuras 95 e 96 apresentam o campo de deslocamentos e o campo de tensões globais registadas nos prumos, respetivamente.

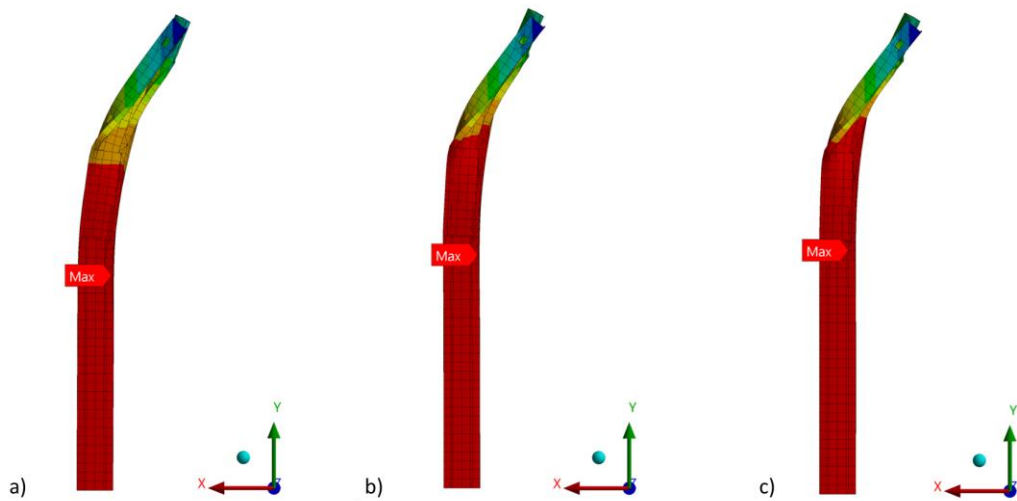


Figura 95 - Campo de deslocamentos (na direção de solitação) observado no prumo: a) Solo macio; b) Solo médio; c) Solo rígido.

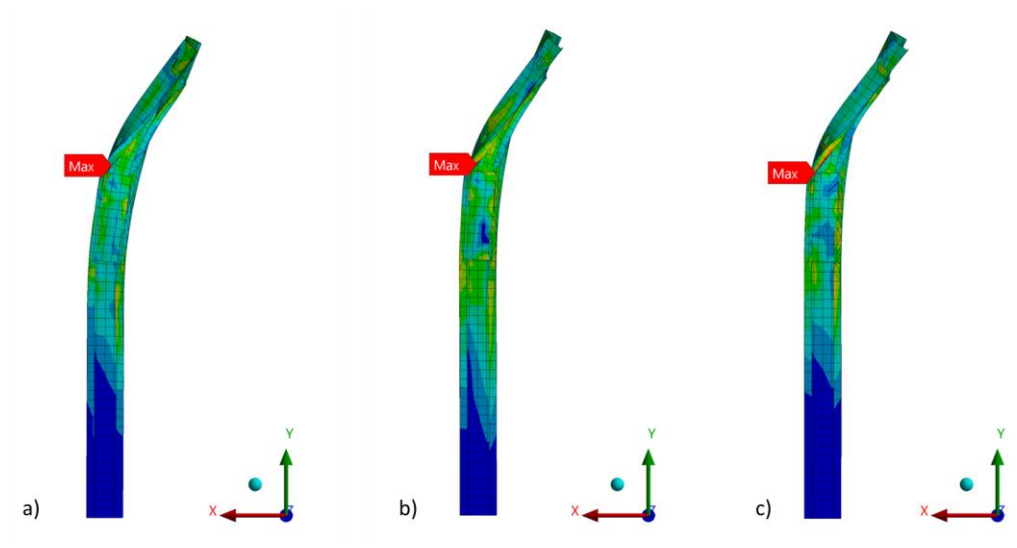


Figura 96 - Campo de tensões observado no prumo: a) Solo macio; b) Solo médio; c) Solo rígido.

Analisando o campo de deslocamentos e tensões verifica-se que as diferenças existentes são mínimas e pouco pronunciadas, permitindo embora perceber que a inserção dos prumos nos solos de maior rigidez, promove uma maior rotação da zona localizada no furo de ligação com a viga em “W”. Observando o campo de tensões, constata-se um incremento da tensão máxima instalada no prumo, próxima da zona de fixação, à medida que se vai aumentando a rigidez do solo. Além disso, é possível visualizar que a porção encastrada do prumo, no solo macio, sofre um maior deslocamento comparativamente com as restantes, como comprovado pelos resultados presentes na Figura 93.

4. CARATERIZAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE COMPONENTES E SUB-CONJUNTOS DAS BARREIRAS

Este capítulo reúne informações referentes ao trabalho numérico-experimental realizado no âmbito da caracterização de dois modelos de prumo que se idealizaram como adequados aos desempenhos N2W3 (Fig. 97a) e N2W2 (Fig. 97b)). Com isto, pretende-se avaliar experimentalmente o comportamento mecânico dos prumos analisados e, posteriormente, correlacionar essas respostas com a informação retirada numericamente.

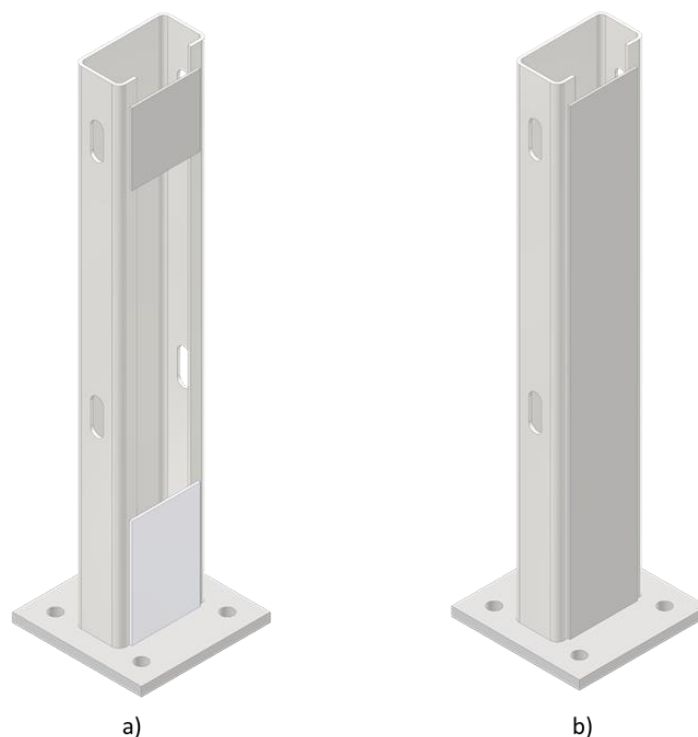


Figura 97 - Modelos geométricos analisados: a) N2W3; b) N2W2.

4.1 *Setup* experimental

Atendendo a que uma parte muito significativa da energia total a aplicar pelo veículo à barreira é responsável pela deformação dos prumos, no trabalho de caracterização mecânica, optou-se por analisar cada um dos modelos de prumo utilizados no trabalho de simulação anteriormente exposto, mediante a aplicação de uma solicitação que induz flexão.

Assim, para cada um dos modelos de prumo analisados (Anexos 2 e 3) procedeu-se ao aperto da flange através de quatro parafusos M16 de passo normal, de classe de resistência 8.8 (à compressão)

e 12.9 (à tração), assegurando a fixação do prumo na direção vertical (Fig. 98). Com respeito à carga, optou-se por fixar um atuador hidráulico na posição horizontal (Figuras 99 e 100), munido de um LVDT interior (amplitude 0-250 mm) e célula de carga com 100 kN de capacidade.

Em ambos os casos (i.e., para os modelos N2W3 e N2W2), o atuador foi colocado diretamente em contacto com o prumo, à cota de 600 mm (Figuras 99 e 100), relativamente à base da flange, atendendo a que essa medida corresponde à altura a que a viga em forma de “W” se encontra apertada ao prumo.



Figura 98 - Detalhe da fixação dos prumos à base do pórtico.



Figura 99 - *Setup* experimental do modelo de prumo da barreira N2W3.



Figura 100 - *Setup* experimental do modelo de prumo da barreira N2W2.

O ensaio mecânico decorreu com controlo de deslocamento, à velocidade de 50 mm/minuto, até ao instante em que se registou uma redução muito pronunciada da carga. Durante o ensaio registou-se a carga e o deslocamento, com uma frequência de aquisição igual a 5 Hz.

4.2 Modelo Numérico

Nesta secção apresentam-se as etapas realizadas tendo em vista a obtenção dos resultados provenientes das simulações numéricas das duas possíveis soluções de prumos a utilizar no conjunto de barreiras de segurança rodoviárias que apresentam o desempenho N2W3 e N2W2, expondo todas as considerações utilizadas para esse mesmo fim.

4.2.1 Modelação Geométrica

Do ponto de vista numérico, torna-se necessário realizar a modelação geométrica do conjunto, idêntica à verificada na realidade, de forma a, no final, obter-se um modelo calibrado.

Assim sendo, com o auxílio do *inventor*, realizaram-se as modelações referentes aos dois conjuntos de prumos em análise: o modelo presente no conjunto N2W3 (Fig. 97a), constituído pelo prumo, por duas placas e pela flange, e o modelo presente no conjunto N2W2 (Fig. 97b), constituído pelo prumo, por uma única placa e pela flange.

Uma vez obtidas as modelações dos conjuntos, utilizou-se o *Ansys spaceclaim* no sentido de se realizarem alguns ajustes durante o pré-processamento. Desta forma, recorrendo à ferramenta *share*

topology, criou-se um único corpo, através da contabilização das diferentes topologias que partilhavam superfícies e arestas (Fig. 101).

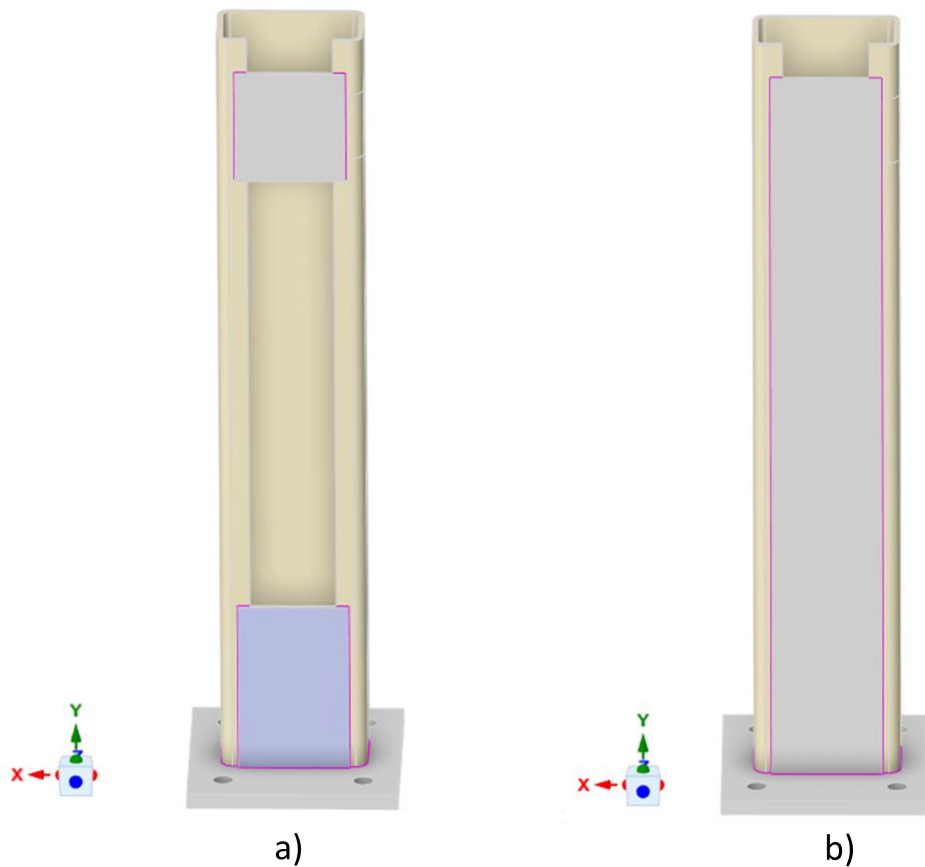


Figura 101 - *Share topology* aplicada em ambas as geometrias: a) N2W3; b) N2W2.

As referências utilizadas na criação de um único componente encontram-se sinalizadas a roxo na Figura 101. Este ajuste permite eliminar a necessidade de atribuição de qualquer tipo de contactos, tornando a simulação numérica igualmente fidedigna, mas mais eficiente a nível computacional.

4.2.2 Propriedades dos Materiais

Relativamente às propriedades dos materiais que compõe cada uma das partes de ambos os conjuntos estudados, e contrariamente ao realizado nas simulações numéricas precedentes, não foi utilizado o modelo de plasticidade definido pelo modelo de Johnson-Cook. Isto deve-se ao facto de, com estas simulações numéricas, se pretender retratar uma análise quase-estática e, como tal, os corpos não se encontram submetidos nem a elevadas taxas de deformação, nem a elevadas temperaturas, o que não justifica o emprego do modelo constitutivo supracitado. Deste modo, foi utilizado um modelo bilinear, cujos parâmetros atribuídos na sua definição constam da Tabela 21.

Tabela 21 - Propriedades do material utilizado na constituição do conjunto do prumo.

Componente	Massa específica [kg/m ³]	Módulo de elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson	Tensão de cedência [MPa]	Módulo tangente [GPa]
Prumo, Placas e Flange	7 850	*	0,3	*	*
(*) Definido por acordo numérico, de forma a reproduzir a rigidez inicial obtida experimentalmente.					

4.2.3 Criação da malha de elementos finitos

A estruturação da malha em torno dos elementos mecânicos presentes na simulação numérica compreende uma etapa fundamental no processo de obtenção de resultados numéricos exatos e correlacionáveis com os obtidos de forma experimental. Desta forma, a Figura 102 apresenta a malha de elementos finitos utilizada em cada um dos modelos.

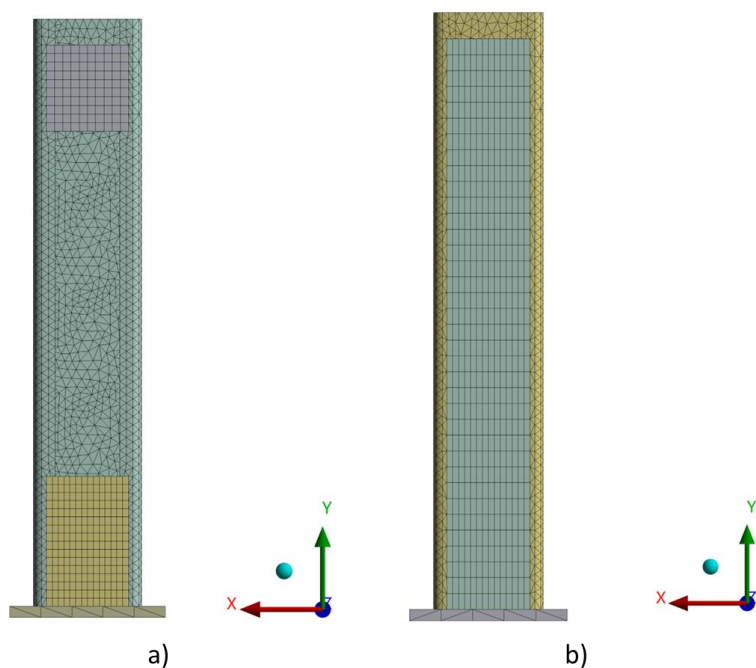


Figura 102 - Malha de elementos finitos aplicada aos modelos de prumos: a) N2W3; b) N2W2.

À semelhança do realizado nas simulações precedentes, a qualidade da malha projetada pode ser avaliada e validada com recurso a um conjunto de funcionalidades oferecidas pelo *software*, das quais se utilizaram: *Element Quality*, *Orthogonal Quality* e a *Skewness* (Figs. 103 – 105).

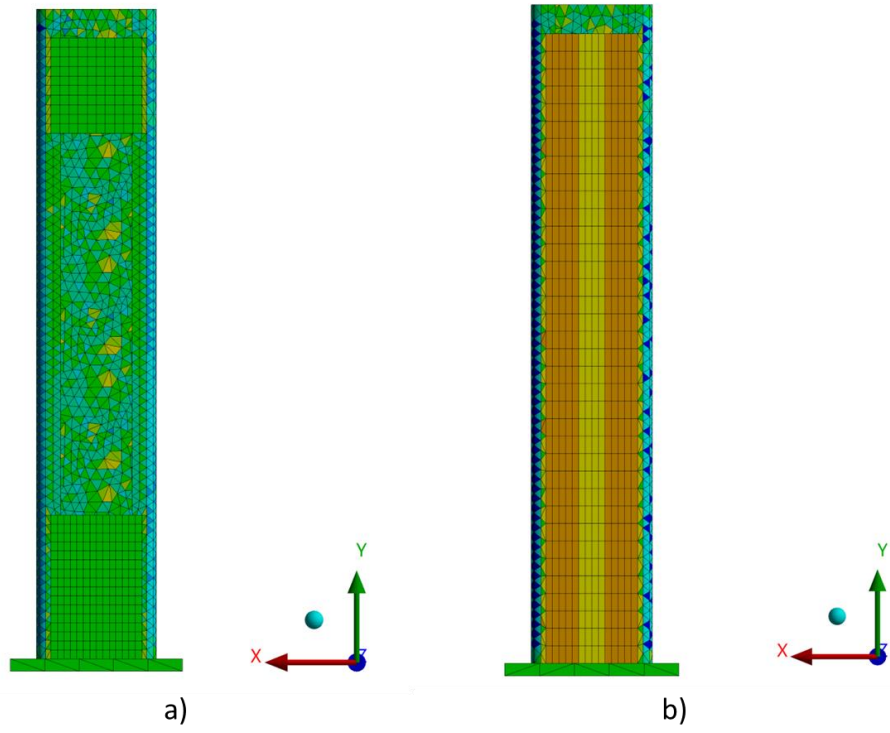


Figura 103 - *Element Quality*. a) N2W3; b) N2W2.

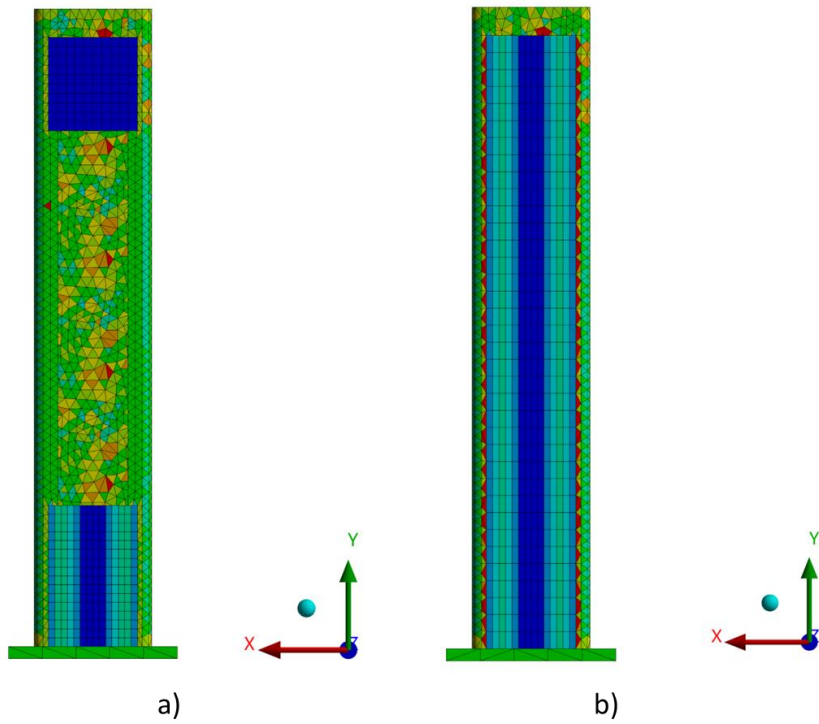


Figura 104 - *Orthogonal Quality*. a) N2W3; b) N2W2.

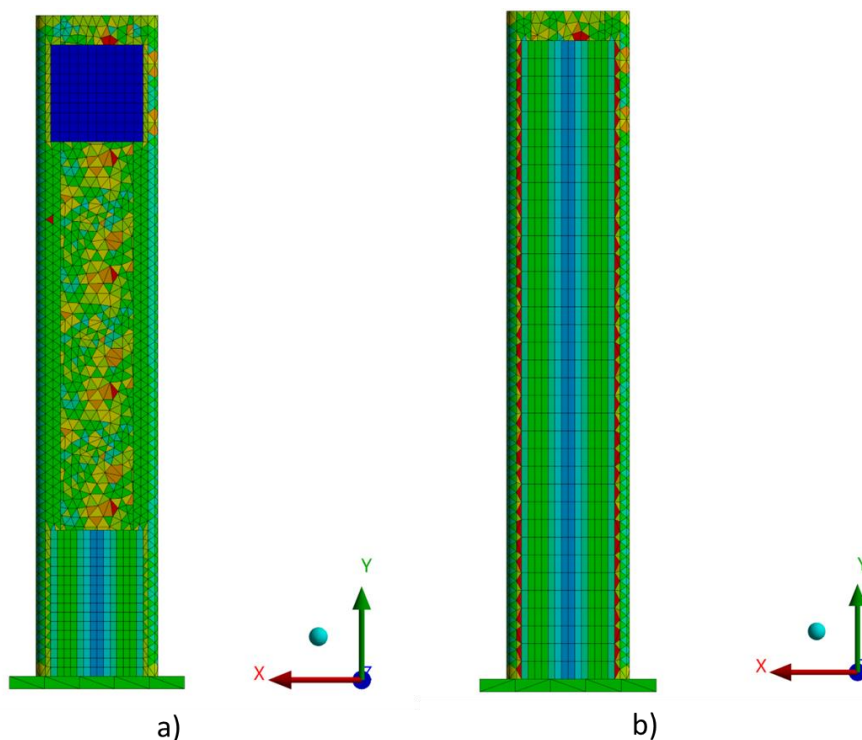


Figura 105 - *Skewness*: a) N2W3; b) N2W2.

Avaliando o campo cromático existente em cada uma das ilustrações das Figs. 103 - 105 é possível concluir que a malha utilizada apresenta uma qualidade desejável para a obtenção dos resultados. Contudo, contrariamente ao constatado nas simulações anteriores, conclui-se que esta malha não apresenta uma qualidade tão elevada, ainda que as cores verde e azul sejam predominantes. De referir ainda o facto de que, a principal diferença entre as malhas estruturadas nos dois modelos, é relativamente às chapas metálicas.

A Tabela 22 resume o tipo e o número de elementos finitos utilizados no modelo numérico.

Tabela 22 - Características da malha utilizada nos modelos numéricos dos prumos.

Corpo	Tipo	Designação ³	Tamanho [mm]
Prumo	Sólido	Tet10	10
Placas/Chapas	Sólido	Pyr13/Hex20	
Flange	Sólido	Tet10	Predefinido

³ Tet10: Elemento tetraédrico de 10 nós; Pyr13: Elemento piramidal de 13 nós; Hex20: Elemento hexaédrico de 20 nós

Uma vez que se tratam de análises implícitas, de relativa simplicidade, e contrariamente ao utilizado nas simulações numéricas precedentes, na estruturação da malha procedeu-se à utilização de elementos sólidos. O modelo numérico respeitante à configuração N2W3 apresenta assim um total de 30 371 nós e 14 159 elementos, enquanto o modelo referente à configuração N2W2 apresenta um total de 31 427 nós e 14 413 elementos.

4.2.4 Condições de Fronteira

As condições de fronteira aplicadas ao presente modelo numérico correspondem a um encastramento (*fixed support*) e à prescrição de um deslocamento horizontal (*displacement*). Relativamente ao *fixed support*, este pretendeu representar a fixação da flange à chapa de reação, conseguida por intermédio de parafusos da classe 8.8 (zona à compressão) e 12.9 (zona à tração). Uma vez que nenhum destes parafusos ficará sujeito a cargas suficientemente elevadas para provocar a sua cedência, estes elementos de ligação funcionam como componentes teoricamente perfeitos, pelo que o encastramento é corretamente atribuído às superfícies internas dos furos existentes na flange (Fig. 106).

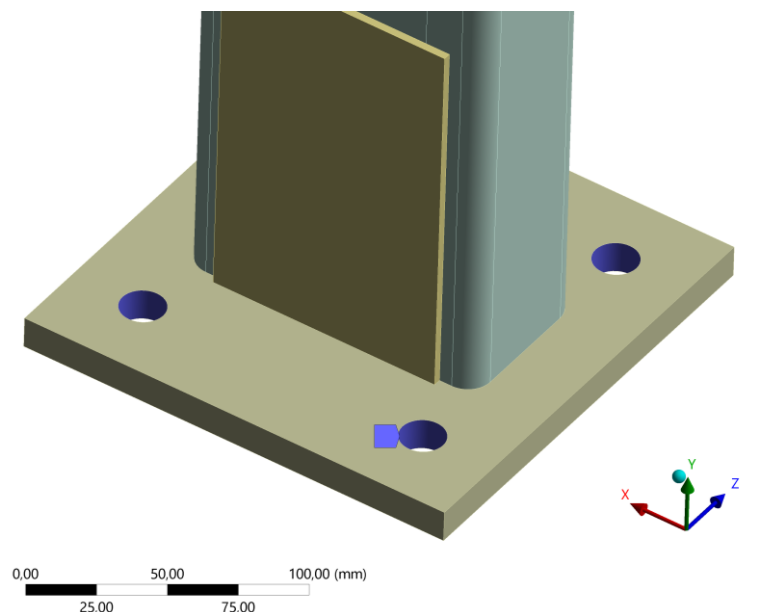


Figura 106 - *Fixed support* utilizado na fixação da flange.

Em relação ao deslocamento prescrito, a sua utilização visa representar a aplicação da carga nas superfícies exteriores do prumo. A localização deste deslocamento procurou representar o ensaio experimental realizado, contabilizando por isso todo o campo de intervenção do atuador (Fig. 107).

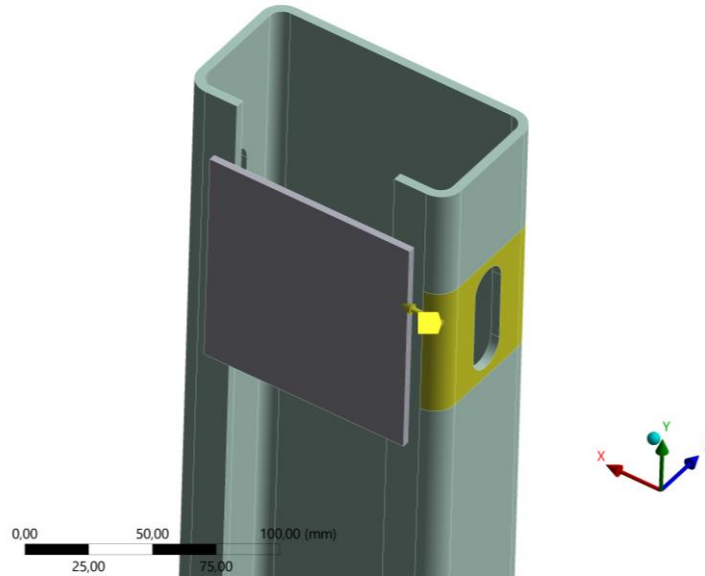


Figura 107 - *Displacement* aplicado ao prumo.

De referir que o deslocamento imposto, apresenta o valor correspondente a 200 mm.

4.3 Resultados numérico-experimentais obtidos

As Figuras 108a) e 108b) ilustram a configuração típica da deformada registada em cada um dos modelos de prumo (N2W3 e N2W2), no final dos ensaios experimentais. Por sua vez, as Figuras 109a) e 109b) ilustram a configuração da deformada registada em cada um dos modelos de prumo (N2W3 e N2W2), no final das simulações numéricas.

No modelo N2W3 é visível a deformação do prumo acima da secção de reforço do prumo (chapa soldada ao longo da altura do prumo acima da flange). Este padrão é acompanhado da rotação do prumo, acima da secção indicada.

No modelo N2W2 constata-se a rotura do prumo junto à flange, ao longo da zona afetada termicamente (ZAT), em resultado da aplicação de um cordão de soldadura, com início a partir do lado onde é aplicada a solicitação (região submetida à tração, onde o momento fletor é máximo).

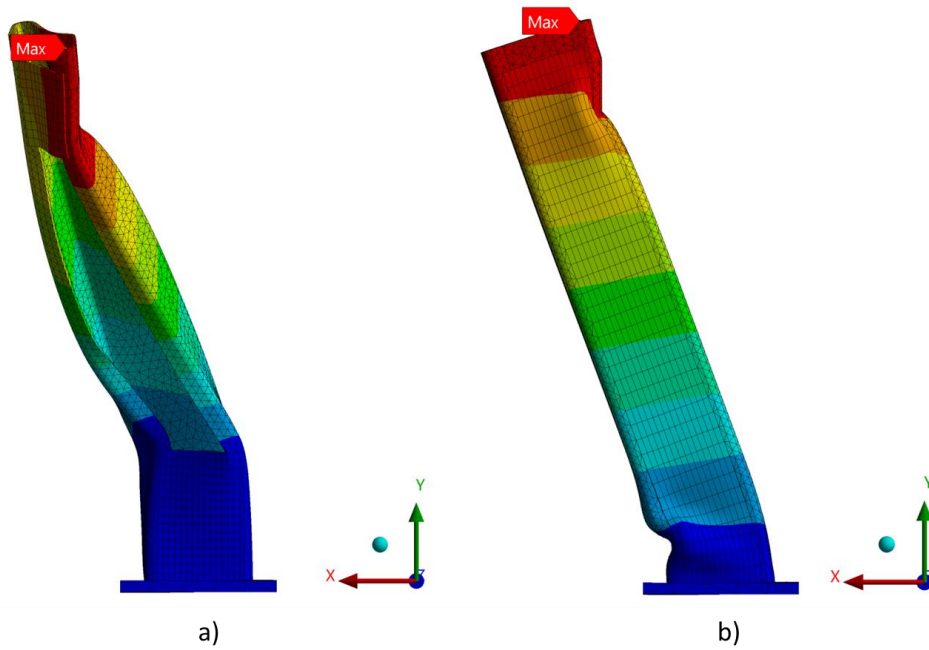


a)



b)

Figura 108 - Deformada obtida experimentalmente em cada um dos modelos de prumo: a) N2W3 e b) N2W2.



a)

b)

Figura 109 - Deformada obtida numericamente em cada um dos modelos de prumo: a) N2W3 e b) N2W2.

Os resultados dos ensaios mecânicos realizados nos modelos de prumo N2W3 e N2W2 encontram-se representados nas Figuras 110 e 111, respetivamente.

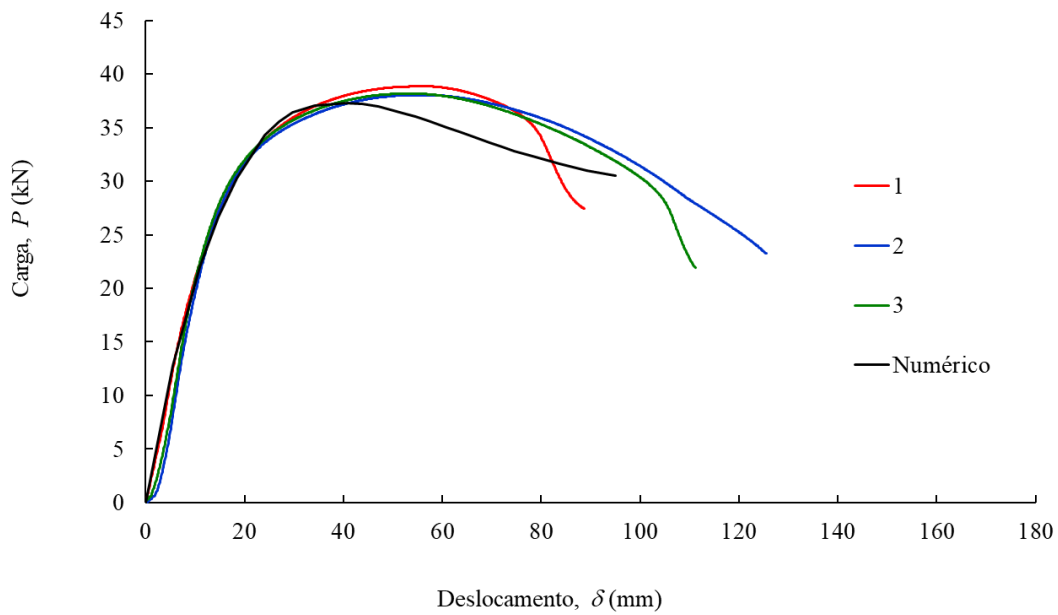


Figura 110 - Curvas força-deslocamento do modelo de prumo da barreira N2W3.

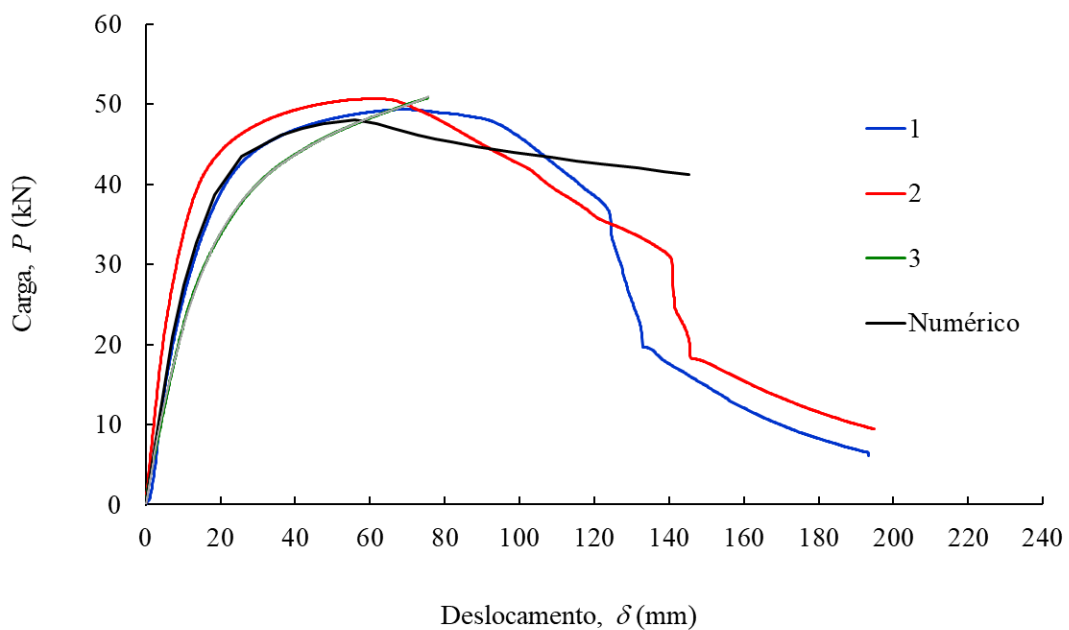


Figura 111 - Curvas força-deslocamento do modelo de prumo da barreira N2W2.

Num e noutro caso, a dispersão de resultados é praticamente inexistente tanto no que respeita à rigidez elástica (ou inicial), como à carga máxima (Tabelas 23 e 24). Registou-se, igualmente, a energia total dissipada no processo de deformação ocorrido.

Estes resultados foram posteriormente resumidos na Tabela 25, com respeito à avaliação dos valores médios das mesmas grandezas, tendo sido possível estabelecer uma comparação do desempenho mecânico dos dois modelos de prumo, tendo por base não só os resultados experimentais, mas também os resultados obtidos numericamente.

Tabela 23 - Resultados obtidos nos ensaios experimentais de flexão dos prumos da barreira N2W3.

Parâmetros	Provete	Unidades	Valores
Rigidez elástica	1, 2 e 3	kN/mm	2,30; 1,84; 2,01
Carga máxima	1, 2 e 3	kN	38,84; 38,03; 38,16
Deslocamento máximo	1, 2 e 3	mm	88,67; 125,48; 111,18
Energia total	1, 2 e 3	kJ	2,87; 2,23; 2,41

Tabela 24 - Resultados obtidos nos ensaios experimentais de flexão dos prumos da barreira N2W2.

Parâmetros	Provete	Unidades	Valores
Rigidez elástica	1, 2 e 3	kN/mm	3,17; 3,96; 2,27
Carga máxima	1, 2 e 3	kN	49,37; 50,65; 50,79
Deslocamento máximo	1, 2 e 3	mm	193,28; 194,89; 75,53
Energia total	1, 2 e 3	kJ	6,22; 6,71; 2,89

Tabela 25 - Valores médios das grandezas registadas nos ensaios numérico-experimentais de flexão.

Parâmetros	Experimental		Numérico		Erro numérico-experimental [%]	
	N2W3	N2W2	N2W3	N2W2	N2W3	N2W2
Rigidez elástica [kN/mm]	2,05	3,13	2,01	2,95	1,80	5,89
Carga máxima [kN]	38,35	50,27	37,28	48,01	2,75	4,50
Deslocamento máximo [mm]	108,44	154,57	205,47*	221,62*	-	-

(*) Deslocamento resultante do valor imposto para assegurar o acordo numérico-experimental global.

Assim, tendo por base os valores experimentais presentes nas tabelas anteriores, é possível verificar que o prumo referente ao modelo N2W2 registou um acréscimo de 53% no valor da rigidez elástica, de 31% no valor da carga máxima, de 43% no valor do deslocamento máximo, e de 111% na energia total dissipada no processo de deformação, relativamente aos valores homólogos obtidos para o prumo do modelo N2W3.

Em relação à configuração final do prumo pertencente ao modelo de barreira N2W2 constata-se, pela análise da Figura 108 b), que este entrou em rotura numa zona próxima da flange, mais concretamente na zona afetada termicamente. Posto isto, e comparativamente com a configuração final obtida por via numérica, verifica-se que esse fenómeno não foi desenvolvido, uma vez que não se reproduziu a iniciação e propagação de dano visível. Contudo, analisando o campo de tensões presente na Figura 112 a), conclui-se que a zona tracionada do prumo apresenta, ao longo da simulação, valores superiores à tensão de rotura característica do material (470-630 MPa), pelo que indicia o facto de este fenómeno se poder iniciar nessa localização, comprovando o resultado obtido experimentalmente (Ramada Aços, 2017). Por outro lado, observando a Figura 112 b), verifica-se que a tensão máxima global instalada no prumo ocorre na zona submetida à compressão, contrariando a premissa anteriormente exposta. Isto poderá advir do facto de que, uma vez que não se modelou (numericamente) a iniciação da fratura, não ocorreu qualquer alívio de tensões existentes, tanto naquela área, como na sua periferia, havendo acumulação das mesmas na zona submetida à compressão.

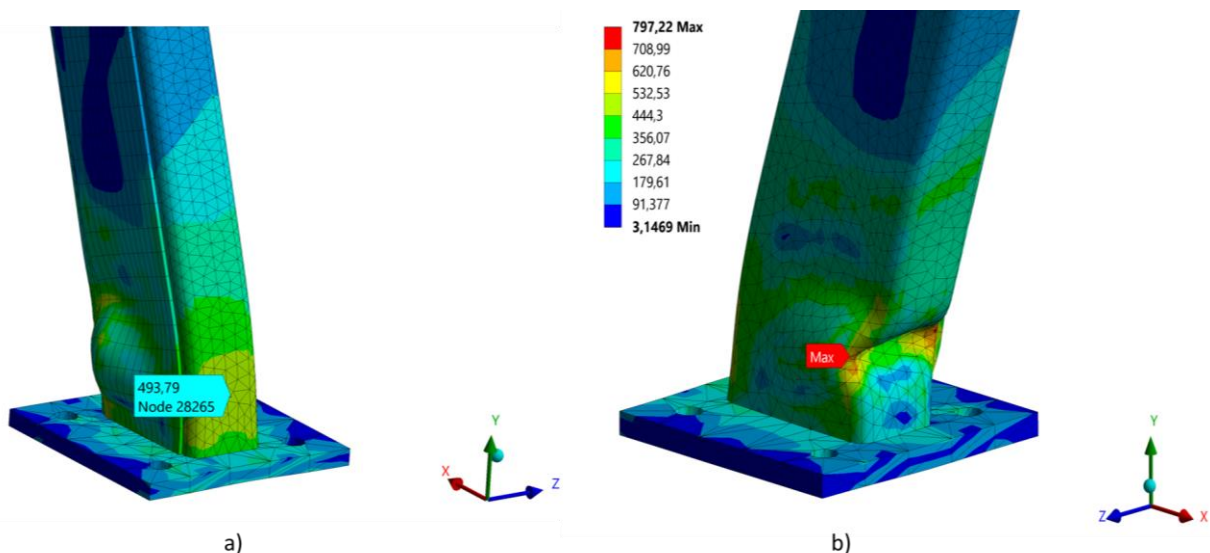


Figura 112 - Campo de tensões desenvolvido na base do prumo: a) Zona tracionada; b) Zona comprimida.

Finalmente, uma vez realizada a calibração do modelo numérico em função dos resultados obtidos experimentalmente, conclui-se que os sub-conjuntos avaliados apresentam as propriedades mecânicas constantes na Tabela 26.

Tabela 26 - Propriedades do material utilizado na constituição do conjunto do prumo, após o acordo numérico-experimental.

Componente	Massa específica [kg/m ³]	Módulo de elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson	Tensão de cedência [MPa]	Módulo tangente [GPa]
Prumo, Placas e Flange	7 850	75	0,3	345	1

Analisando a Tabela 26, verifica-se que a principal diferença entre as propriedades mecânicas inicialmente consideradas para a modelação do material constituinte do conjunto analisado, reside no valor do módulo de elasticidade que teve de ser atribuído para reproduzir a rigidez inicial (i.e., 75 GPa). Uma vez que cada um dos componentes mecânicos pertencentes ao conjunto é fabricado com o aço S355, seria de esperar que o seu módulo de elasticidade apresentasse o valor correspondente a este tipo de material, ou então muito próximo, isto é, de aproximadamente 200 GPa. Contudo, conclui-se que, nas condições especificadas para o ensaio realizado, os conjuntos apresentam uma rigidez muito inferior à dos vários componentes que o compõem, assemelhando-se à rigidez característica de um alumínio. Este resultado carece de uma análise mais aprofundada, focado nas condições de fronteira consideradas nesta análise numérica (resposta da ligação aparafusada), visto que não se vislumbram outras razões que possam ter estado na origem de uma rigidez da ligação tão diferente da que se mediu experimentalmente. Ainda assim, de ressaltar a tensão de cedência determinada na correlação efetuada (345 MPa), sendo esta bastante próxima da característica dos materiais utilizados na constituição dos componentes da estrutura (355 MPa).

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como principal objetivo desenvolver um modelo numérico capaz de avaliar o comportamento de um modelo de barreiras de segurança rodoviária proposto pela empresa Metalgalva S.A. Adicionalmente, com esse mesmo modelo numérico, avaliou-se uma alternativa ao modelo geométrico original, estudando-se ainda alguns dos sub-conjuntos constantes nos mesmos (quer numérica, quer experimentalmente), para além de se analisar de forma suplementar o comportamento individual desses mesmos componentes, quando inseridos em diferentes tipos de solo.

Relativamente ao procedimento adotado para a modelação geométrica de todos os componentes presentes nas mais variadas análises, constata-se que a utilização de modelos constituídos por elementos de casca corresponde a uma alternativa viável e menos dispendiosa a nível computacional para a sua representação, comparativamente à modelação geométrica sólida corrente. A utilização do *Inventor* e o complemento oferecido pelo ambiente de modelação do *Ansys, spaceclaim*, revelaram-se ferramentas perfeitamente capazes de proporcionar a obtenção de modelos numéricos, tanto complexos, como simplificados.

Em relação ao modelo utilizado para a representação do veículo, conclui-se que as suas especificações cumprem os requisitos impostos pela normalização em vigor, o que valida a sua utilização na avaliação global das barreiras de segurança. Porém, de acordo com a sua aferição individual, verifica-se que a sua capacidade de deformação aquando de um evento de impacto não é acentuada (apenas 4% em relação às suas dimensões nominais), pelo que a sua deformabilidade é questionável. Ainda assim, o modelo permite atingir o fim pretendido.

No que se refere ao propósito principal do estudo realizado, conclui-se que o nível de contenção para o qual a barreira de segurança rodoviária foi idealizada (N2W3), não é atingido com sucesso, visto que o deslocamento máximo obtido correspondeu a 1 433,5 mm, superior aos 1 000 mm impostos pela norma EN 1317. Este resultado adveio do modelo numérico desenvolvido, sendo que neste teve-se um conjunto de pressupostos e simplificações (promovidas no sentido de assegurarem um modelo viável em termos computacionais e de soluções produzidas) que culminaram numa abordagem conservadora do ponto de vista do fabricante, garantindo, no entanto, a segurança dos condutores e peões na sua totalidade. De igual forma, o modelo geométrico alternativo foi avaliado de acordo com o modelo numérico desenvolvido, não garantindo o nível de contenção suposto (N2W2), apresentando um deslocamento máximo no valor de 1 206,3 mm, superior aos 800 mm imposto pela norma EN 1317. Ao longo deste processo de simulação, concluiu-se ainda que algumas das simplificações numéricas

introduzidas, nomeadamente a substituição da representação física dos parafusos por elementos de mola e a utilização de elementos de casca na estruturação da malha dos componentes, conduzem à obtenção de resultados positivos neste tipo de análises. Contudo, algumas das simplificações aplicadas não permitiram representar de forma totalmente real o fenómeno em estudo, nomeadamente a ausência de um comportamento deformável por parte do veículo, definida no sentido de permitir evitar algumas interpenetrações previamente desenvolvidas em modelos não finalizados, assim como a restrição imposta ao seu deslocamento. Ainda que as interações da maioria dos corpos tenham sido bem modeladas no *software Ansys*, esta problemática pode ser ultrapassada de forma mais assertiva com recurso a uma atribuição mais cuidada e detalhada dos contactos conhecidos entre os mais variados corpos, não havendo a necessidade de se atribuírem comportamentos rígidos a alguns dos componentes intervenientes, como efetuado. Ainda assim, conclui-se que o modelo numérico desenvolvido cumpriu o seu propósito com sucesso.

O estudo desenvolvido no âmbito da avaliação da interação solo-prumo, permitiu retirar um conjunto de conclusões acerca dos diferentes tipos de solo analisados. Foram definidos 3 tipos de solo, através do modelo geomecânico de Mohr-Coulomb, com características distintas ao nível da sua rigidez e compactação (Rígido (H) > Médio (M) > Macio (S)). Conclui-se que, quando atuados por uma carga dinâmica, o solo macio revela um deslocamento total mais acentuado na porção acoplada ao prumo (53 mm), sendo que esse deslocamento vai diminuindo à medida que se aumenta a sua resistência mecânica, como seria de esperar. Este comportamento permite aferir que os prumos introduzidos nos solos de maior rigidez dissipam uma maior quantidade de energia comparativamente aos encastrados em solos mais macios, uma vez que nestes últimos, parte da energia do objeto de impacto é dissipada na deformação do próprio solo. Em relação ao prumo, procedeu-se à análise dos seus resultados na zona adjacente ao furo de fixação das vigas em “W”, isto é, onde o objeto animado impactou. Conclui-se, por análise dos resultados referentes ao deslocamento e à tensão nesse local, que os prumos ancorados nos solos rígidos sofrem um menor deslocamento (324 mm) e, em contrapartida, estão submetidos a uma tensão mais elevada (369 MPa), comparativamente aos restantes. Esta informação corrobora a conclusão enunciada anteriormente para cada um dos solos. Em suma, quando introduzidos em solos rígidos, os prumos apresentam um deslocamento inferior, e uma tensão instalada superior, sendo responsáveis pela existência de menores deslocamentos globais quando introduzidos num conjunto característico de uma barreira de segurança, mas podem entrar mais facilmente em fase de rotura.

Em relação à caracterização numérico-experimental de componentes e sub-conjuntos das barreiras de segurança, mais concretamente dos prumos e das chapas soldadas nos mesmos, conclui-se que a configuração idealizada para a constituição do conjunto projetado para o nível de contenção N2W2 revela resultados mais positivos no que ao seu comportamento mecânico diz respeito. A utilização de uma só chapa metálica, ao invés de duas, permite que a deformada do prumo na zona superior corresponda a uma rotação de menor amplitude, incrementando, por isso, a sua rigidez à torção. Posto isto, comparativamente com a configuração aberta (prumo idealizado para o nível de contenção N2W3), a geometria fechada (prumo idealizado para o nível de contenção N2W3) revela um acréscimo de 53% no valor da rigidez elástica, de 31% no valor da carga máxima, de 43% no valor do deslocamento máximo, e de 111% na energia total dissipada no processo de deformação, permitindo aferir que esta alternativa é viável para o suporte de esforços mecânicos de maior intensidade. Em contrapartida, devido à sua elevada rigidez, constata-se ainda a iniciação e propagação de uma fenda próxima da zona termicamente afetada, na região do cordão de soldadura.

Finalmente, o modelo numérico projetado no sentido de avaliar os modelos de barreiras de segurança rodoviária propostos cumpriu o seu propósito com sucesso, ainda que tenha sofrido um conjunto de simplificações que o possam ter tornado algo conservador. Relativamente ao *software* utilizado, este revelou ter potencial para a realização de análises explícitas com o grau de complexidade demonstrada neste trabalho, embora apresente algumas limitações, nomeadamente em relação à definição de determinadas equivalências numéricas e em relação ao tempo computacional despendido para a obtenção das soluções.

6. TRABALHOS FUTUROS

Ainda que o modelo numérico produzido permita obter os resultados necessários para satisfazer o cumprimento da norma EN 1317, existem alguns aspetos que podem vir a ser aperfeiçoados no futuro, no sentido de se obterem soluções mais realistas.

Assim, à semelhança do que foi concluído na seção 2.4, um dos aspetos a melhorar passa pela geometria do modelo utilizado na representação do veículo, assim como o seu comportamento durante a simulação numérica. Posto isto, ainda que as dimensões gerais do modelo presente na simulação numérica global, respeitem as especificações impostas pela norma EN 1317, o veículo não apresenta o nível de detalhe requerido para uma representação dos modelos utilizados à escala real, nomeadamente ao nível de pormenores geométricos, como os presentes na Figura 19. Após a garantia deste nível de detalhe por parte do modelo, realizar-se-ia, novamente, a atribuição de um comportamento deformável ao mesmo, ao invés de rígido, no sentido de contabilizar a dissipação de energia provocada pela deformação do próprio automóvel, algo que não foi realizado, além de não confinar o seu deslocamento unicamente à direção horizontal (paralelo ao solo).

Para além disso, e surgindo associado à melhoria anteriormente exposta, dever-se-á estabelecer de forma mais consistente e precisa alguns pares de contacto previamente conhecidos, dando particular importância ao par composto pelo veículo e pelas vigas que serão inicialmente impactadas, de modo a evitarem-se penetrações, como as ilustradas pela Figura 53. Adicionalmente, dever-se-ão definir os pares de contacto existentes entre a viga em “W” e o prumo, entre o prumo e a suspensão em C e entre esta última e o DPM. Apesar disso, verificou-se que a utilização das interações entre corpos (*body interactions*) na sua definição, funcionou de forma positiva, no sentido em que não se verificaram interpenetrações e o comportamento físico da barreira foi realista. Contudo, esta melhoria surge no sentido de tornar ainda mais realista o comportamento destes elementos mecânicos.

Relativamente aos elementos de ligação, dever-se-á definir, com recurso a equivalências numéricas alternativas, não só a pré-tensão associada aos parafusos, mas também a possibilidade de eles atingirem a rotura, como se verifica na realidade. Isto permitirá reproduzir o destacamento existente entre alguns dos elementos mecânicos do conjunto, que poderá contribuir para a dissipação de alguma da energia interveniente.

Posto isto, uma vez que se realizou uma avaliação numérica da interação entre o solo e o prumo, dever-se-ão realizar ensaios experimentais que corroborem o comportamento desenvolvido, de modo a

permitir uma posterior inserção dos volumes representativos do solo no modelo geométrico global e, conseqüentemente, na simulação numérica global, como ilustrado pela Figura 113.

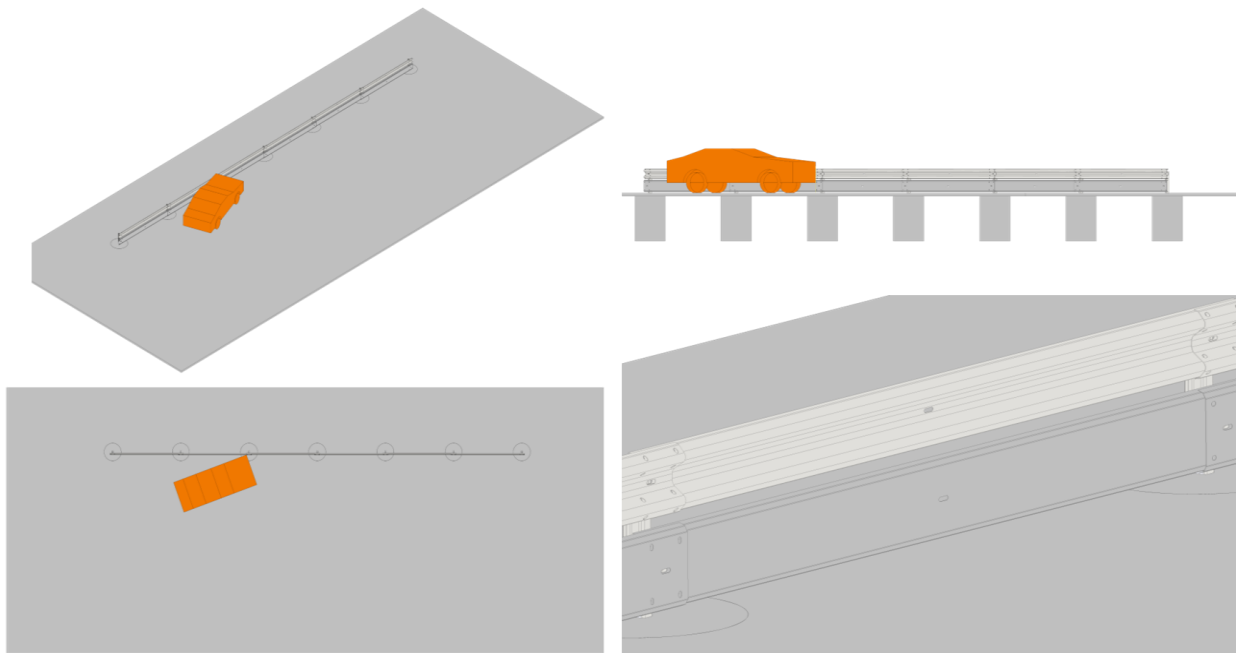


Figura 113 - Modelo geométrico global, com presença de volumes representativos do solo.

Em suma, após acrescentadas todas estas melhorias, dever-se-á confrontar os resultados obtidos por via numérica, com os resultados experimentais obtidos à escala real, de forma a permitir uma comparação e comprovação do modelo numérico desenvolvido. Poder-se-á ainda realizar, posteriormente, essa mesma comprovação com diferentes modelos de barreiras de segurança rodoviária e de veículos, de forma a assegurar a reprodutibilidade do modelo.

Por fim, relativamente à caracterização numérico-experimental de componentes e sub-conjuntos das barreiras, embora se tenha obtido um acordo aceitável entre os resultados, fundamentalmente no regime elástico e em parte do regime plástico, poder-se-á utilizar um modelo multilinear na sua modelação, ao invés de um modelo bilinear, no sentido de se obter uma resposta plástica, exatamente igual. Além disso, deverá ser dada a devida atenção às condições de fronteira utilizadas no ensaio experimental e representadas no modelo numérico, de forma a se obterem resultados mais realistas em relação a algumas das propriedades mecânicas do conjunto. De modo complementar, embora o ponto de aplicação da carga seja o coincidente com a posição da viga em “W”, este pode vir a ser testado numa outra posição, de forma a evitar/retardar a rotação desenvolvida pelos componentes do modelo geométrico N2W3.

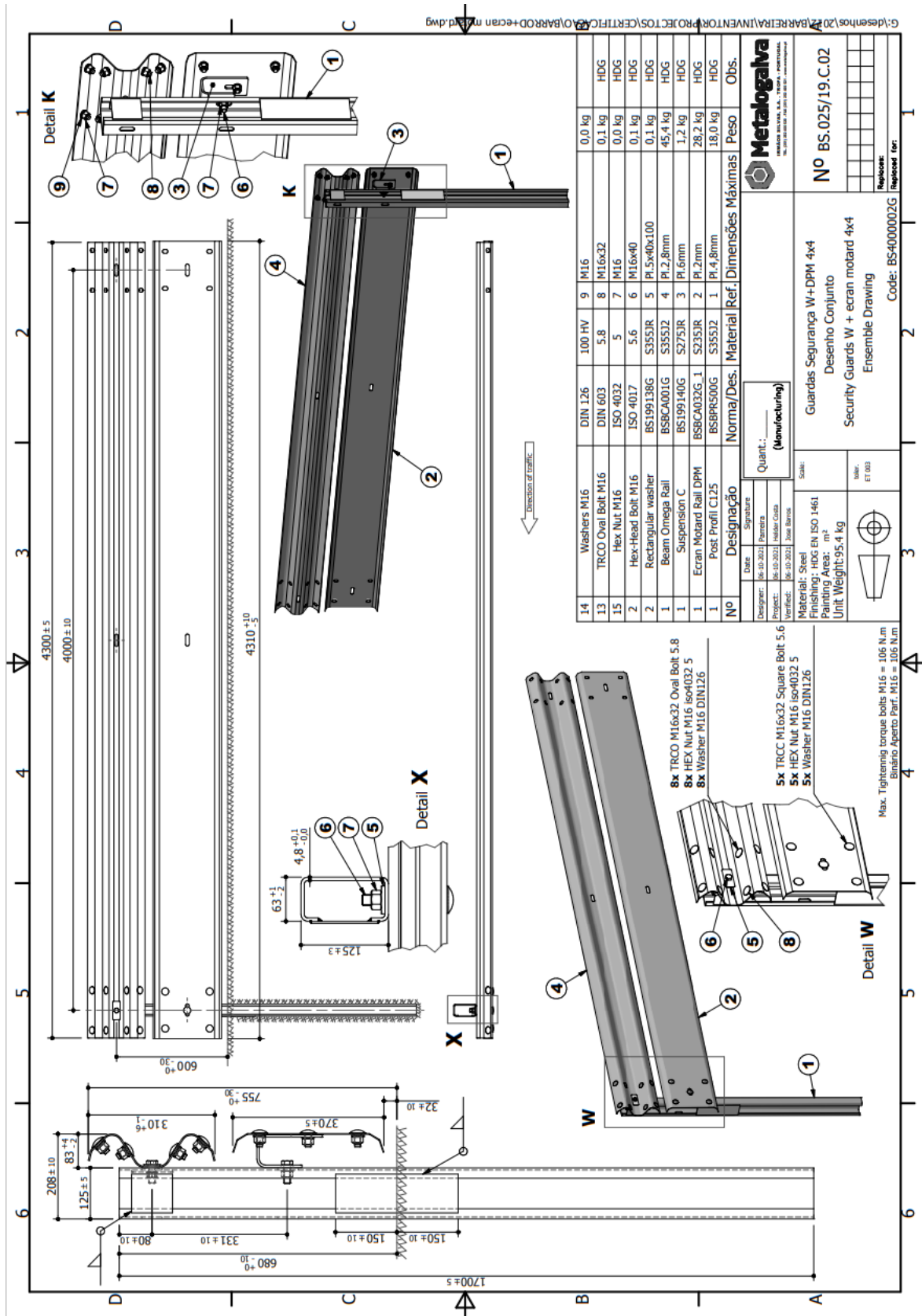
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS. (2012). ANSYS Mechanical User's Guide. *Release 15, ANSYS, Inc., 3304* (October), 724–746.
- ANSYS. (2020). *ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide. 15317* (January), 394.
- Armco Staco. (2011). *Defensas Metálicas*.
https://www.armcostaco.com.br/pt/produto/defensas_metalicas.html
- Atahan, A. O., & Erdem, M. M. (2016). Evaluation of 12 m long turned down guardrail end terminal using full-scale crash testing and simulation. *Latin American Journal of Solids and Structures, 13*(16), 2807–2825. <https://doi.org/10.1590/1679-78252874>
- Borovinšek, M., Vesenjajk, M., Ulbin, M., & Ren, Z. (2007). Simulation of crash tests for high containment levels of road safety barriers. *Engineering Failure Analysis, 14*(8 SPEC. ISS.), 1711–1718. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.11.068>
- Britannica. (2022). *Bulk Modulus*. <https://www.britannica.com/science/bulk-modulus>
- British Standards Institution. (2010a). *EN-1317-1-2010*. BSI Standards Publication.
- British Standards Institution. (2010b). *EN 1317-2-2010*. BSI Standards Publication.
- Carportal. (n.d.). *Left-hand-side flexible safety barriers*.
https://caportal.com.au/snippets_saferoads/snippet-features-lhsbarriers
- Coon, B. A., & Reid, J. D. (2006). Reconstruction techniques for energy-absorbing guardrail end terminals. *Accident Analysis and Prevention, 38*(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.06.016>
- de Castro Barbosa, D. G. (2022). *Estudo numérico do comportamento elasto-plástico de componentes de barreiras de segurança rodoviária*. Universidade do Minho.
- Endeavos Innovation Inc. (2018). *Bolted Connections in Ansys Workbench*.
<https://www.endeavos.com/bolted-connections-ansys-workbench-part-1/>
- F. M. Azevedo, Á. (2003). Método dos elementos finitos. In *Método dos Elementos Finitos* (1ª). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. <https://doi.org/10.5151/9788580391992-03>
- Gambirasio, L., & Rizzi, E. (2014). On the calibration strategies of the Johnson-Cook strength model: Discussion and applications to experimental data. *Materials Science and Engineering A, 610*, 370–413. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.05.006>
- Gambirasio, L., & Rizzi, E. (2016). An enhanced Johnson-Cook strength model for splitting strain rate and temperature effects on lower yield stress and plastic flow. *Computational Materials Science, 113*, 231–265. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.11.034>
- Heyman, J. (1997). *Coulomb's Memoir on Statics*. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.
- Indiamart. (n.d.). *W Shaped Road Safety W-beam Crash Barrier*.
<https://www.indiamart.com/proddetail/w-beam-crash-barrier-20647538773.html>

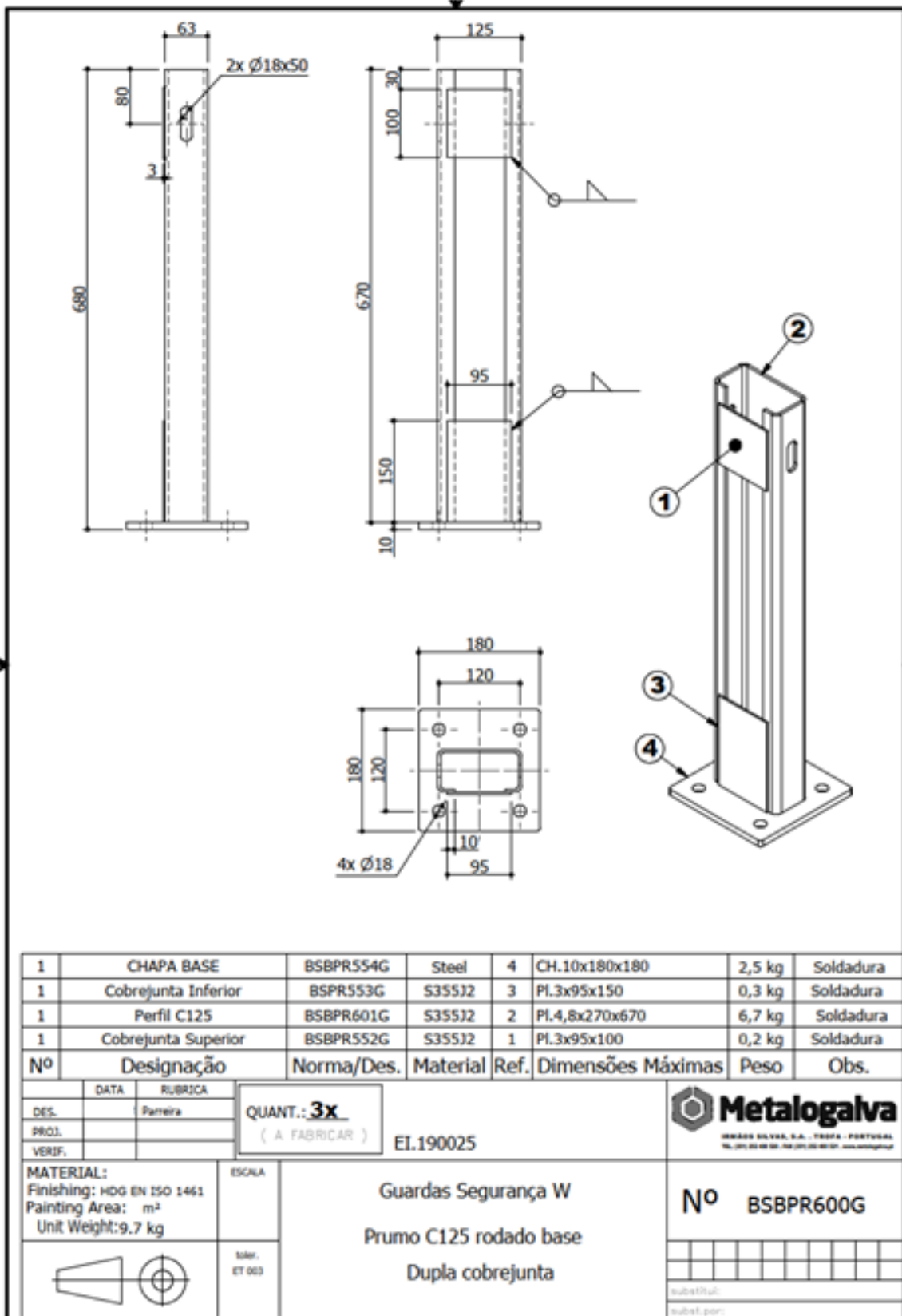
- Keding. (2022). *Road Safety Elastic Systems*. <https://www.keding.com.mk/road-safety-elastic-systems/>
- Klasztorny, M., Nycz, D. B., Dziewulski, P., Gieleta, R., Stankiewicz, M., & Zielonka, K. (2019). Numerical modelling of post-ground subsystem in road safety barrier crash tests. *Engineering Transactions*, 67(4), 513–534. <https://doi.org/10.24423/EngTrans.1036.20190802>
- Labuz, J. F., & Zang, A. (2012, July 3). Mohr–Coulomb Failure Criterion. *Rock Mech Rock Eng*.
- Leikkonen, R. (2019). *Crash Test Simulation and Optimization of Road Side Barrier*.
- Lindsay. (2022). *Crash Cushions*. <https://www.lindsay.com/usca/en/infrastructure/brands/barrier-systems/solutions/crash-cushions/>
- LNEC. (2010). *Sistemas de Retenção Rodoviários Manual de Aplicação* (Vol. 67).
- Martins Rodrigues, C. M. (2019). *Desempenho Solo-Prumo em Guardas de Segurança*. Universidade do Minho.
- Meio Corte. (n.d.). *Guardas de Segurança Rodoviárias*. <https://meiocorte.pt/guardas-seguranca/>
- Nycz, D., & Grodek, J. (2016). Effect of the B-Type Guiderail Joints of a Road Barrier on the Tb11 and Tb32 Virtual Crash Tests. *Archiwum Motoryzacji*, 71(1), 73–85. <https://doi.org/10.14669/AM.VOL71.ART4>
- Owen, D. R. J., & Hinton, E. (1980). *Finite Elements in Plasticity* (Pineridge Press Limited (ed.); first).
- Parente Lima, H. M. (2006). *Comportamento Funcional e Estrutural das Barreiras de Segurança*. Universidade do Porto.
- Paul, B. (1961). A Modification of the Coulomb-Mohr Theory of Fracture. *Journal of Applied Mechanics*, 28(2), 259–268. <https://doi.org/10.1115/1.3641665>
- Pietruszczak, S. (2010). *Fundamentals of Plasticity in Geomechanics* (CRC Press (ed.)).
- Proteste, D. (2021). *Os automóveis mais seguros em 2021 para o Euro NCAP*.
- Qian, G., Massenzio, M., & Ichchou, M. (2016). Development of a W-beam guardrail crashing model by considering the deformations of components. *ACM International Conference Proceeding Series*, 42–46. <https://doi.org/10.1145/3036932.3036939>
- Ramada Aços. (2017). *Aços de Construção ao Carbono*. https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-construa-ao-ao-carbono/st-52_.html
- Ren, Z., & Vesenjak, M. (2005). Computational and experimental crash analysis of the road safety barrier. *Engineering Failure Analysis*, 12(6 SPEC. ISS.), 963–973. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.12.033>
- Sassi, A. (2011). *Analysis of W-Beam Guardrail Systems Subjected to Lateral Impact* [University of Windsor]. <https://scholar.uwindsor.ca/etd/409>
- Shen, X., Guo, L., Yang, L., Du, X., & Cao, P. (2008). Numerical analysis of impact effect on mechanical behavior of strong guardrail system. *Journal of Physics: Conference Series*, 96(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/96/1/012036>

- Simulia. (n.d.). *Abaqus Release Notes*. <http://130.149.89.49:2080/v6.14/books/rnb/default.htm>
- SimuTech. (2022). *Bonded Contact Between Shell Faces in Mechanical Workbench*. <https://simutechgroup.com/bonded-contact-between-shell-faces/>
- Škrlec, A., & Klemenc, J. (2016). Estimating the strain-rate-dependent parameters of the Cowper-Symonds and Johnson-Cook material models using taguchi arrays. *Strojnikski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, *62*(4), 220–230. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2015.3266>
- Sousa Pereira, G. C. (2021). *Numerical Modelling Restraint System of a Road*. Universidade do Minho.
- Tata Steel. (2022). *Safety Barrier Products*. <https://www.tatasteelurope.com/construction/products/other/highway-engineering/vetex>
- Tecvisur. (2022). *Safety Barrier*. <http://www.tecvisur.com/en/road-safety-barrier>
- Urban Wins. (2020). *New Jersey Project*. <https://www.urbanwins.eu/new-jersey-project/>
- Vardoulakis, I., Labuz, J. F., Papamichos, E., & Tronvoll, J. (1998). Continuum fracture mechanics of uniaxial compression on brittle materials. *International Journal of Solids and Structures*, *35*(31–32), 4313–4335. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(97\)00318-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(97)00318-1)
- Verleysen, P., Peirs, J., Van Slycken, J., Faes, K., & Duchene, L. (2011). Effect of strain rate on the forming behaviour of sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, *211*(8), 1457–1464. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.03.018>
- Wilde, K., Bruski, D., Budzyński, M., Burzyński, S., Chróścielewski, J., Jamroz, K., Pachocki, Ł., & Witkowski, W. (2020). Numerical Analysis of TB32 Crash Tests for 4-cable Guardrail Barrier System Installed on the Horizontal Convex Curves of Road. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, *21*(1), 65–81. <https://doi.org/10.1515/ijnsns-2018-0169>
- Yun, X., & Gardner, L. (2017). Stress-strain curves for hot-rolled steels. *Journal of Constructional Steel Research*, *133*(September), 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.01.024>

ANEXO 1 – DESENHO TÉCNICO DA BARREIRA DE SEGURANÇA N2W3



ANEXO 2 – PRUMO: MODELO N2W3



ANEXO 3 – PRUMO: MODELO N2W2

