



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Luis Miguel Ribeiro Félix

Projecto de componentes estruturais
recorrendo a soluções avançadas em
aços de alta resistência



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Luís Miguel Ribeiro Félix

Projecto de componentes estruturais
recorrendo a soluções avançadas em
aços de alta resistência

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efectuado sob a orientação de
Professor Nuno Ricardo Maia Peixinho
Professor João Pedro Mendonça Assunção Silva

DECLARAÇÃO

Nome: Luís Miguel Ribeiro Félix

Endereço eletrónico: a62072@alunos.uminho.pt Telefone: 913479965

Cartão do Cidadão: 14091790

Título da dissertação: Projecto de componentes estruturais recorrendo a soluções avançadas em aços de alta resistência

Orientador/a/es:

Professor Nuno Ricardo Maia Peixinho

Professor João Pedro Mendonça Assunção Silva

Ano de conclusão: 2015

Mestrado em Engenharia Mecânica

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura

AGRADECIMENTOS

Todo o percurso ao longo deste curso que termina com a realização deste trabalho foi possível com o apoio de algumas pessoas que tiveram a sua importância, cada um à sua maneira e no momento certo.

Em primeiro, agradecer ao professor Nuno Peixinho por toda a ajuda prestada ao longo deste trabalho, tendo sido sempre prestável na ajuda e no delinear das etapas deste trabalho, assim como pelos conhecimentos transmitidos por ele.

Aos técnicos Araújo e Miguel dos Laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica pelos auxílios prestados na realização dos ensaios.

Agradecer aos excelentes colegas de curso que encontrei e conheci no decorrer destes 5 anos de curso.

Aos meus colegas de longa data que sempre foram acompanhando este meu percurso.

E por fim o mais importante, agradecer do fundo do coração à minha Mãe, minha Irmã, minha Avó e meu Tio por estarem sempre presentes não só durante este percurso mas durante toda a minha vida, pois sem eles nada disto teria sido possível.

RESUMO

A evolução de estruturas e componentes estruturais é um processo sequencial. O aparecimento de novos materiais, novos métodos de fabrico e o aparecimento de soluções para melhorar o funcionamento de componentes face ao que são sujeitos permite essa mesma evolução.

A indústria do calçado é uma das principais indústrias em Portugal, e por isso o seu crescimento faz com que a evolução nesse ramo seja imperativa.

Este trabalho tem como objectivo a utilização de novos aços, neste caso aços de alta resistência, num componente de calçado, o enfuste. Deste modo, foram substituídos os aços normalmente utilizados neste componente que são sujeitos a tratamentos térmicos de forma a melhorar a sua resistência.

Assim, foi feita uma análise de mercado em termos de geometrias existentes neste tipo de componentes. Para além disso, foram realizados ensaios experimentais de modo a identificar o seu comportamento quando sujeitos a alguns esforços. Através de simulação numérica no software SolidWorks com análises não lineares no domínio plástico, foi possível estudar a resistência do componente com diferentes materiais e geometrias. Os resultados obtidos foram validados experimentalmente, o que permitiu estender o estudo numérico para geometrias alternativas e, assim, obter uma solução para que aços de alta resistência consigam ser utilizados neste componente.

Palavras-Chave: Enfuste, tratamento térmico, aços de alta resistência, simulação numérica.

ABSTRACT

The evolution of structures and structural components is a sequential process. The introduction of new materials, new manufacturing methods and the appearance of solutions to improve the components' behavior allow this evolution.

The footwear industry is one of the main industries in Portugal, therefore its development is imperative.

This work is directed at the use of new steels, in this case high strength steels, in a footwear component, the shoe shank. Hence, the currently utilized steels, which usually include heat treatment to improve their resistance, were replaced.

Thus, a market analysis was conducted in terms of existing geometries for this component. Beyond that, experimental tests were performed in order to identify its behavior when subjected to loads. Through numerical simulation in software SolidWorks with nonlinear analysis in the plastic domain, it was possible to study the resistance of the component with different materials and geometries. The obtained results were experimentally validated, which allowed to extend the numerical study to alternative geometries and, therefore, to achieve a solution for high strength steels being able to be used in this component.

Key-words: shoe shank, heat treatment, numerical simulation, high strength steels.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas.....	xv
Nomenclatura	xvii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	xix
1. Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objectivos.....	3
1.3 Estruturas da tese	3
2. Revisão bibliográfica	5
2.1 Indústria do calçado.....	5
2.2 Enfuste e a sua evolução.....	8
2.3 Materiais utilizados.....	12
2.4 Estudo sobre o efeito da curva do enfuste	14
3. Estudo de modelos existentes	19
3.1 Modelos existentes	19
3.2 Caracterização dos modelos existentes.....	20
3.2.1 Enfuste 1.....	20
3.2.2 Enfuste 2.....	21
3.2.3 Enfuste 3.....	22
3.2.4 Enfuste 4.....	23
3.2.5 Enfuste 5.....	24
3.3 Dureza.....	25
3.3.1 Ensaios de dureza dos enfustes em estudo.....	26
3.4 Análise de composição química	28
3.5 Ensaio para análise de microestrutura	29
3.6 Ensaios de flexão	33
3.6.1 Normalização de enfustes.....	33

3.6.2	Realização dos ensaios de flexão	35
4.	Desenvolvimento de um novo modelo	47
4.1	Objectivo principal	47
4.1.1	Os aços de alta resistência.....	47
4.2	Geometria e dimensões gerais do novo modelo	49
4.2.1	Modelo numérico do novo enfuste.....	50
4.3	Simulação numérica	51
4.3.1	Condições de fronteira	52
4.3.2	Efeito da variação da espessura do enfuste	54
4.3.3	Efeito da variação da largura do enfuste	58
4.3.4	Efeito da existência de nervura	60
4.4	Validação Experimental	62
4.4.1	Produção de protótipos de enfustes.....	62
4.4.2	Modelo numérico e simulação de enfustes produzidos.....	63
4.4.3	Ensaio experimentais	65
4.4.4	Determinação de espessura mínima necessária.....	70
4.4.5	Apresentação de enfuste modelo.....	72
5.	Considerações finais	75
5.1	Conclusões.....	75
5.2	Trabalho futuro	76
	Bibliografia.....	77
	Anexo I – Desenhos Técnicos de protótipos de enfuste.....	79
	Anexo II – Cálculos auxiliares	83
	Anexo III – Desenho técnico de enfuste modelo	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Evolução da produção e do emprego na indústria do calçado em Portugal [APICCAPS, 2014].....	1
Figura 1.2 - Aplicação do enfuste	2
Figura 1.3 - Empresa em colaboração	2
Figura 2.1 – Peso do emprego da indústria do calçado no total da indústria transformadora [APICCAPS, 2014].....	5
Figura 2.2 - Evolução do emprego em empresas de componentes para calçado [APICCAPS, 2014]	6
Figura 2.3 - Mercados de exportação de componentes para calçado [APICCAPS, 2014]	7
Figura 2.4 - Origem das importações de componentes para calçado [APICCAPS, 2014]	7
Figura 2.5 - Localização do enfuste no calçado	8
Figura 2.6 - Patente de Edson Hadley e Thomas Joyce [Hadley, Thomas, 1880]	9
Figura 2.7 - Patente de Frank Melchionna [Melchionna, 1942]	10
Figura 2.8 - Patente de Michael Toschi [Toschi, 1998]	11
Figura 2.9 – Geometria de enfustes mais utilizados hoje em dia	12
Figura 2.10 - Enfuste em fibra de vidro	13
Figura 2.11 – a) Medidas do sapato em estudo; b) profundidades dos arcos em estudo [CONG, Y., LEE, W., ZHANG, M., 2010].....	15
Figura 2.12 - Variação do integral pressão-tempo [CONG, Y., LEE, W., ZHANG, M., 2010]	16
Figura 2.13 – Pico da área de contacto nas regiões do pé [CONG, Y., LEE, W., ZHANG, M., 2010]	16
Figura 2.14 - Pico de pressão nas regiões do pé [CONG, Y., LEE, W., ZHANG, M., 2010]	17
Figura 3.1 – Variedade de enfustes no mercado	19
Figura 3.2 - Enfuste 1	20
Figura 3.3 - Dimensões gerais do enfuste 1	21
Figura 3.4 - Enfuste 2	21
Figura 3.5 - Dimensões gerais do enfuste 2	22
Figura 3.6 - Enfuste 3	22
Figura 3.7 - Dimensões gerais do enfuste 3	23
Figura 3.8 – Enfuste 4	23
Figura 3.9 - Enfuste 5	24
Figura 3.10 - Tipos de ensaios de dureza	26
Figura 3.11 - Ensaio de dureza Rockwell C	27

Figura 3.12 – Suporte das amostras	30
Figura 3.13 – Recipiente com amostra em resina	30
Figura 3.14 - Amostra em resina.....	31
Figura 3.15 – Resultados das amostras (à esquerda enfuste 1, ao centro enfuste 2, à direita enfuste 3).....	32
Figura 3.16 - Curvas tensão-deformação	36
Figura 3.17 - Máquina utilizada para ensaios de flexão.....	37
Figura 3.18 - Ilustração do ensaio experimental	37
Figura 3.19 – Montagem do ensaio de flexão	38
Figura 3.20 – Gráfico carga vs deslocamento do ensaio 1 do enfuste 1	39
Figura 3.21 – Rigidez do enfuste ao ensaio	39
Figura 3.22 - Gráfico carga vs deslocamento do ensaio 2 do enfuste 1	40
Figura 3.23 - Gráfico carga vs deslocamento para ambos os ensaios	40
Figura 3.24 - Gráfico carga vs deslocamento do ensaio 1 do enfuste 2.....	41
Figura 3.25 - Gráfico carga vs deslocamento do ensaio 2 do enfuste 2.....	42
Figura 3.26 - Gráfico Carga vs Deslocamento do ensaio 1 do enfuste 3	43
Figura 3.27 - Gráfico Carga vs Deslocamento do ensaio 2 do enfuste 3	44
Figura 3.28 - Gráfico Carga vs Deslocamento do ensaio 2 do enfuste 3	44
Figura 4.1 - Propriedades dos aços de alta resistência [COSTA, 2009]	48
Figura 4.2 - Microestrutura típica dos aços DP [Costa, 2009].....	48
Figura 4.3 – Dimensões de novo modelo em estudo.....	50
Figura 4.4 - Modelo do enfuste 1 à esquerda e do enfuste com nova nervura à direita.....	50
Figura 4.5 - Curva tensão-deformação real do aço DP800	51
Figura 4.6 - Curva tensão-deformação real do aço DP1000	52
Figura 4.7 - Restrição no componente nas simulações.....	52
Figura 4.8 - Aplicação pontual da força no enfuste	53
Figura 4.9 - Propriedades das análises não lineares	54
Figura 4.10 – Carga necessária para deslocar espessura de 1,3 mm com aço DP800	55
Figura 4.11 - Carga necessária para deslocar espessura de 1,3 mm com aço DP1000.....	55
Figura 4.12 - Carga necessária para deslocar espessura de 1 mm com aço DP800.....	56
Figura 4.13 - Carga necessária para deslocar espessura de 1 mm com aço DP1000.....	56
Figura 4.14 - Carga necessária para deslocar espessura de 1,5 mm com aço DP800.....	57
Figura 4.15 - Carga necessária para deslocar espessura de 1,5 mm com aço DP1000.....	57
Figura 4.16 - Carga necessária para deslocar espessura de 1 mm com 20,38 mm de largura com aço DP800	58

Figura 4.17 - Carga necessária para deslocar espessura de 1 mm com 20,38 mm de largura com aço DP1000	59
Figura 4.18 - Carga necessária para deslocar espessura de 1 mm com 15,38 mm de largura com aço DP800	59
Figura 4.19 - Carga necessária para deslocar espessura de 1 mm com 15,38 mm de largura com aço DP1000	60
Figura 4.20 - Carga necessária para deslocar espessura de 1,5 mm sem nervura com aço DP800.....	60
Figura 4.21 - Carga necessária para deslocar espessura de 1,5 mm sem nervura com aço DP1000.....	61
Figura 4.22 - Prensa utilizada para aplicação da nervura.....	62
Figura 4.23 - Enfuste produzido na empresa.....	63
Figura 4.24 - Carga necessária para deslocar enfuste produzido na empresa com 20mm com aço DP800	63
Figura 4.25 - Carga necessária para deslocar enfuste produzido na empresa com 20mm com aço DP1000	64
Figura 4.26 - Carga necessária para deslocar enfuste produzido na empresa com 18mm com aço DP800	64
Figura 4.27 - Carga necessária para deslocar enfuste produzido na empresa com 18mm com aço DP1000	65
Figura 4.28 - Ensaio prático de novo modelo	65
Figura 4.29 – Ensaio 1 de enfuste com 20 mm de largura	66
Figura 4.30 - Ensaio 2 de enfuste com 20 mm.....	67
Figura 4.31 - Ensaio 3 de enfuste com 20 mm.....	67
Figura 4.32 - Ensaio 1 de enfuste com 18 mm.....	68
Figura 4.33 – Ensaio 2 de enfuste com 18 mm	68
Figura 4.34 - Ensaio 3 de enfuste com 18 mm.....	69
Figura 4.35 – Comparação dos ensaios experimentais	70
Figura 4.36 – Dimensões gerais de enfuste modelo.....	73
Figura 4.37 – Enfuste modelo	73
Figura 4.38 - Carga necessária a aplicar no enfuste modelo para um deslocamento de 30mm com aço DP800	73
Figura 4.39 - Carga necessária a aplicar no enfuste modelo para um deslocamento de 30mm com aço DP1000	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Empresas e emprego relativo ao fabrico de componentes para calçado [APICCAPS, 2014].....	6
Tabela 3.1 - Quadro das dimensões gerais dos enfustes	25
Tabela 3.2 – Resultados dos ensaios de dureza.....	27
Tabela 3.3 – Valores tipos de dureza HRC para aços com tratamento térmico [Guedes, 2013]	28
Tabela 3.4 – Resultados das análises de composição química.....	29
Tabela 3.5 – Resumo dos ensaios experimentais	45
Tabela 4.1 - Resultados obtidos para espessuras diferentes.....	58
Tabela 4.2 - Resumo de resultados numéricos	61

NOMENCLATURA

	Definição	Unidade
<i>a</i>	Deflexão	mm
<i>b</i>	Largura do enfuste	mm
<i>h</i>	Espessura do enfuste	mm
<i>I</i>	Momento de inércia	mm ⁴
<i>k</i>	Módulo da tangente	MPa
<i>F</i>	Força	N
<i>l</i>	Largura	mm
<i>M_f</i>	Momento flector	N.mm
<i>n</i>	Coefficiente de encruamento	-
<i>PA</i>	Pico de área de contacto	mm ²
<i>PP</i>	Pico de pressão	kPa
<i>PTI</i>	Integral pressão tempo	kPa.s
σ	Tensão nominal	Pa
$\bar{\sigma}$	Tensão verdadeira	Pa
σ_y	Tensão de cedência	Pa
ϵ	Deformação nominal	-
$\bar{\epsilon}$	Deformação verdadeira	-
ϵ_y	Extensão na cedência	-

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

APICCAPS - Associação Portuguesa dos Industriais de Calçado, Componentes, Artigos de Pele e seus Sucedâneos

CAE – Computer Aided Engineering

CAM – Computer Aided Manufacturing

CTCP – Centro Tecnológico de Calçado de Portugal

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DP – Dual Phase

ISO – International Organization for Standardization

PA – Pico de área de contacto

PP – Pico de pressão

PTI – Integral pressão-tempo

ULSAB-AVC – Ultra Light Steel Auto Body

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A engenharia tem permitido uma grande evolução a todos níveis na vida dos seres humanos. Com o aparecimento de novos conhecimentos tem havido uma constante actualização em termos de ferramentas, máquinas, estruturas, mecanismos, e basicamente tudo que envolva a engenharia em si.

A evolução constante tem por base o aparecimento de novos métodos de fabrico, novas ferramentas informáticas que permitem um melhor estudo da estrutura/equipamento assim como novos materiais que permitem essa mesma estrutura manter as suas especificações necessárias, ou quem sabe melhora-las com reduções de custo de fabrico, assim como alterar as suas dimensões com intuito de uma redução de peso.

Uma das áreas que sofreu um desenvolvimento significativo foi a área do calçado, onde foram surgindo, nos últimos anos, novas ferramentas e novas máquinas que permitem aos funcionários, assim como aos coordenadores, uma maior produção num mesmo espaço de tempo.

A evolução na indústria do calçado tem tido uma grande importância na economia portuguesa. Nos últimos 40 anos, o número de empresas destinadas à indústria do calçado em Portugal duplicou, havendo 1337 empresas registadas em 2013. Em termos de produção, estas empresas apresentaram valores brutos de produção de 1 848 010 milhares de euros, em 2013, tendo havido uma exportação de 74 301 milhares de pares.



Figura 1.1 - Evolução da produção e do emprego na indústria do calçado em Portugal [APICCAPS, 2014]

Com o calçado, surgem os componentes utilizados na sua produção, e aí surge o enfuste, também conhecido como alma do sapato.



Figura 1.2 - Aplicação do enfuste

O enfuste é, na maioria das suas aplicações, uma peça metálica colocada entre a palmilha e a sola dos sapatos. A sua implementação no calçado faz parte da decisão dos produtores, pois não é uma peça obrigatória no calçado normal.

Tem como funções sustentar o pé, estruturar, dar estabilidade no andar e acompanhar a curvatura do pé.

Como complemento, houve a colaboração de uma empresa do ramo metalomecânico neste projecto. A empresa envolvida é conhecida como António Abreu Metalomecânica. Esta empresa foi fundada em 1999, está sediada em Famalicão. Actualmente a empresa contém a produção para diversas indústrias como a indústria automóvel, a indústria do calçado e ferramenta, tendo grande flexibilidade ao nível produtivo. Esta produção industrial é maioritariamente destinada ao estrangeiro, sendo o mercado alemão o principal.



Figura 1.3 - Empresa em colaboração

Objectivamente, a empresa foi útil no fornecimento de material, assim como na produção de protótipos que foram produzidos com o intuito de serem sujeitos a análises experimentais.

1.2 Objectivos

Nesta dissertação o objetivo principal passa por projectar um componente estrutural com o recurso a materiais de alta resistência mecânica, sendo o enfuste o componente em estudo ao longo desta dissertação.

Assim, é necessário estudar os enfustes que são feitos actualmente, perceber a sua geometria, os seus materiais neles envolvidos e analisar os seus métodos de fabrico.

O recurso a materiais de alta resistência mecânica tem como objectivo a eliminação de tratamentos térmicos a que os materiais dos enfustes actuais estão sujeitos para aumentar a resistência desses materiais.

As ferramentas de CAD, neste caso o Solidworks®, irão permitir o desenho e simulações numéricas dos enfustes existentes, simulações estas que posteriormente serão sujeitas a ensaios experimentais.

1.3 Estruturas da tese

A estrutura da tese está elaborada em 5 capítulos principais.

Neste primeiro capítulo foi feita uma abordagem sintética ao tema do trabalho, anunciando o principal objectivo do mesmo.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica acerca do enfuste, tendo em conta principalmente patentes existentes.

No terceiro capítulo é apresentado o estudo dos enfustes que serviram como ponto de partida para o tema deste trabalho sendo apresentados dados relativos às suas geometrias e propriedades dos materiais envolvidos, com recurso a ensaios experimentais.

O quarto capítulo é composto pela modelação de protótipos, consoante algumas restrições, como a medida da nova nervura, assim como simulações numéricas, incluindo o domínio plástico, e também ensaios experimentais e os seus resultados.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões ao longo do trabalho assim como projecções/desenvolvimentos que podem ser tidas em consideração em trabalho futuro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Indústria do calçado

A indústria do calçado é uma das principais indústrias em Portugal. O desenvolvimento nessa área tem permitido às empresas em Portugal manter, pelo menos, a produção e a exportação de calçado, mesmo com a economia nacional em dificuldades.

Em 2014, foi lançada pela APICCAPS, Associação Portuguesa dos Industriais de Calçado, Componentes, Artigos de Pele e seus Sucedâneos, uma monografia estatística que contém um conjunto relevante de dados que caracteriza a indústria portuguesa de calçado, sendo estes dados relativos a 2013. Esta estatística inclui dados relativos a componentes de calçado, onde se inclui o enfuste.

Em 2013, existiam em 1 337 empresas em Portugal na indústria do calçado. Como já foi referido, houve um grande aumento de empresas existentes dedicadas à indústria do calçado nas últimas décadas. Este número de empresas abrange, por sua vez, uma grande quantidade de postos de trabalho, e permite grandes volumes de produção que leva a grandes volumes de exportações, tendo em 2013 apresentado valores de 74 301 milhares de pares exportados para todo o mundo. A Europa foi o continente que obteve a maior percentagem de exportação, com 92,6%, sendo a França o destino que a maioria do calçado toma.

O crescimento do mercado asiático tem tido um impacto mundial na indústria do calçado. Isto trouxe deslocalizações de certas unidades de produção existentes em Portugal que tiveram com destino a Ásia, prejudicando a indústria portuguesa. Contudo, Portugal apostou forte na moda e no design e conseguiu manter-se sempre no topo mundial, sendo neste momento o segundo país com maior preço médio de exportação. Isto permitiu à indústria do calçado manter um elevado peso no total de emprego da indústria transformadora, aumentando de 4,6% para 5,4% em 2012.

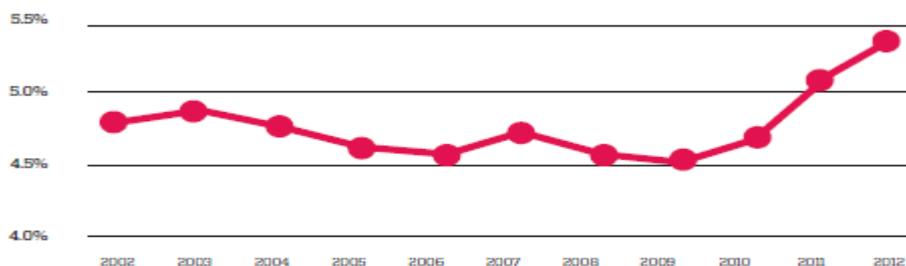


Figura 2.1 – Peso do emprego da indústria do calçado no total da indústria transformadora [APICCAPS, 2014]

No que diz respeito a componentes para calçado, onde se insere o enfuste, o número de empresas existentes apenas para o fabrico de componentes de calçado não tem sofrido grandes alterações ao longo dos últimos 15 anos. No ano de 2013, a estimativa era de 258 empresas com o objectivo de produção de componentes, sendo que em 1999 haviam 263 empresas, como é possível verificar na Tabela 2.1.

O número apresentado ao longo destes anos não reflecte o número de empresas em Portugal que fabrica enfustes porque grande parte das empresas apenas se dedica ao fabrico de outros componentes.

Tabela 2.1 - Empresas e emprego relativo ao fabrico de componentes para calçado [APICCAPS, 2014]

	1994	1999	2004	2006	2008	2009	2010	2011	2012	2013**
Industry Indústria										
Companies Empresas										
number número		263	303	297	267	259	240	252	258	258
Employment Emprego										
number número		5 569	5 431	4 707	4 090	3 901	3 848	4 282	4 262	4 263
Foreign Trade Comércio Externo										
Exports Exportações										
thousand Euros milhares de Euros	121 697	99 212	72 822	51 369	49 144	48 044	45 632	45 420	43 798	44 454
Imports Importações										
thousand Euros milhares de Euros	98 692	143 278	118 968	95 770	97 988	80 323	89 931	108 860	125 291	132 183
Trade Balance Balança Comercial										
thousand Euros milhares de Euros	23 005	-44 066	-46 146	-44 400	-48 844	-32 279	-44 299	-63 440	-81 493	-87 728

Também na tabela anterior é possível verificar que existe um maior gasto em termos de importações quando comparado com os ganhos das exportações, obtendo-se um balanço comercial negativo no valor de 87 828 milhares de euros.

Na figura 2.2 é apresentado um gráfico que apresenta a evolução do emprego em termos de empresas de componentes para calçado.

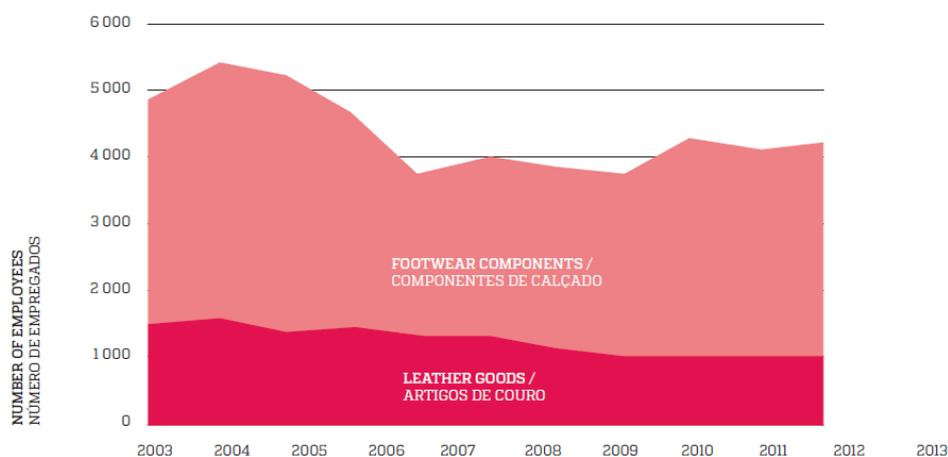


Figura 2.2 - Evolução do emprego em empresas de componentes para calçado [APICCAPS, 2014]

De acordo com este estudo, Felgueiras é o concelho com maior número de trabalhadores na área do calçado com 12 325 trabalhadores. Em termos de componentes para calçado, existiam 1233 trabalhadores nesta área no concelho de Felgueiras.

Em termos de exportação de componentes para calçado, a Alemanha é o principal mercado de Portugal em termos de exportação. Quanto a importação, também a Alemanha é a principal origem de importações de componentes para calçado. As figuras 2.3 e 2.4, apresentam, respectivamente, os principais países que recebem componentes para calçado oriundos de Portugal e os países que mais componentes fabricam para Portugal.

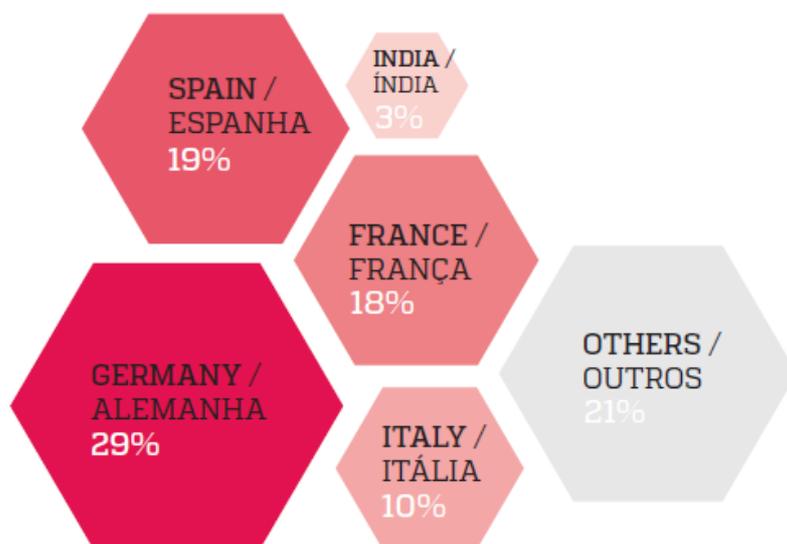


Figura 2.3 - Mercados de exportação de componentes para calçado [APICCAPS, 2014]



Figura 2.4 - Origem das importações de componentes para calçado [APICCAPS, 2014]

2.2 Enfuste e a sua evolução

Com a evolução da indústria do calçado, surgiu um componente que hoje em dia se dá o nome de enfuste, também conhecido como alma do sapato. A sua função é acompanhar a curvatura do pé, estruturar, dar estabilidade no andar e sustentar o pé. A sua colocação é normalmente entre a sola e a palmilha do calçado, como ilustra a figura 2.5. Este componente é utilizado nas mais diversas categorias de calçado, como calçado para homem, senhora, principalmente em calçado com tacão, calçado para desporto, entre outros.

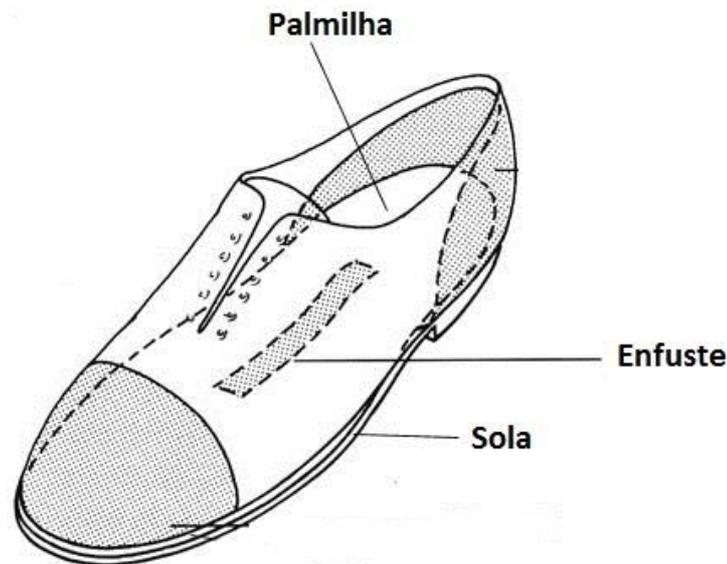


Figura 2.5 - Localização do enfuste no calçado

A implementação do enfuste pode também proteger o pé de lesões, conseguindo bloquear a entrada de certos objectos pela sola do sapato, aquando do contacto com pavimentos inconstantes ou acidentados. O seu peso, apesar de a maioria das marcas utilizar enfustes em aço, não surge como um problema para os utilizadores porque se trata de um componente de pequenas dimensões.

Contudo, os primeiros enfustes que foram aparecendo não tinham estas dimensões, sendo um pouco maiores, evoluindo de década em década até aos dias de hoje.

Um formato bastante diferente dos actualmente utilizados, fez com que surgisse nos Estados Unidos, uma patente lançada por Edson Hadley e Thomas Joyce (1880). Esta patente tinha como objectivo apresentar um suporte de enfuste que não levasse a que a bota ou sapato acabasse por rasgar na zona da aplicação do enfuste. Esta invenção consistia na aplicação de uma placa, de metal ou outro material rígido, na sola da bota ou sapato na zona do peito do pé.

E. P. HADLEY & T. JOYCE.
Shank Support and Protector for Boots and Shoes.
No. 234,030. Patented Nov. 2, 1880.

Fig. 1

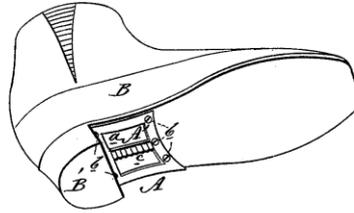


Fig. 2

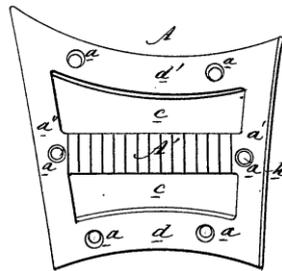


Fig. 3

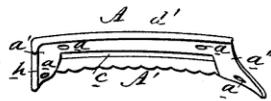


Figura 2.6 - Patente de Edson Hadley e Thomas Joyce [Hadley, Thomas, 1880]

Esta placa tinha como objectivo ser afixada na parte exterior do sapato, podendo ser afixados antes ou depois dos sapatos estarem feitos sendo fixada através de pregos ou parafusos.

A placa era cortada na zona c, diminuindo o material utilizado e deixando a peça um pouco mais leve.

Os autores recomendavam na altura o uso de um ferro maleável para esta aplicação.

Através de Frank Melchionna (1942), surgiu uma patente que tinha como objectivo melhorar enfustes na altura existentes. Segundo o autor, a intenção era melhorar as características dos enfustes uma vez que os existentes da altura eram conhecidos por serem bastantes frágeis. Outro objectivo do autor passava por criar formas nos enfustes que permitissem a fixação do enfuste na palmilha de forma a que o enfuste não fosse deslocado quando se desse a montagem do sapato.

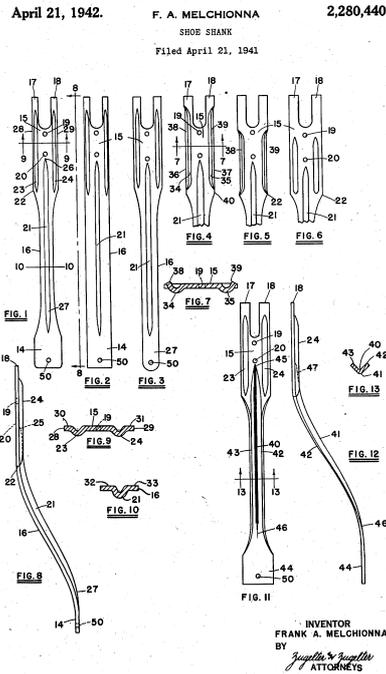


Figura 2.7 - Patente de Frank Melchionna [Melchionna, 1942]

Como é possível verificar na figura 2.7, o enfuste tinha uma dimensão que percorria grande parte do comprimento do sapato, mas com uma largura já bastante curta.

De acordo com o autor, tinha também como objectivo produzir um enfuste de metal onde fosse possível reduzir custos de produção com o facto de conseguir obter a geometria final com poucas operações de produção.

Na figura 2.7 é possível também verificar a existência de uma nervura principal no meio do enfuste com o intuito de reforçar a resistência da peça, assim como duas pequenas nervuras apresentadas na parte dianteira do enfuste. Estes enfustes eram concebidos para serem produzidos em metal, preferencialmente em aços macios. O formato do enfuste já se aproximava bastante dos enfustes criados nos dias de hoje apesar do comprimento ser agora mais reduzido.

Também nos Estados Unidos, surgiu uma patente lançada por Michael Toschi (1998), onde desta vez era patenteado um enfuste produzido preferencialmente através de materiais compósitos garantindo uma estabilidade torsional controlada.

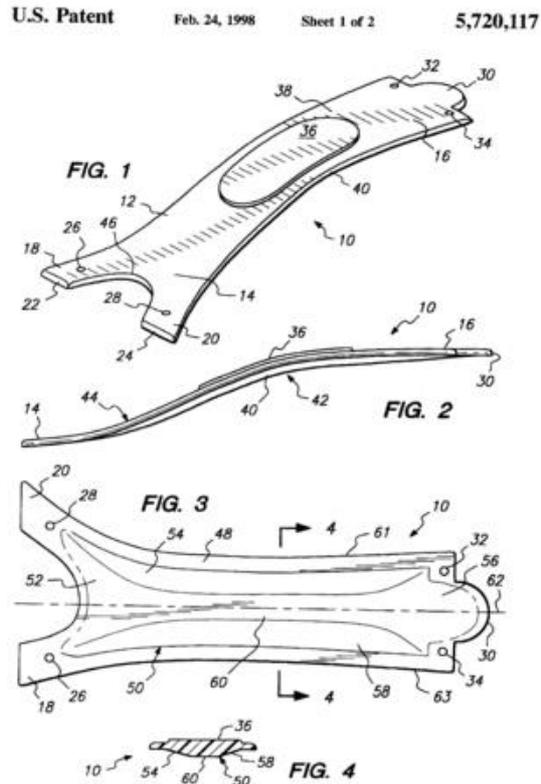


Figura 2.8 - Patente de Michael Toschi [Toschi, 1998]

Nesta patente, o autor reclamava como principais ideias:

- Um enfuste alongado, com uma área intermédia arqueada;
- Enfuste fabricado por materiais inoxidáveis, preferencialmente compósitos de fibra de carbono, com alta resistência, podendo também serem fabricados em plásticos equivalentes, polímeros ou metais;
- A abertura de duas pontas na extremidade.

Através da figura 2.8 é possível verificar uma saliência na zona central do enfuste que funciona como um encaixe na palmilha que era colocada por cima do enfuste.

Actualmente, os enfustes utilizados apresentam dimensões menores que estes anteriormente apresentados mas a geometria da peça baseia-se no mesmo. Na figura 2.9 são apresentados alguns dos modelos mais utilizados actualmente, existentes no mercado.



Figura 2.9 – Geometria de enfustes mais utilizados hoje em dia

Estes enfustes, apresentam uma ligeira curvatura, para fazer o acompanhamento da curva do pé do utilizador. A maioria destes apresentam também uma nervura na zona central em praticamente todo o seu comprimento com o intuito de dar mais estabilidade e rigidez ao componente. Em cada uma das extremidades das peças são apresentados dois furos para a fixação do enfuste no sapato.

2.3 Materiais utilizados

A maioria dos enfustes produzidos mundialmente são feitos em aço, porque como já dito anteriormente o enfuste é uma peça bastante pequena em relação com o sapato, e então o peso na maioria das situações não é o mais importante. Produtores de sapatos como a Alden, Yuketen, Meermin, LL Bean apenas usam enfustes de aço nos seus sapatos. Em termos de produção de enfustes em aço em Portugal, existem por exemplo as empresas MACAP II e SOENFUSTE.

O aço é uma liga metálica constituída principalmente por ferro e carbono, e é dos materiais mais utilizados mundialmente devido à sua resistência, tenacidade e ductilidade, isto tudo combinado com um preço baixo relativamente a outros materiais com semelhantes propriedades. A variação de carbono no aço torna-o capaz de garantir uma grande diversidade

de aplicações práticas, apresentando um comportamento dúctil com regimes de deformação plástico e elástico (Van Vlack, 1970). A percentagem de carbono no aço ajuda na classificação dos aços existentes. Se a percentagem de carbono estiver entre os 0,008% até 2,11% de carbono então o aço é considerado aço-carbono. Dentro do aço-carbono, existem três divisões: aço de baixo teor de carbono, com a percentagem de carbono abaixo dos 0,3%, aço de medio teor de carbono, com a percentagem de carbono a situar-se entre os 0,3 e os 0,7%, e os aços de alto teor de carbono com percentagem de carbono acima dos 0,7%. Os aços de medio teor de carbono são aços que temperados e revenidos atingem uma boa tenacidade e resistência (Smith, 1998).

Contudo outros materiais são utilizados na produção de enfustes. Através do site das empresas, é possível verificar que produtores como a Wolverine e a Timberland utilizam enfustes de compósitos de fibra de vidro em alguns dos seus produtos, podendo oferecer a mesma estabilidade mas sendo menos pesados. A fibra de vidro apresenta uma boa razão resistência/peso, boa resistência à corrosão, uma boa estabilidade dimensional assim como alguma facilidade de fabrico.

Este material tem como características o facto de ser leve, não conduzir corrente eléctrica e apresentar boa resistência à tracção, flexão e impacto (Smith, 1998).

Através de Robert Bradley, Donald Bray e Raymond Peterson (1978), foi lançada uma patente, onde esta apresentava a técnica de formar enfustes com fibra de vidro. Consistia na aplicação de uma tira na parte inferior da palminha, tira esta que dará origem ao enfuste. A tira é flexível e inclui uma manga de suporte que contém uma grande quantidade de fios de fibra de vidro numa matriz de resina termoendurecível. Através da exposição de um agente externo, calor ou radiação, a matriz é activada.



Figura 2.10 - Enfuste em fibra de vidro

Obtendo o calor necessário através de uma fonte de energia, este derrete a manga de suporte e assim torna possível esta se fundir com a resina de forma a obter um enfuste rígido firmemente colado na parte inferior da palmilha.

Outro material utilizado na produção de enfustes é a fibra de carbono. A fibra de carbono é um material composto principalmente por carbono, tendo carbono um teor mínimo de 92%, num conjunto de finos filamentos. Trata-se de um material com excelentes propriedades mecânicas apresentando uma elevada resistência à tracção e compressão. É também um material quimicamente inerte tornando-o resistente à corrosão. Este material tem aparecido cada vez mais na indústria aeronáutica, como por exemplo nas asas e também em quadros de bicicletas. Na patente de Michael Toschi acima referida, os compósitos de fibra de carbono eram recomendados pelo autor para o fabrico do enfuste patenteado.

Em Portugal, a empresa TRANSMAP produz enfustes em policarbonato, e produz estes enfustes através da injeção. Também em Portugal, são fabricados através da Printart enfustes em Polipropileno, um polímero, adicionando também fibra de vidro. Enfustes de plástico são muito utilizados no sector aéreo, tanto para hospedeiras como pilotos.

2.4 Estudo sobre o efeito da curva do enfuste

No departamento de informática e tecnologia da saúde da universidade de Hong Kong, China, foi feito, em 2010, um estudo para perceber qual o impacto que as curvas dos enfustes em sapatos de salto tinham na pressão plantar durante uma caminhada. Este estudo foi realizado por Yan Cong, Winson Lee e Ming Zhang.

O departamento sabia que havia uma forte possibilidade de muitos problemas na parte dianteira dos pés serem provenientes da utilização de sapatos de salto alto e respectivo enfuste, e que os seus portadores mais frequentes tinham maiores probabilidades de obter problemas nos pés. Estes problemas estão associados com a redistribuição da carga plantar causada pela alteração do alinhamento do pé em sapatos de salto alto. Como a maioria dos designers apenas se preocupavam com a questão da moda e não o conforto, decidiram então estudar o efeito de diferentes modelos de curva do enfuste.

O objetivo principal deste estudo foi investigar como as formas do arco do enfuste afectam a distribuição da pressão plantar durante a caminhada. Neste estudo, tentaram também perceber se as alterações da pressão plantar na zona do médio-pé produziam desconforto baseado no limiar da pressão de desconforto situada nos 100kPa.

Os sapatos utilizados neste estudo eram de tamanho 37, tamanho Europeu, e tinham uma altura de 75mm no calcanhar como é possível verificar na figura 2.11a. Foram inseridas nos sapatos umas palminhas dentro dos sapatos de forma a simular as diferentes curvas dos

enfustes. As medidas em estudo foram de 11mm, 8mm e 5mm, como mostra a figura 2.11b. Estas medidas são a distância GL presente na figura 2.11a.

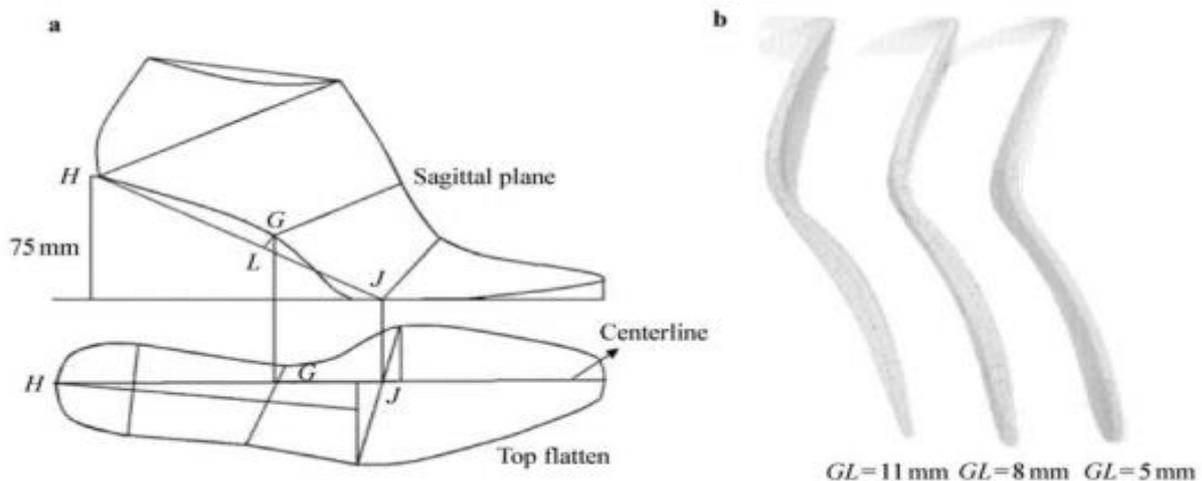


Figura 2.11 – a) Medidas do sapato em estudo; b) profundidades dos arcos em estudo [CONG, Y., LEE, W., ZHANG, M., 2010]

Participaram neste estudo 12 pessoas do sexo feminino, com o hábito de andarem com sapatos de salto alto, e sem qualquer tipo de problema nos tornozelos, joelhos e quadril. A média de idade das participantes era de 24anos, com um peso médio de 54kg e uma altura média de 159cm.

Antes da realização dos testes, os participantes caminhavam durante alguns minutos para se habituarem à diferença de profundidade do arco. Seguido de um descanso, os participantes caminham a uma velocidade a que se sinta confortável. Estes dados foram gravados com uma frequência de 100 Hz durante 10 segundos. Cada teste era repetido até se obterem 3 testes com sucesso. Entre cada teste, havia um descanso de 5min para evitar cansaço e evitar que esse cansaço influencia-se os resultados. No fim, foi possível reunir informação de 108 testes, provenientes de 12 participantes, onde cada um fazia 3 testes para cada tipo de curva de enfuste diferente (3 tipos diferentes). O pé foi dividido em três zonas: ante-pé, médio-pé, e retro-pé. Para cada zona os parâmetros, integrais pressão-tempo (PTI), pico da área de contacto (PA) e pico de pressão (PP) foram medidos durante as caminhadas realizadas nos ensaios.

Em toda a fase de apoio, o integral pressão-tempo foi calculado para uma compreensão da distribuição de carga aplicada ao longo do tempo. Os resultados, apresentados na figura seguinte, mostram que os valores diminuem com o aumento da profundidade do arco na região do ante-pé, enquanto aumenta nas outras duas regiões do pé.

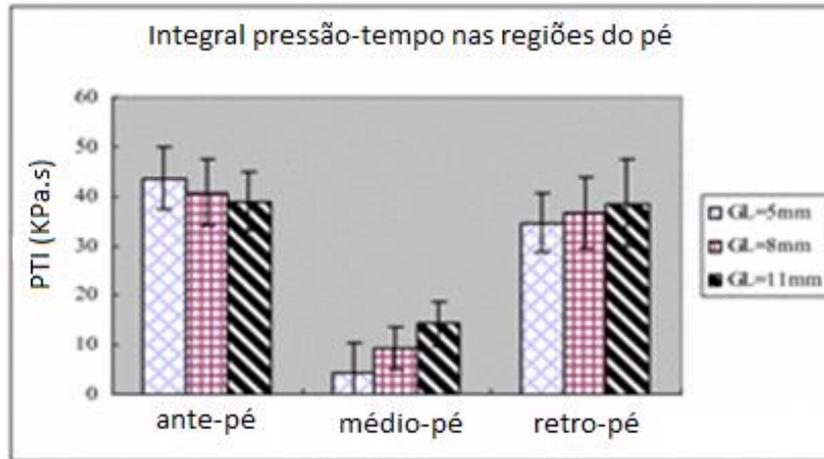


Figura 2.12 - Variação do integral pressão-tempo [CONG, Y., LEE, W., ZHANG, M., 2010]

Quanto ao pico da área de contacto do pé com o enfuste, foi possível verificar que um aumento da profundidade do arco provoca um aumento de área de contacto na zona do médio-pé, enquanto nas outras zonas do pé dá-se uma diminuição de área de contacto quando é utilizada a medida média de profundidade do arco.

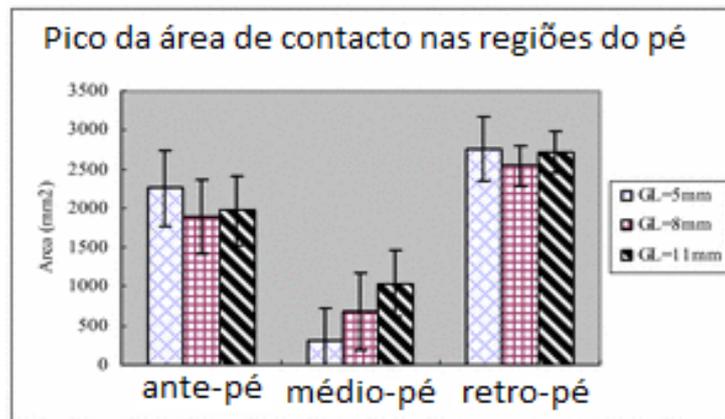


Figura 2.13 – Pico da área de contacto nas regiões do pé [CONG, Y., LEE, W., ZHANG, M., 2010]

Por último, são apresentados os resultados do pico de pressão nas diferentes regiões do pé, na figura 2.14. Uma maior profundidade da curva gerou um menor pico de pressão na região do ante-pé. Na região do médio-pé, este aumentou significativamente com o aumento da profundidade do arco do enfuste. No retro-pé não existe grande variação, com a variação da profundidade da curva do enfuste.

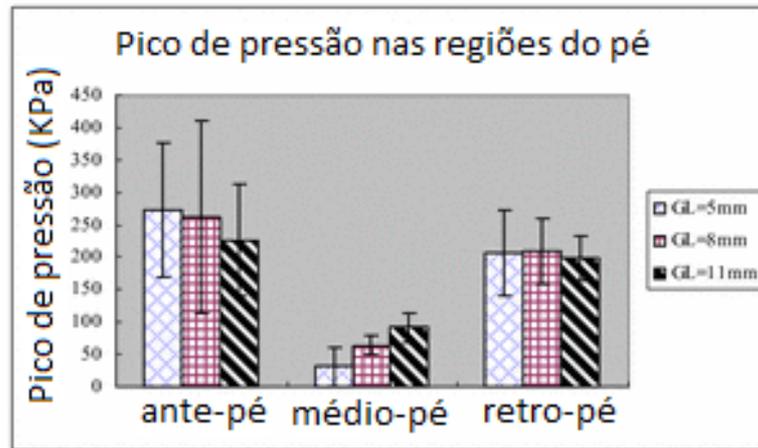


Figura 2.14 - Pico de pressão nas regiões do pé [CONG, Y., LEE, W., ZHANG, M., 2010]

Os resultados deste estudo demonstram que os diferentes designs da curva do enfuste contribuem para uma mudança na pressão plantar. O aumento da profundidade da curva aumenta a área de contacto, o pico de pressão e o integral pressão-tempo no médio-pé, enquanto na região do ante-pé, o pico de pressão e o integral pressão-tempo diminuíram.

3. ESTUDO DE MODELOS EXISTENTES

3.1 Modelos existentes

De forma a poder ser feito um estudo da aplicação de novos aços na produção de componentes para calçado, neste caso o enfuste, foi necessário fazer um estudo em relação aos produtos actualmente existentes no mercado, de forma a verificar os materiais e geometrias utilizados.

Na figura 3.1 são apresentados vários tipos de enfustes que actualmente existem no mercado.



Figura 3.1 – Variedade de enfustes no mercado

Como é possível verificar existe uma grande variedade da geometria e também na escolha do material utilizado. Apesar de apenas serem apresentados enfustes de aço e polimeros na figura acima, já foi possível verificar no capítulo 2.3 existem no mercado enfustes produzidos através de compósitos de fibra de vidro e também fibra de carbono.

Dentro dos enfustes em aço, existe também uma grande variedade, tanto em termos de largura, da curvatura do enfuste, comprimento e largura da nervura aplicada no enfuste e a própria profundidade da nervura.

3.2 Caracterização dos modelos existentes

Neste capítulo é feita uma caracterização dos modelos existentes, modelos estes presentes na figura 3.1. Para esta caracterização os enfustes são numerados para depois haver uma maior facilidade em mencionar os enfustes correctos.

3.2.1 Enfuste 1

O enfuste 1 está presente na figura 3.2 e é um dos enfustes produzido em aço.



Figura 3.2 - Enfuste 1

O enfuste 1 apresenta uma nervura centrada em termos da largura da peça. Possui também dois orifícios para fixação do enfuste no sapato. Este enfuste possui também uma curvatura ao longo do seu comprimento, curvatura esta que como já referido nos capítulos anteriores serve de acompanhamento à curvatura do pé.

Em termos de dimensões gerais do enfuste, temos:

- Comprimento: 119 mm
- Largura: 12,7mm
- Espessura: 1,3 mm
- Altura do arco: 4 mm

Quanto à nervura do enfuste, esta possui as seguintes medidas:

- Largura: 4,3 mm
- Comprimento: 90 mm
- Profundidade: 1,7 mm

Na figura seguinte é possível perceber melhor as principais dimensões deste enfuste.

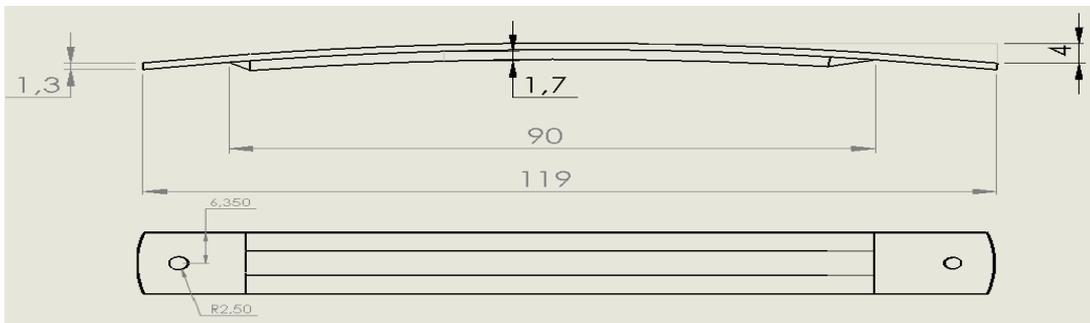


Figura 3.3 - Dimensões gerais do enfuste 1

3.2.2 Enfuste 2

O enfuste 2 segue praticamente a mesma geometria do enfuste 1, e está presente na Figura 3.4. Também se trata de um enfuste em aço.



Figura 3.4 - Enfuste 2

A única diferença em termos de geometria em relação ao enfuste anterior é o facto de este enfuste só possuir um orifício de fixação do enfuste.

Em termos de dimensões gerais do enfuste, temos, como apresenta a figura 3.5:

- Comprimento: 99 mm
- Largura: 10 mm
- Espessura: 1 mm
- Altura do arco: 3,6 mm

Quanto à nervura do enfuste, esta possui as seguintes medidas:

- Largura: 6,4 mm
- Comprimento: 74 mm
- Profundidade: 1,4 mm

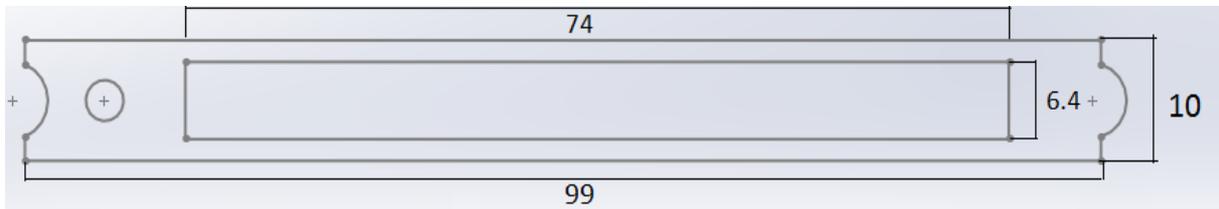


Figura 3.5 - Dimensões gerais do enfuste 2

3.2.3 Enfuste 3

O enfuste 3 difere dos anteriores pelo facto de não possuir nervura nem curvatura ao longo do seu comprimento. Possui uma extremidade alongada e uma extremidade com duas aberturas, como é possível verificar na figura 3.6.



Figura 3.6 - Enfuste 3

Em termos de medidas gerais do enfuste, temos:

- Comprimento: 110 mm
- Largura: 12 mm
- Espessura: 1 mm

As duas aberturas numa das extremidades possuem uma largura de 3 mm enquanto a ponta alongada tem um comprimento de 10 mm e uma largura de 6,5 mm. A figura 3.7 apresenta as principais dimensões deste enfuste.



Figura 3.7 - Dimensões gerais do enfuste 3

3.2.4 Enfuste 4

O enfuste 4 difere um pouco dos dois primeiros enfustes apresentados, apesar de ter nervura e um encurvamento ao longo do comprimento. Como é possível verificar na figura 3.8, este enfuste para além dos dois orifícios de fixação no sapato tem também uma pequena remoção de material numa das extremidades. Possui também duas pequenas nervuras laterais junto a essa remoção de material.



Figura 3.8 – Enfuste 4

Em termos de medidas gerais do enfuste, temos:

- Comprimento: 114 mm
- Largura: 15,8 mm
- Espessura: 1,3 mm
- Altura do arco: 12,7 mm

Quanto à nervura do enfuste, esta possui as seguintes medidas:

- Largura: 5,4 mm
- Comprimento: 70 mm
- Profundidade: 2 mm

3.2.5 Enfuste 5

Por último, o enfuste 5 é feito de polímeros ao contrário dos restantes enfustes apresentados até agora que eram de aço. Este enfuste está presente na figura 3.9.



Figura 3.9 - Enfuste 5

A nervura neste enfuste percorre todo o seu comprimento, e tem uma largura de 10 mm.

Em termos de medidas gerais, temos:

- Comprimento máximo: 120 mm;
- Largura máxima: 27 mm.

Este enfuste possui 6 orifícios para a sua fixação, e também uma ligeira curvatura ao longo do comprimento.

A tabela 3.1 funciona como um quadro de comparação das dimensões gerais dos enfustes apresentados.

Tabela 3.1 - Quadro das dimensões gerais dos enfustes

Dimensões (mm)	Enfuste				
	1	2	3	4	5
Comprimento máximo	119	99	110	114	120
Largura máxima	12,7	10	12	15,8	27
Espessura	1,3	1	1	1,3	1,5
Altura do arco	4	3,6	-	12,7	-
Nervura	✓	✓	X	✓	✓
Comprimento da nervura	90	74	-	70	120
Largura da nervura	4,3	6,4	-	5,4	10
Profundidade da nervura	1,7	1,4	-	2	-

3.3 Dureza

Durante este estudo dos enfustes existentes no mercado, foram feitos ensaios de dureza a alguns dos enfustes acima descritos, neste caso os enfustes 1, 2 e 3.

Os ensaios de dureza foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais do DEM, Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade do Minho.

O ensaio de dureza é muito utilizado na indústria como controlo de qualidade. A dureza de um material é uma propriedade mecânica que se trata de uma resistência do material a uma deformação permanente, ou seja, a uma entrada no domínio plástico. Estes ensaios normalmente passam por uma penetração de um indentador na superfície da amostra. Este indentador pode ser uma esfera, uma pirâmide ou um cone dependendo do tipo de ensaio de dureza a realizar. A dureza deste indentador tem que possuir uma dureza maior que a amostra para poder ser realizado o ensaio, sendo normalmente o diamante ou aço temperado os materiais escolhidos para esta função. Para a obtenção da dureza existem principalmente 4 tipo de ensaios. A figura 3.10 apresenta os variados tipo de ensaios, o tipo de indentador utilizado nos ensaios, e caso necessário a formula para uma determinação final da dureza (Smith, 1998).

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> ⎧ Diamond cone ⎧ 1/16, 1/8, 1/4 in. diameter steel spheres 	 	 	<ul style="list-style-type: none"> 60 kg 100 kg 150 kg 15 kg 30 kg 45 kg 	<ul style="list-style-type: none"> Rockwell Superficial Rockwell

Figura 3.10 - Tipos de ensaios de dureza

O indentador sofre uma carga que faz com que este penetre na superfície do material. Depende depois do tipo de ensaio aplica-se então a fórmula inerente ao ensaio ou lê-se digitalmente o valor da dureza, como é o caso das recentes máquinas de dureza Rockwell que actualmente possuem um leitor digital.

3.3.1 Ensaios de dureza dos enfustes em estudo

Para estes ensaios foi utilizada a máquina pertencente ao Laboratório de ensaio de Materiais, maquina esta presente na figura 3.11.

Em termos de escolha do teste a realizar, foi escolhido o ensaio Rockwell. Dentro do ensaio Rockwell foi necessário olhar para a tabela e perceber que tipo de material se tratava. Como se tratavam de amostras com aços com tratamento térmico, optou-se pelo ensaio Rockwell C, que é o ensaio recomendando para um primeiro teste de dureza a um material com tratamento térmico.

Seguindo a tabela da figura 3.10, foi utilizado um indentador em cone de diamante, assim como uma carga aplicada no valor de 150 kg uma vez que se trata do ensaio Rockwell C.



Figura 3.11 - Ensaio de dureza Rockwell C

Para cada um dos enfustes testados foram feitos 3 ensaios, para ter uma maior certeza dos valores obtidos e assim obter uma média de um valor de dureza nesses ensaios.

Tabela 3.2 – Resultados dos ensaios de dureza

	Número do ensaio			\bar{x}
	1	2	3	
Enfuste 1	52	54.5	52	52.8
Enfuste 2	46	49	49	48
Enfuste 3	54	54	53	53.7

A tabela 3.2 apresenta os resultados obtidos nestes ensaios. Nos próximos subcapítulos vão ser apresentadas análises de composição química e análises de microestruturas que ajudarão a enquadrar melhor estes resultados.

Contudo, é pressuposto que estes materiais sofreram tratamento térmico de forma a aumentar a dureza e a resistência do material. Um dos tratamentos conhecidos capazes de fornecer esse tipo de alterações no material é a têmpera. Na tabela 3.3 é possível ter em conta os valores de dureza atingidos em aços sujeitos a este tipo de tratamento térmico.

Tabela 3.3 – Valores tipos de dureza HRC para aços com tratamento térmico [Guedes, 2013]

% C	HRC
0.1	38
0.15	41
0.2	44
0.25	47
0.30	50
0.35	53
0.40	56
0.45	59
0.50	61
0.55	63
0.60	64
0.65	65

A obtenção da composição química, assim como da microestrutura dos enfustes ensaiados irá permitir enquadrar melhor os valores apresentados.

3.4 Análise de composição química

Para uma melhor compreensão do tipo de materiais utilizados nos enfustes actuais foram feitos alguns ensaios, neste caso em particular foi feita uma análise de composição química dos enfustes 1, 2 e 3 apresentados anteriormente.

Para a realização desta análise foi necessário proceder a uma preparação das amostras para estas poderem ser analisadas. Inicialmente, foram então cortadas pequenas amostras de cada enfuste.

Após a obtenção das amostras necessárias para o ensaio de composição química, foi feito um desbaste com o objectivo de retirar o possível revestimento que as amostras possam ter. O desbaste foi feito a uma velocidade de 210 rotações por minuto.

Depois de feito o polimento, colocou-se a amostra num suporte, onde também foi colocada uma película devido ao facto de ser uma amostra pequena. Feito isso, as amostras foram colocadas na máquina de leitura para obter a composição química.

As amostras ficaram na máquina durante cerca de 30min cada de forma a obter então a sua composição química.

A tabela 3.4 apresenta os resultados obtidos nestes ensaios.

Tabela 3.4 – Resultados das análises de composição química

Elemento químico (%)	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Ferro	98.2	98.1	98.1
Carbono	0.57	0.55	0.56
Manganésio	0.778	0.887	0.822
Crómio	0.283	0.226	0.189
Fosforo	0.0115	0.0206	0.0253
Silício	0.157	0.210	0.264

Através da tabela anterior é possível verificar que os aços apresentados nestas amostras apresentam um teor de carbono relativamente semelhantes entre si, com uma média de 0,56%. Tratam-se assim de aços com médio teor de carbono, que como já referido no capítulo 2.3 são aços que quando sofrem tratamentos térmicos, como tempera e revenido conseguem atingir uma boa tenacidade e resistência.

3.5 Ensaio para análise de microestrutura

Para além da análise da composição química, foi feita também uma análise da microestrutura com o intuito de perceber se os aços sofreram algum tratamento térmico a fim de melhorar as suas propriedades.

Estas análises foram também realizadas no Laboratório de Metalurgia, do Departamento de Engenharia Mecânica da universidade do Minho.

Inicialmente foram feitos novamente cortes nos enfustes em estudo. O corte das amostras foram feitos na mesma máquina que fez os cortes das amostras para a análise química.

Com as amostras foi feita a preparação da montagem para a análise da microestrutura.

A montagem começou com a colocação das 3 amostras num suporte como é possível verificar na figura 3.12.



Figura 3.12 – Suporte das amostras

Depois de colocadas as amostras num suporte, o mesmo foi colocado num pequeno recipiente onde o recipiente foi cheio por resina, para depois secar e termos uma amostra em resina. A resina utilizada para preparar amostra trata-se de um conjunto de pó com líquido, onde $\frac{2}{3}$ da mistura é pó e o outro terço da mistura é líquido. Essa mistura foi feita e então colocada no recipiente onde estava a amostra com o suporte, como se pode verificar na figura 3.13.



Figura 3.13 – Recipiente com amostra em resina

Com a resina já no recipiente é necessário esperar entre 3 a 4 horas para que esta seque e assim continuar o processo de montagem.

A etapa seguinte passou por retirar a amostra em resina do recipiente e passar para a polideira. A figura 3.14 mostra a amostra já preparada em resina.



Figura 3.14 - Amostra em resina

Passando então para a polideira, foi feito um desbaste nas amostras. Esta etapa passou por 3 fases. Para um primeiro desbaste foi utilizado uma lixa 180. De seguida, passou-se para uma lixa 600, mas foi necessário rodar a amostra em 90°, para tornar os riscos visíveis no microscópio mais pequenos e começar a criar uma linha de orientação. Por último, utiliza-se uma lixa 1200 para continuar a colocar a orientação dos riscos na mesma direcção. Os valores das lixas representam o tamanho dos grãos da lixa que faz com que esta seja mais fina ou mais grossa. Neste caso a mais fina é a de 1200, onde existem 1200 grãos de areia por cm² e a mais grossa é a de 180.

Feitos estes 3 passos é necessário lavar a amostra com álcool e algodão e de seguida visualizar no microscópio se os riscos estão todos na mesma direcção.

A fase seguinte passa por um polimento fino em panos de spray de diamantes. Foram utilizados dois panos de spray de diamantes. Primeiramente, foi utilizado um pano de spray de diamantes de 6 µm e o segundo de 1µm. Estes valores representam os tamanhos dos diamantes utilizados no pano. No início de cada polimento aplica-se um spray para que a amostra não aqueça com o polimento. Quando se passa do primeiro para o segundo polimento é necessário lavar a amostra novamente para evitar riscar o pano com contaminações.

Por fim, antes da visualização ao microscópio é necessário fazer um ataque químico à amostra. Este ataque químico é feito através de Nital 5. O Nital 5 é uma mistura de ácido nítrico com ácido etílico. O número 5 representa a percentagem de ácido nítrico presente na mistura, sendo neste caso a mistura de 5% de ácido nítrico com 95% de ácido etílico.

Na visualização das amostras ao microscópio resultaram as seguintes imagens.

Figura 3.15 – Resultados das amostras (à esquerda enfuste 1, ao centro enfuste 2, à direita enfuste 3)

A microestrutura das peças apresentadas na figura 3.15 permite tirar conclusão que o aço sofreu inicialmente uma têmpera em termos de tratamento térmico. Isso é possível perceber tendo em conta a predominante presença de martensite na microestrutura. A têmpera tem como objectivo principal o aumento da resistência e dureza do material. Este tratamento térmico apresenta duas fases no seu processo, onde primeiro é feito um aquecimento com o objectivo de fazer um arranjo dos cristais de metal e depois é feito um arrefecimento brusco com o intuito de obter a estrutura martensítica.

Para além da tempera, é possível também que estes aços tenham sofrido um revenido. Tendo em conta a sua composição química e também as suas durezas, já apresentadas anteriormente, após a têmpera os aços deveriam possuir uma dureza na casa dos 60 HRC. O objectivo principal do revenido passa por melhorar algumas propriedades do aço após a tempera, onde este atinge grandes durezas e podendo tornar-se um material frágil. O revenido consegue baixar a dureza do aço, aumentando a sua ductilidade e elasticidade do mesmo.

3.6 Ensaaios de flexão

3.6.1 Normalização de enfustes

Durante o início do estudo dos enfustes foi feita uma pesquisa para a obtenção de uma normalização de enfustes para que os testes de ensaio de rigidez a realizar nos enfustes fossem feitos seguidos exactamente pela norma oficial. Assim, houve várias tentativas de obtenção destas normas juntos do CTCP, Centro Tecnológico de Calçado de Portugal, mas sempre sem sucesso uma vez que eles afirmaram não ser possível obter ou consultar as normas. Dessa forma foi também questionado sobre a realização dos testes no próprio CTCP, onde foi dada a informação que de momento não realizavam este tipo de testes, apesar de estes aparecerem em catálogos do site oficial.

Contudo, através de pesquisa foi possível ter acesso a uma norma, este caso a norma ISO TC 216/SC N, que apesar de não ser uma norma internacional, onde explica um método para se obter a rigidez longitudinal de enfustes.

Segundo esta norma, a rigidez, na direcção longitudinal, é possível ser determinada tendo em conta a deflexão que o enfuste sofreu quando sujeito a uma força, em condições específicas.

Para ser possível obter resultados mais exactos é necessário ter em conta algumas condições:

- A amostra deve ser um enfuste inteiro, onde para cada tipo de enfuste existente, se for o caso, devem existir 3 amostras de cada tipo;
- As amostras devem ser colocados em ambiente controlado durante as 48h anteriores aos testes, de acordo com a norma ISO 18454;
- Os testes devem ser realizados dentro das mesmas condições, mas se isso não for possível, devem ser realizados nos primeiros 15min após serem retirados do ambiente controlado.

Para a realização deste método é necessário ter em conta quais os materiais e aparelhos a ter em conta para a sua realização. Assim sendo, é necessário uma maquina capaz de medir a rigidez na direcção longitudinal com:

- Um grampo, capaz de prender a ponta do calcanhar do enfuste. O grampo deve ter dimensões suficientes para que $32\text{mm} \pm 1\text{mm}$ do enfuste seja preso. O angulo do grampo tem que ser ajustável de modo a permitir que a força seja aplicada na horizontal;

- A máquina tem que possuir um meio para aplicar uma força descendente para a outra extremidade do enfuste com valores de 2, 4, 6 e 8N com uma tolerância de 5%;

- Um meio de medir a deflexão vertical do enfuste, no ponto onde a força é aplicada com uma precisão de $\pm 0,025$ mm.

É necessário também um cronómetro com uma precisão de ± 0.1 s assim como uma régua de aço inoxidável com uma precisão de ± 0.5 mm.

Se todas estas condições estiverem reunidas os testes podem ser realizados.

O teste passa por prender então a extremidade do enfuste do lado do calcanhar e a colocação de pesos na outra extremidade. A rigidez à flexão do enfuste é calculada através da medida da flexão que o enfuste sofre. Esta rigidez varia com o tipo material que o enfuste é feito e com a secção transversal. Depois disso, prende-se com o grampo a extremidade do enfuste, extremidade relativa ao calcanhar, de modo a que 32mm do enfuste fiquem presos no grampo como já foi referido em cima, sendo depois necessário ajustar o angulo do grampo de modo a que o ponto onde a força irá ser colocada esteja na horizontal. É então aplicada uma força de 2N na outra extremidade do enfuste. O ponto de carga tem que estar a uma distância de 6mm da extremidade. Passados 5 segundos, mede-se a deflexão vertical do enfuste no ponto de carga, sendo retirada de seguida a carga de 2N e é colocada a carga de 4N, e novamente passados 5 segundos é medida a deflexão e assim sucessivamente até aos 8N de carga. Quando retirada a força de 8N é medido o comprimento actual do enfuste desde o fim do grampo até ao ponto de aplicação da força.

A rigidez à flexão, S , em kN/mm^2 é dada pela equação:

$$S = \frac{FL^3}{3a} \times 10^3$$

Onde:

- F é a força aplicada, N;
- a como a deflexão, mm;
- L o comprimento final medido, mm.

Assim determina-se a rigidez à flexão através dos valores obtidos experimentalmente.

3.6.2 Realização dos ensaios de flexão

Os ensaios de flexão aqui mencionados foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica.

Estes ensaios tiveram como principal objectivo perceber até que valores de carga o enfuste consegue resistir até ceder e entrar no domínio plástico.

Um componente e a sua capacidade de resistir a esforços não está apenas ligada ao domínio elástico. Um componente de uma liga de aço consegue resistir a deformações maiores que as limitadas pelo domínio elástico. No domínio elástico a deformação é proporcional à carga aplicada para simplificações como o material isotrópico e homogéneo (Linhares ,2013). Assim que o material entra em regime plástico este perde a sua forma original, estando num regime de tensão-deformação plástico, não havendo uma linearidade como no domínio elástico (Costa, 2009).

As curvas tensão-deformação apresentam o modo como o material se comporta dentro do regime plástico e elástico. Nos ensaios de tracção é normal utilizar as dimensões iniciais dos provetes para obter os valores das tensões e isso não é o mais correcto pelo facto de estas se alterarem ao longo do ensaio. A essa curva obtida no ensaio de tracção dá-se o nome de curva tensão nominal-deformação nominal. A curva tensão verdadeira-deformação verdadeira obtém-se através da utilizada da dimensão do provete em cada instante do ensaio.

Com um volume constante e distribuição homogénea as seguintes equações permitem obter os valores para a curva tensão verdadeira-deformação verdadeira.

$$\bar{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon)$$

$$\bar{\varepsilon} = \ln(1 + \varepsilon)$$

Onde:

σ – Tensão nominal

$\bar{\sigma}$ – Tensão verdadeira

ε – Deformação nominal

$\bar{\varepsilon}$ – Deformação verdadeira

Na figura 3.16 estão presentes as duas curvas aqui apresentadas, curvas estas relativas a ensaios de tracção. Está presente também uma correção da parte plástica do material, pois na apresentada é considerada uma deformação isotrópica. As equações mais comuns para a determinação da tensão da correcção, são:

$$\bar{\sigma} = k\bar{\epsilon}^n$$

$$\bar{\sigma} = k(\epsilon_Y + \bar{\epsilon})^n$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_Y + k\bar{\epsilon}^n$$

Onde;

k – módulo da tangente, onde se $n=1$, $k=E$

n – coeficiente de encruamento

ϵ_Y – extensão na cedência

σ_Y – tensão de cedência

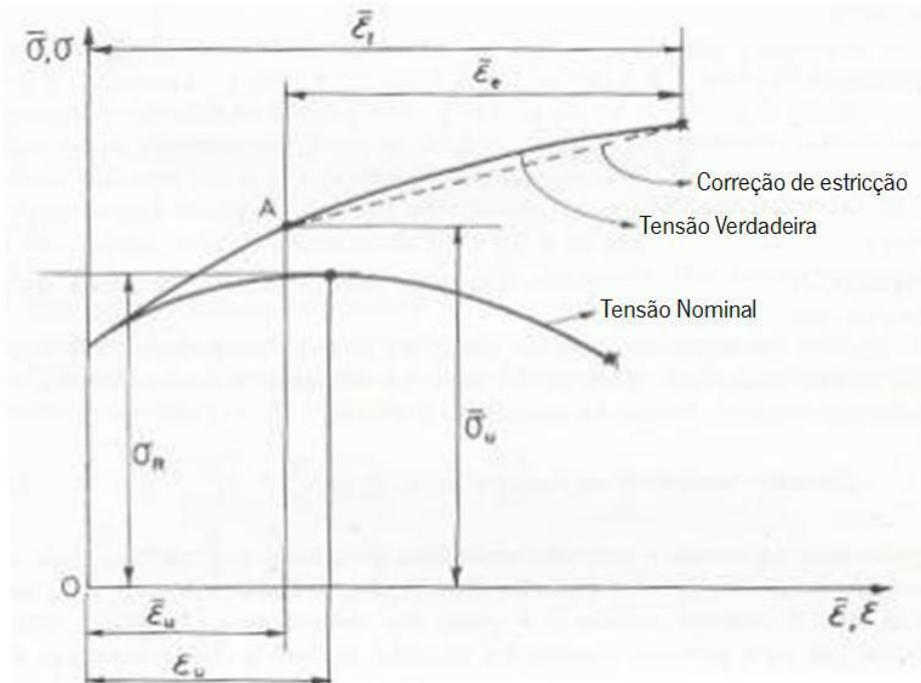


Figura 3.16 - Curvas tensão-deformação

Em termos de ensaios de flexão realizados, os enfustes seleccionados foram os enfustes 1, 2 e 3 apresentados no capítulo 3.2.

O método do ensaio de flexão utilizado passou pela fixação de uma extremidade do enfuste em 30 mm de encastramento, com uma aplicação de carga na outra extremidade do enfuste e assim obter os valores de deslocamento em função da carga aplicada nessa extremidade. Na figura 3.18 é possível ver uma pequena ilustração do ensaio realizado, neste caso para o enfuste 1. A nervura ficou sempre na face virada para cima sendo a força aplicada no sentido contrário à curvatura. Na figura 3.17 é apresentada a máquina utilizada para a realização destes ensaios.



Figura 3.17 - Máquina utilizada para ensaios de flexão

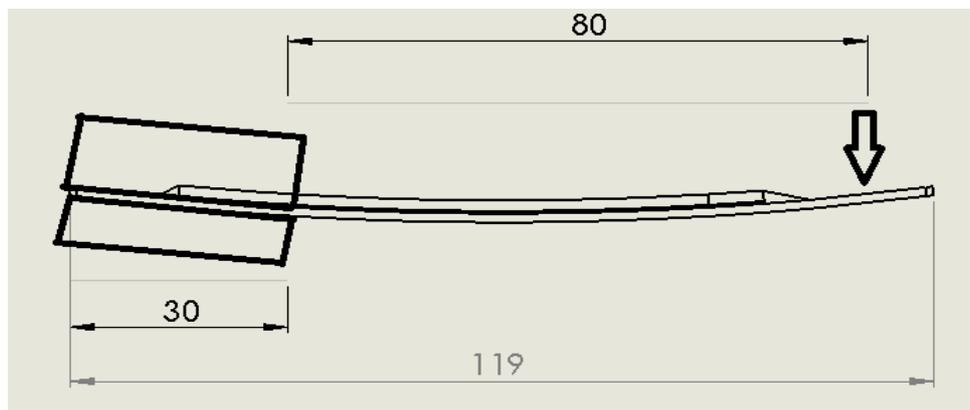


Figura 3.18 - Ilustração do ensaio experimental

Enfuste 1

Os resultados dos ensaios do enfuste 1 foram os principais valores de comparação em futuros capítulos porque inicialmente apenas para este enfuste tínhamos mais do que uma amostra e com mais do que um ensaio é sempre possível ter melhores certezas dos resultados obtidos.

Como já referido, este enfuste apresenta um comprimento de 119 mm, e assim com um encastramento de 30 mm a força foi aplicada a uma distância de 80 mm do encastramento.



Figura 3.19 – Montagem do ensaio de flexão

Assim, para estes ensaios foram tidas em conta as seguintes considerações:

- Medida de encastramento: 30 mm;
- Distância da aplicação da carga ao encastramento: 80 mm;
- Controlo do ensaio: deslocamento;
- Velocidade do ensaio: 0.5 mm/s
- Deslocamento máximo: 40 mm

Com estas considerações e tendo em conta a velocidade do ensaio e o deslocamento máximo conhecido, a duração do ensaio deverá ter uma duração de 80 s.

Foram colocadas umas pequenas chapas para que a fixação fica-se correcta e fosse feito um encastramento correcto.

Os resultados do primeiro ensaio estão presentes na figura 3.20, onde podemos ver que o ensaio terminou aos 40 mm de deslocamento tal como tinha sido enunciado anteriormente.

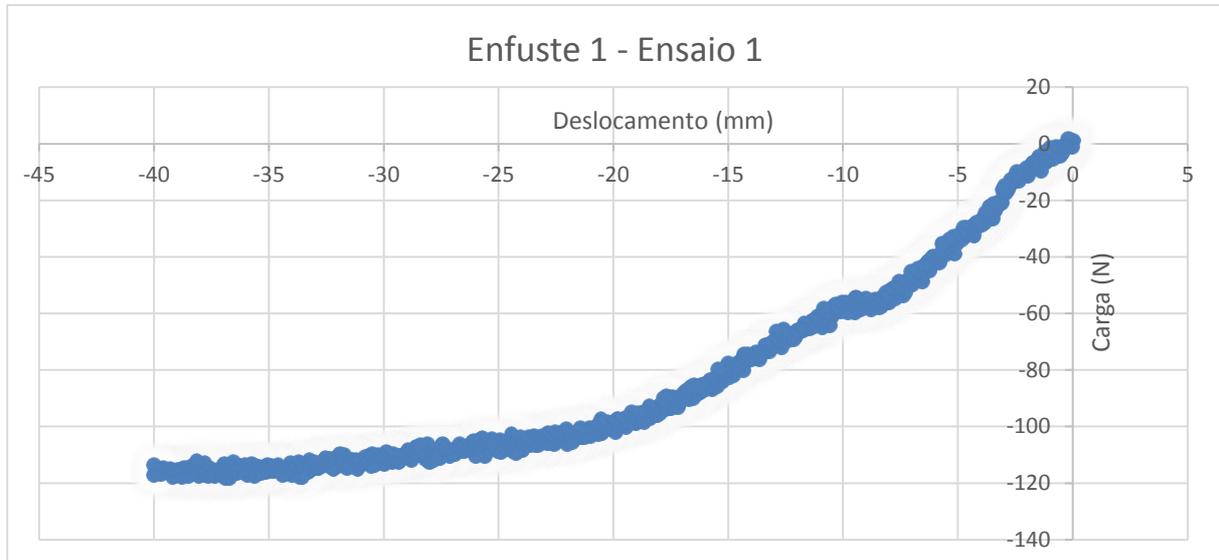


Figura 3.20 – Gráfico carga vs deslocamento do ensaio 1 do enfuste 1

No fim do ensaio e retirada a carga na extremidade do enfuste, este recuperou a flexão nessa extremidade em 28 mm, ficando então com 12 mm de deslocamento final.

Em termos de rigidez do enfuste a este ensaio, este valor pode se retirado através da parte linear inicial dos gráficos apresentados, onde traçando uma linha de tendência e obtendo o seu declive, é possível retirar o valor da rigidez.



Figura 3.21 – Rigidez do enfuste ao ensaio

Neste primeiro ensaio é então possível retirar um valor de rigidez de 7,25 N/mm.

O segundo ensaio do Enfuste 1 foi realizado nas mesmas condições que o anterior e os resultados foram bastantes próximos entre si, como é possível verificar pela figura 3.22. A figura 3.22 mostra os resultados do segundo ensaio. Neste segundo ensaio a recuperação foi de 26,3 mm, ficando então com 13,7 mm de deslocamento final.

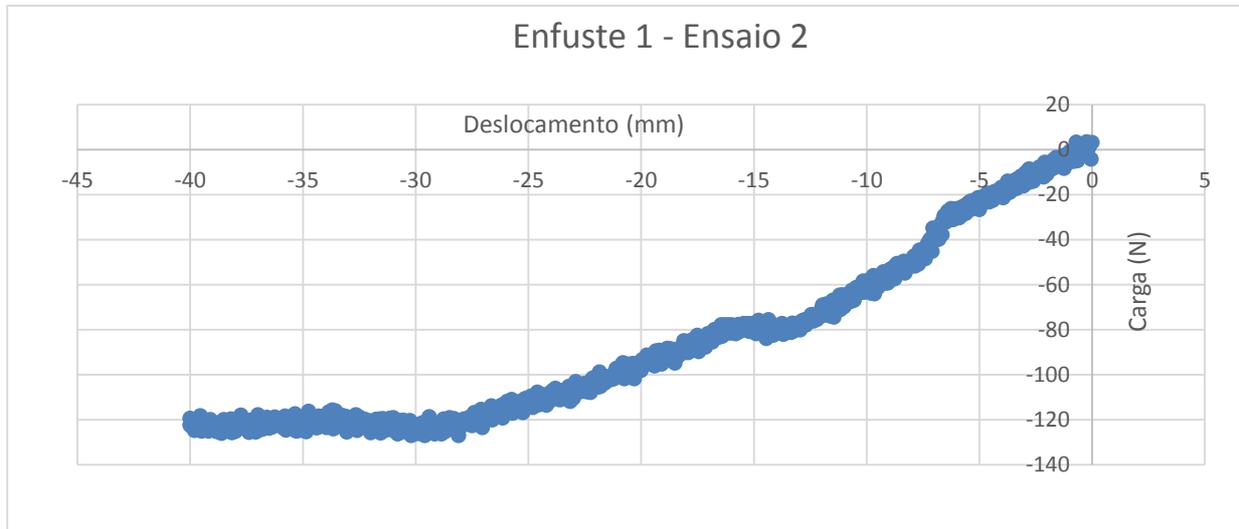


Figura 3.22 - Gráfico carga vs deslocamento do ensaio 2 do enfuste 1

Neste segundo ensaio foi possível obter uma rigidez do enfuste de 6,8 N/mm.

Através dos resultados apresentados nas figuras anteriores é possível verificar inicialmente um aumento gradual da carga em função do deslocamento, mas ambas sofrem uma ligeira alteração durante cerca de 15 s mas de seguida voltam a ter um comportamento rectilíneo, até que aos 120 N a carga mantém-se sempre constante e já não é necessário uma carga maior para continuar a deslocar o enfuste.

O segundo ensaio permite uma melhor observação desse facto.

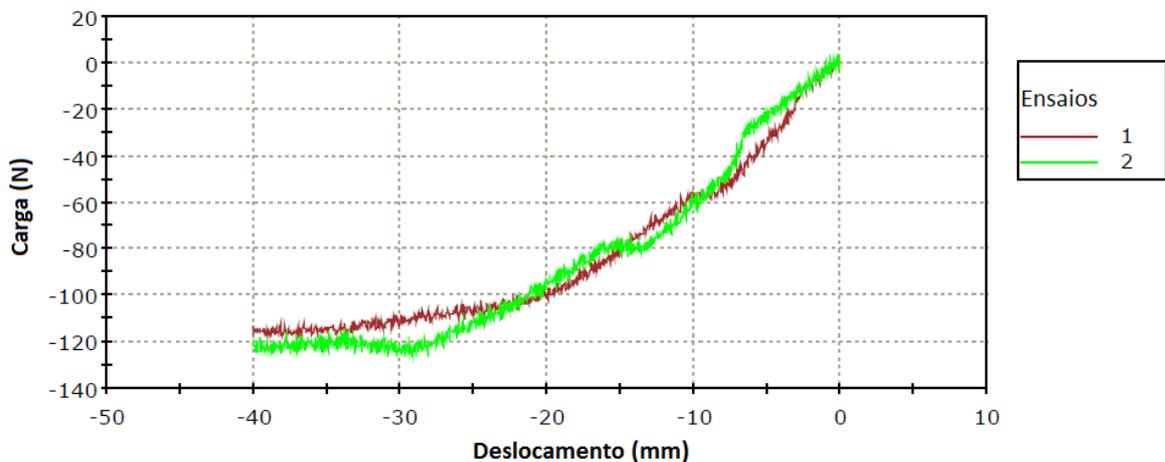


Figura 3.23 - Gráfico carga vs deslocamento para ambos os ensaios

A partir dos 30 mm de deslocamento, a carga máxima aplicada, de 120 N é suficiente para continuar a prolongar o deslocamento da extremidade do enfuste. Este foi o valor a partir do qual foi trabalhado o desenvolvimento de uma nova geometria tendo em conta alguns factores.

Enfuste 2

O método para a realização dos ensaios do enfuste 2 seguiram o mesmo dos ensaios anteriores apresentados, com algumas alterações em termos de medidas como a distância ao encastramento pois o seu comprimento total, 99 mm, não permita uma fixação segura com a mesma distância de encastramento dos ensaios anteriores.

Assim, para estes ensaios foram tidas em conta as seguintes considerações:

- Medida de encastramento: 30 mm;
- Distância da aplicação da carga ao encastramento: 60 mm;
- Controlo do ensaio: deslocamento;
- Velocidade do ensaio: 0.5 mm/s
- Deslocamento máximo: 40 mm

Os ensaios do enfuste 2 terminaram antes dos 40 mm máximos a que a deslocação iria se assim o ensaio permitisse. Na figura 3.24 é apresentado o gráfico relativo ao primeiro ensaio do enfuste 2.

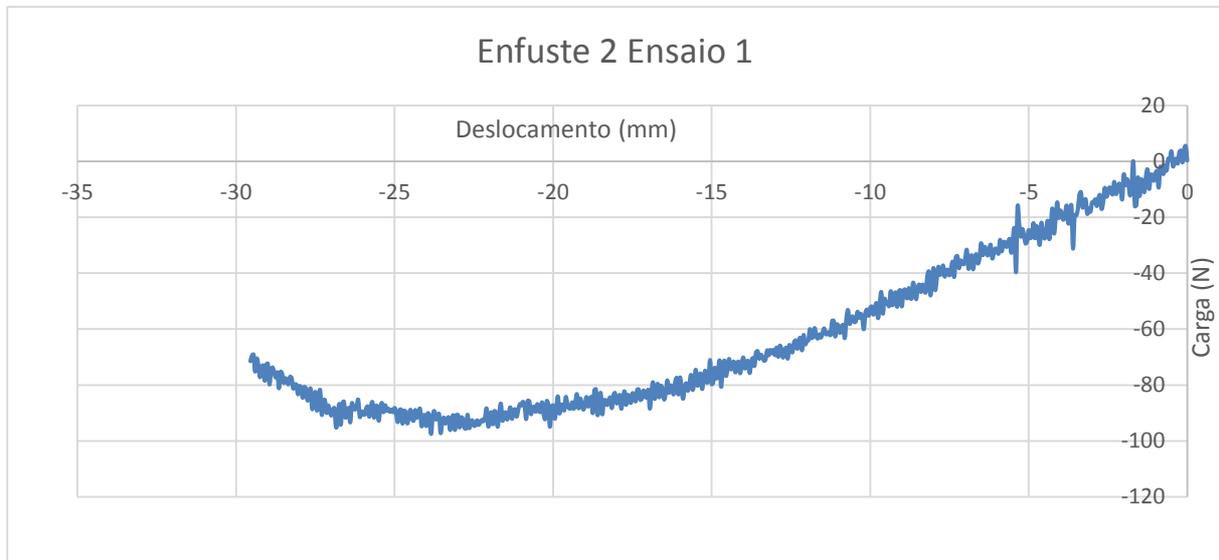


Figura 3.24 - Gráfico carga vs deslocamento do ensaio 1 do enfuste 2

Neste primeiro ensaio o enfuste ficou com um deslocamento final de 14 mm em relação à posição inicial da extremidade. Neste caso, com a aplicação da força mais perto do encastramento foi necessário menos força para se obter o mesmo tipo de curva apresentada para o enfuste anterior, pois quando se atingiu uma carga com valor de 90 N foi possível continuar a deslocar o enfuste com uma diminuição de valor de carga.

Para este enfuste, no seu primeiro ensaio foi possível obter um valor de rigidez de 5,27 N/mm.

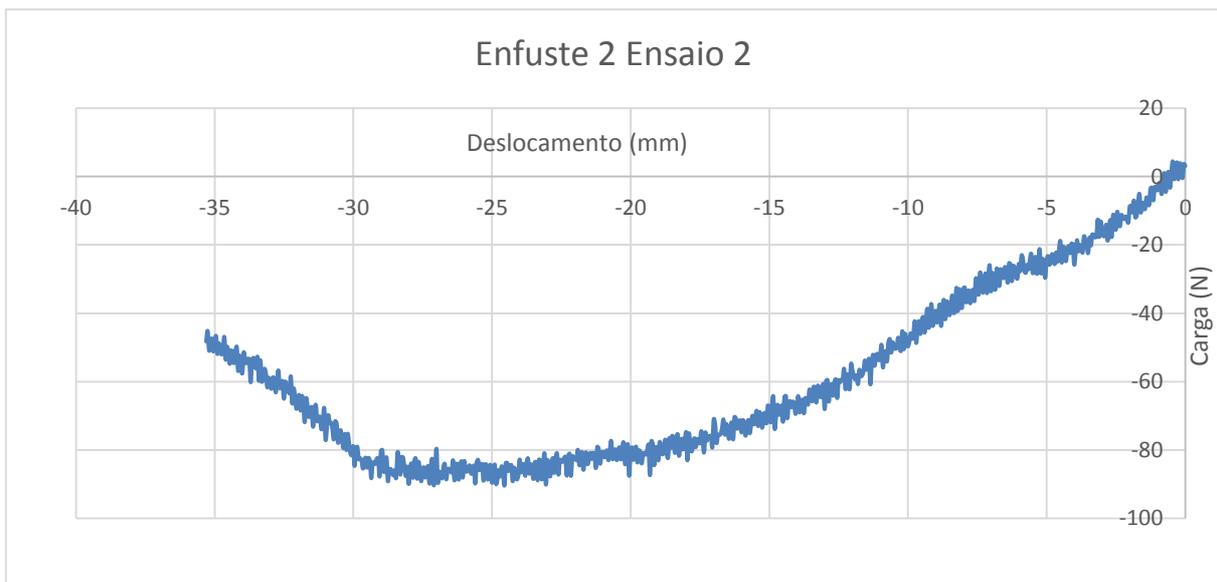


Figura 3.25 - Gráfico carga vs deslocamento do ensaio 2 do enfuste 2

No segundo ensaio a situação voltou-se a repetir de acordo com o primeiro ensaio para este enfuste, onde a carga máxima aplicada nesta situação ficou situada entre os 80 N e os 90 N. O deslocamento final do enfuste ficou nos 12,8 mm.

Em termos de rigidez, foi obtido um valor de 4,8 N/mm.

Em comparação com o enfuste 1, verifica-se que o enfuste 1 necessitou de uma maior carga para que fosse possível continuar um deslocamento sem um aumento de carga, valor esse que se situou nos 120 N, apresentando maiores valores de rigidez, apesar da distância de encastramento ser maior que no enfuste 2, enquanto no enfuste 2 a carga máxima atingida ficou entre os 80 N e os 90 N.

Enfuste 3

Nos ensaios para o enfuste 3 o método foi novamente o mesmo. Neste caso tratava-se de um enfuste sem nervura e sem curvatura sendo assim possível retirar algumas conclusões sobre a presença ou não de nervura.

Para estes ensaios foram tidas em conta as seguintes considerações:

- Medida de encastramento: 30 mm;
- Distância da aplicação da carga ao encastramento: 60 mm;
- Controlo do ensaio: deslocamento;
- Velocidade do ensaio: 0.5 mm/s
- Deslocamento máximo: 40 mm

Os resultados dos ensaios deste enfuste mostram que com a falta de nervura e também de curvatura não conseguem ter tanto resistência como os anteriormente testados. A figura 3.26 apresenta o resultado do primeiro ensaio a este enfuste.

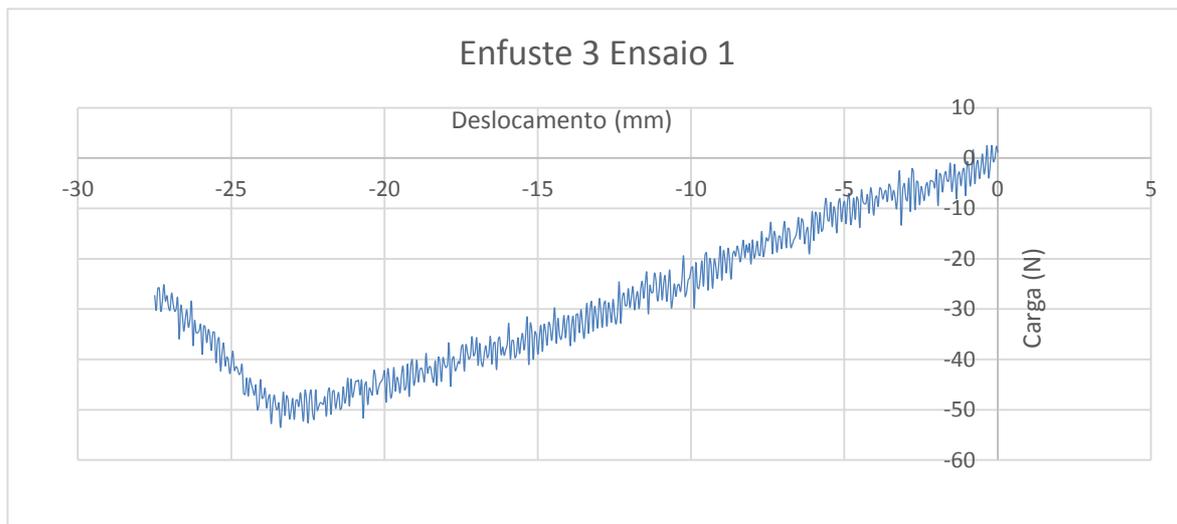


Figura 3.26 - Gráfico Carga vs Deslocamento do ensaio 1 do enfuste 3

A carga máxima atingida para uma maior facilidade de deslocamento rondou os 50 N, valores bastante abaixo dos dois anteriores enfustes testados. O deslocamento final da extremidade onde foi aplicada a carga ficou apenas nos 3 mm, o que resulta de um grande retorno elástico na peça. Em termos de rigidez, estes enfustes foram o que apresentaram um menor valor, tendo neste caso um valor de 2,3 N/mm.

Os dois ensaios seguintes deste enfuste corroboram os resultados do primeiro ensaio, voltando a repetir-se um menor valor de carga para deslocar a extremidade este enfuste, como mostram as figuras 3.27 e 3.28.

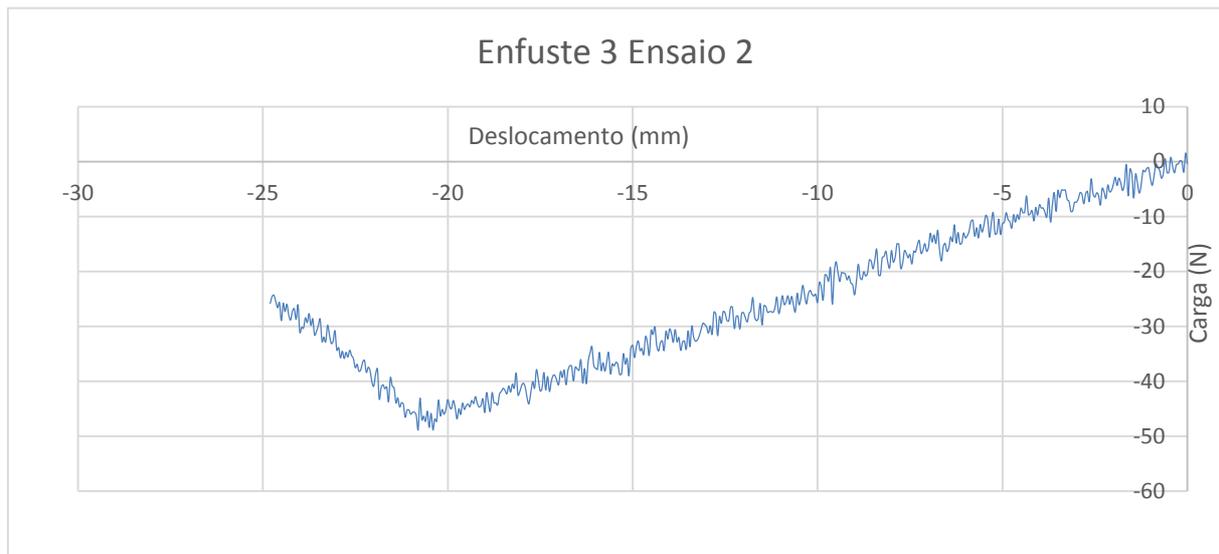


Figura 3.27 - Gráfico Carga vs Deslocamento do ensaio 2 do enfuste 3

O deslocamento final obtido no ensaio 2 do enfuste 3 voltou a ficar nos 3 mm. Em termos de rigidez foi obtido novamente um valor de 2,3 N/mm.

Por ultimo, no ensaio 3, figura 3.28, confirmou-se a tendência dos ensaios anteriores e obteve-se um deslocamento final de 3 mm.

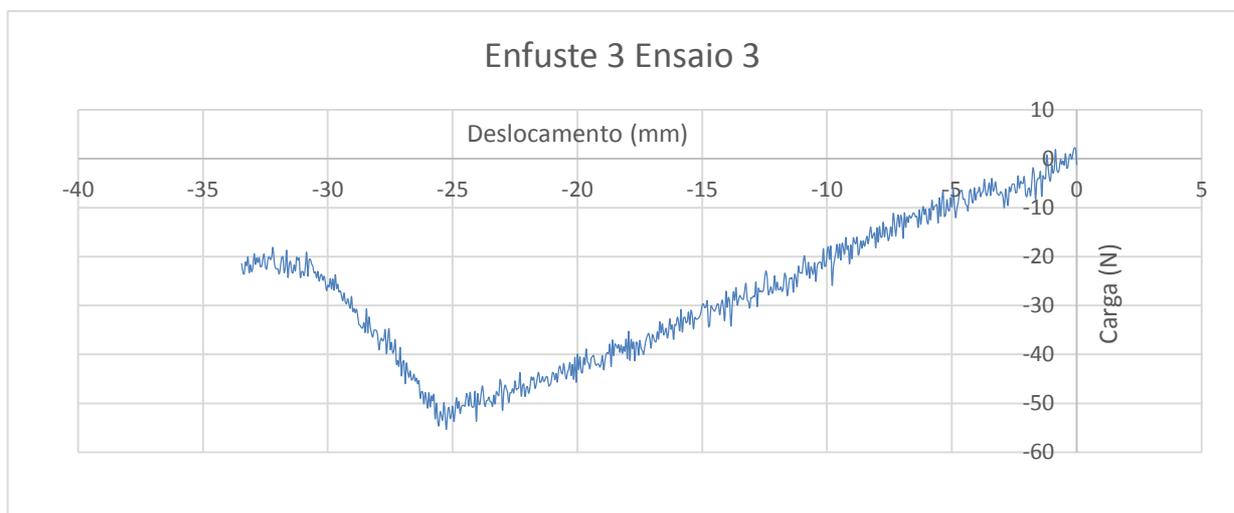


Figura 3.28 - Gráfico Carga vs Deslocamento do ensaio 2 do enfuste 3

Este último ensaio apresentou uma rigidez de 2,17 N/mm, valor próximo dos dois ensaios anteriores.

Após estes ensaios experimentais é possível verificar que o enfuste que apresentou um melhor comportamento em termos de carga máxima necessária a aplicar foi o enfuste 1, enfuste este que entre os 3 ensaiados é o que apresenta uma maior espessura assim como uma maior profundidade de nervura, dimensões estas que são importantes no enfuste, tanto para a sua aplicação como para o ensaio realizado. A tabela 3.5 resume os ensaios realizados experimentalmente.

Tabela 3.5 – Resumo dos ensaios experimentais

Ensaio	Carga máxima aplicada (N)	Deslocamento final (mm)	Rigidez (N/mm)
Enfuste 1			
Ensaio 1	120	12	7.25
Ensaio 2	120	13.8	6.8
Enfuste 2			
Ensaio 1	90	14	5.2
Ensaio 2	90	12.8	4.8
Enfuste 3			
Ensaio 1	50	3	2.3
Ensaio 2	50	3	2.3
Ensaio 3	53	3	2.17

Em termos de análise de resultados, é possível perceber que a presença de nervura neste componente tem um grande impacto no seu comportamento, sendo que a zona elástica é maior quando a geometria difere da rectangular.

4. DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO MODELO

4.1 Objectivo principal

Como referido no capítulo 1, o principal objectivo passa por perceber a capacidade dos aços de alta resistência para suportar certos esforços neste tipo de componentes. A utilização destes mesmos aços, passa por evitar o tratamento térmico a que grande parte dos enfustes actualmente feitos em aço são sujeitos, tratamentos estes que já apresentados anteriormente depois de feitas as análises de composição química e de microestrutura.

4.1.1 Os aços de alta resistência

Com o intuito da utilização de novos materiais utilizados no enfuste, este trabalho tem como objectivo perceber como se comportam os aços de alta resistência para este componente do calçado.

Esta utilização dos aços de alta resistência tem como objectivo utilizar a grande resistência mecânica que incute no componente de forma a permitir reduzir o material utilizado na sua produção, evitando ao mesmo tempo o tratamento térmico do material.

Este tipo de material é muito utilizado nos dias de hoje na indústria automóvel. Essa utilização começou de forma mais consistente no início da década de 90, através do projecto ULSAB-AVC (Ultra light auto body) criado pelos maiores produtores de aço. Este projecto apresentou uma diversidade de produtos metálicos com grande potencial estrutural, permitindo às estruturas apresentar uma grande capacidade de absorção de energia quando estas sofriam choques bruscos. Estes metais apresentavam também uma boa resistência à corrosão. Dentro destes metais estavam incluídos os aços DP (Dual Phase) que foram os aços utilizados para o fabrico de um novo enfuste. A figura 4.1 apresenta um gráfico que mostra a relação das propriedades dos principais aços de alta resistência, entre eles os aços DP (Costa, 2009).

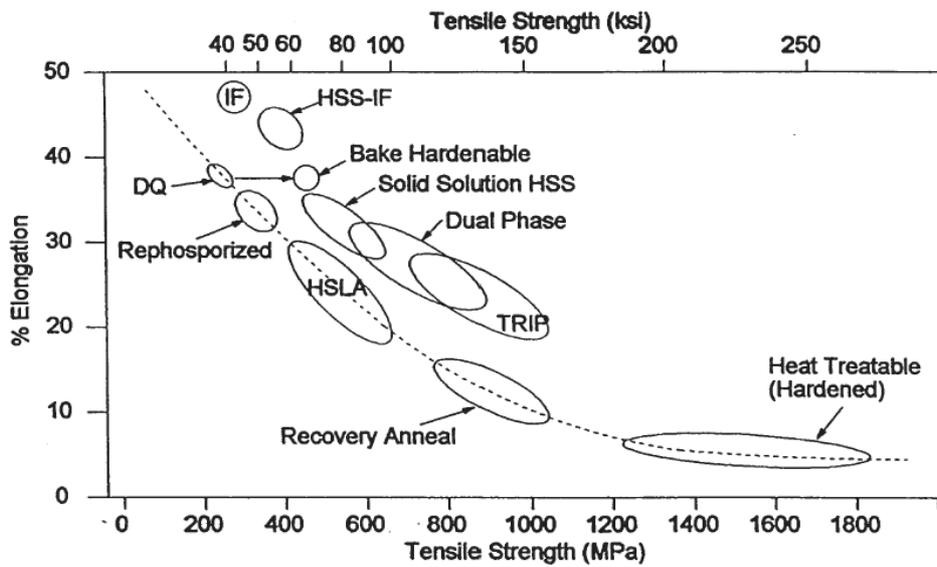


Figura 4.1 - Propriedades dos aços de alta resistência [COSTA, 2009]

Para o projecto dos novos enfustes, foram testados aços DP800 e DP1000. Normalmente nestes aços DP, os valores na designação correspondem a um valor de tensão de ruptura mínima garantida. Estes aços apresentam uma boa ductilidade, que facilitará o fabrico da nervura que irá ser aplicada no enfuste. Para estes aços existem também informação precisa para trabalho futuro como a curva tensão-deformação real.

Estes aços apresentam esta designação, aços DP, porque apresentam uma microestrutura de 15 a 20% de martensite numa matriz de ferrite poligonal como mostra a figura 4.2, sendo esta microestrutura obtida durante a austenitização seguida de um arrefecimento rápido para transformação da austenite previamente formada em martensite.

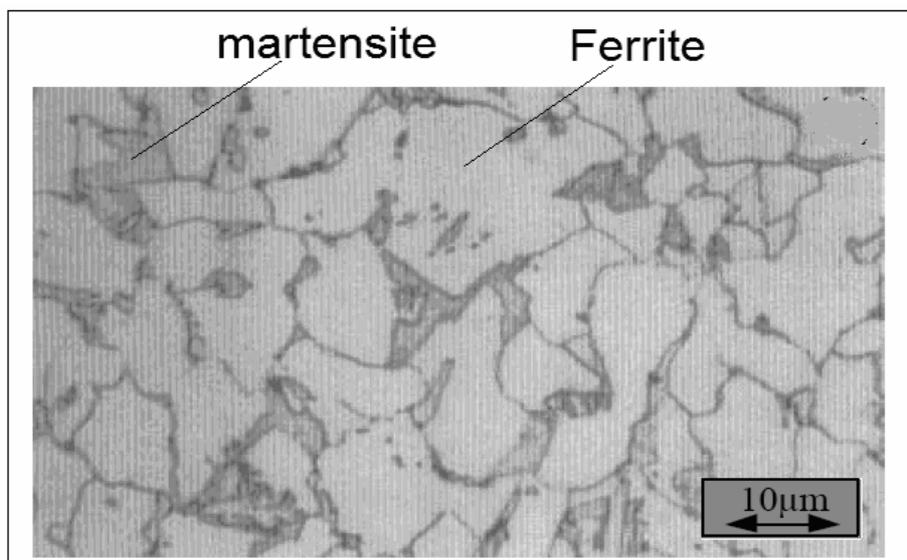


Figura 4.2 - Microestrutura típica dos aços DP [Costa, 2009]

A deformação plástica em aços DP está compreendida entre três estágios:

- 0,1% a 0,5%, onde se dá a eliminação de tensões residuais provocando um rápido endurecimento, isto devido ao facto da incompatibilidade plástica das duas fases.

- 0.5% a 4% onde a taxa de encruamento da ferrite é reduzida à medida que esta encontra grãos de martensite que praticamente não se deformam. É possível a ocorrência de transformação da austenite residual para martensite induzida por deformação.

- A partir dos 4% ocorre a formação de estruturas celulares de deslocamento e a deformação da ferrite dá-se por fenómenos de recuperação rápida (Costa, 2009).

A nervura presente já nos enfustes também será aplicado com o novo material. Este tipo de nervura com o objectivo de dar uma maior rigidez é bastante utilizado também na indústria automóvel. Esta nervura é obtida através de um processo de estampagem.

4.2 Geometria e dimensões gerais do novo modelo

Como já foi anunciado no capítulo 3, a criação do novo modelo teve por base as dimensões gerais do enfuste 1, assim como dos seus ensaios de flexão. Não havendo a possibilidade de consultar as normas, tornou-se impossível saber restrições acerca de tamanhos/medidas gerais dos enfustes. Assim, a criação de um novo modelo com recurso a aços de alta resistência foi definida através da comparação de tamanho da nervura que o enfuste 1 apresenta com a dimensão que da nervura que a empresa tinha a possibilidade de fazer, ou seja, a largura e o comprimento do novo enfuste vai de acordo com o aumento das dimensões da nervura da empresa em relação à nervura apresentada no enfuste 1.

Inicialmente, a informação da empresa tinha como dimensões da nervura as seguintes:

- Largura da nervura: 6,90 mm
- Profundidade da nervura: 1,70 mm

Com estas dimensões e tendo em conta as medidas gerais do enfuste 1, que apresentava um comprimento de 119 mm e uma largura de 12,7 mm, com uma nervura de 90 mm de comprimento e 4,3 mm de largura. Seguindo então a relação entre a nova nervura com a nervura do enfuste 1, o novo enfuste apresentava umas dimensões de:

- Comprimento: 140 mm
- Largura: 20,38 mm
- Comprimento da nervura: 111 mm
- Largura da nervura: 6,90 mm

Estas dimensões tiveram importância no momento do fabrico das peças, pois inicialmente foram feitos estudos com estas dimensões, mas a largura da nervura aplicada é de 5,90 mm e foi com essa dimensão que as simulações foram realizadas novamente e aqui apresentadas. Contudo, este maior comprimento do enfuste não vai afectar as simulações realizadas porque as cargas e deslocamentos apresentados serão sempre às distâncias a que foram sujeitos o enfuste 1 durante os ensaios experimentais.

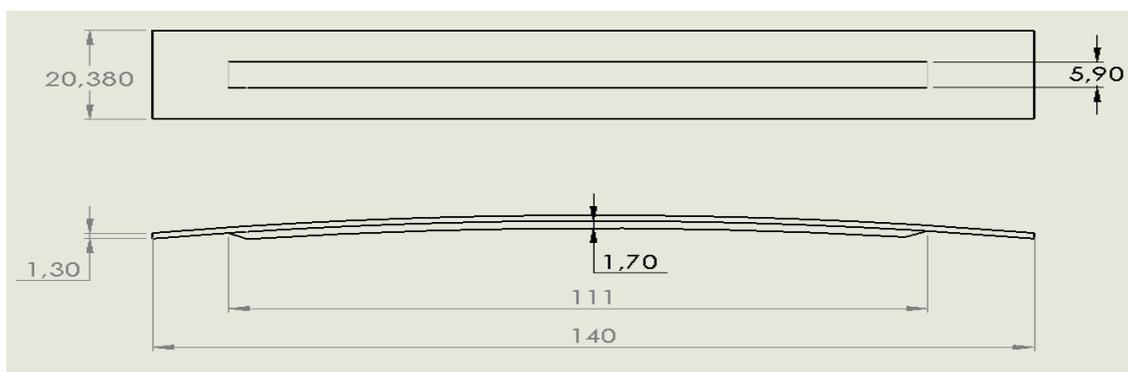


Figura 4.3 – Dimensões de novo modelo em estudo

4.2.1 Modelo numérico do novo enfuste

A geometria do enfuste 1 assim como a geometria do novo enfuste foi criada no software SolidWorks. O SolidWorks é um programa CAD e CAE e é utilizado em todo o mundo para trabalhos de engenharia. Este possui várias ferramentas disponíveis como o módulo de simulação, que permite simulação numérica linear, não linear, de fadiga entre outros.

Na figura 4.4 são apresentados os enfustes 1 e o novo modelo do enfuste com as dimensões anunciadas.



Figura 4.4 - Modelo do enfuste 1 à esquerda e do enfuste com nova nervura à direita

Contudo, para além das dimensões da nervura serem as possíveis para fabrico pela empresa em colaboração, os enfustes por eles produzidos também não iriam apresentar

curvatura. No subcapítulo seguinte irão ser apresentadas simulações numéricas para o enfuste com as novas dimensões, tendo em conta algumas condições já apontadas.

4.3 Simulação numérica

Como já foi dito, o objectivo deste trabalho é perceber como o enfuste se comporta ao ser produzido num aço de alta resistência. O facto de ser necessário perceber o comportamento do material para além do regime elástico faz com que seja necessário então recorrer a uma ferramenta CAE, neste caso o SolidWorks. Esta ferramenta permite o estudo de uma simulação não-linear no domínio plástico.

Na realização das simulações não lineares o software de simulação utiliza o critério de Von Mises para descrever o comportamento plástico dos materiais. Este critério de plasticidade assenta na observação de que um material dúctil começa com o escoamento num local onde a tensão de Von Mises se torna igual ao limite da tensão de cedência.

Para a realização da simulação numérica não linear é necessário a inserção da curva tensão-deformação real para a zona plástica no software. Os materiais utilizados nas simulações foram os aços DP800 e os DP1000, tendo sido fornecidas essas curvas para a realização das simulações. Nas figuras seguintes estão apresentadas as mesmas.

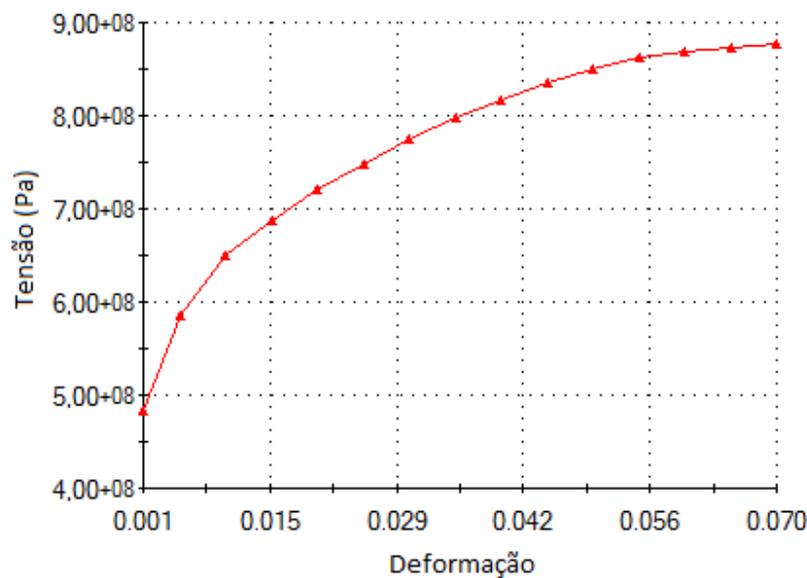


Figura 4.5 - Curva tensão-deformação real do aço DP800

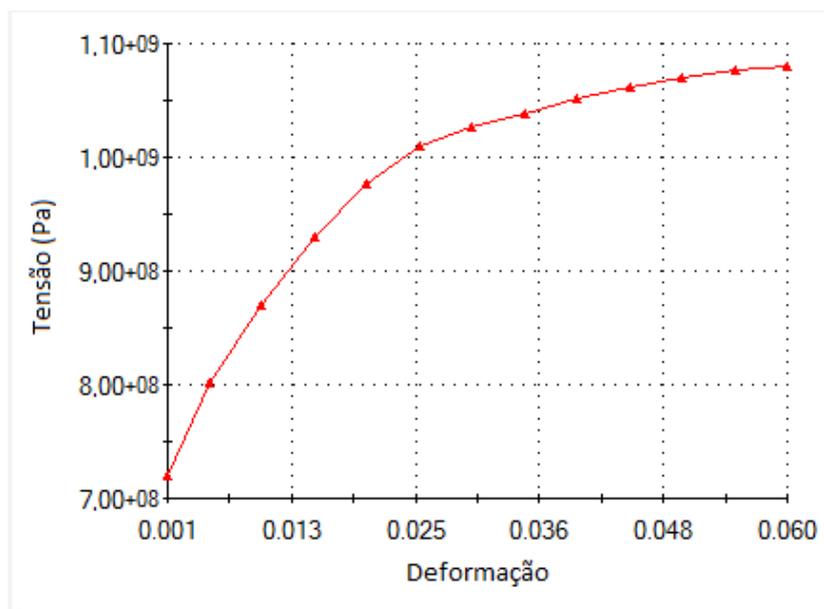


Figura 4.6 - Curva tensão-deformação real do aço DP1000

4.3.1 Condições de fronteira

Para a realização das simulações numéricas é necessário definir as condições de fronteira do ensaio em questão. Neste caso em particular, é apresentar as restrições no componente ensaiado e também as forças aplicadas externas a aplicar no componente.

Nas restrições ao componente são aplicadas as mesmas restrições a que o componente foi sujeito nos ensaios de flexão realizados e apresentados no capítulo 3.

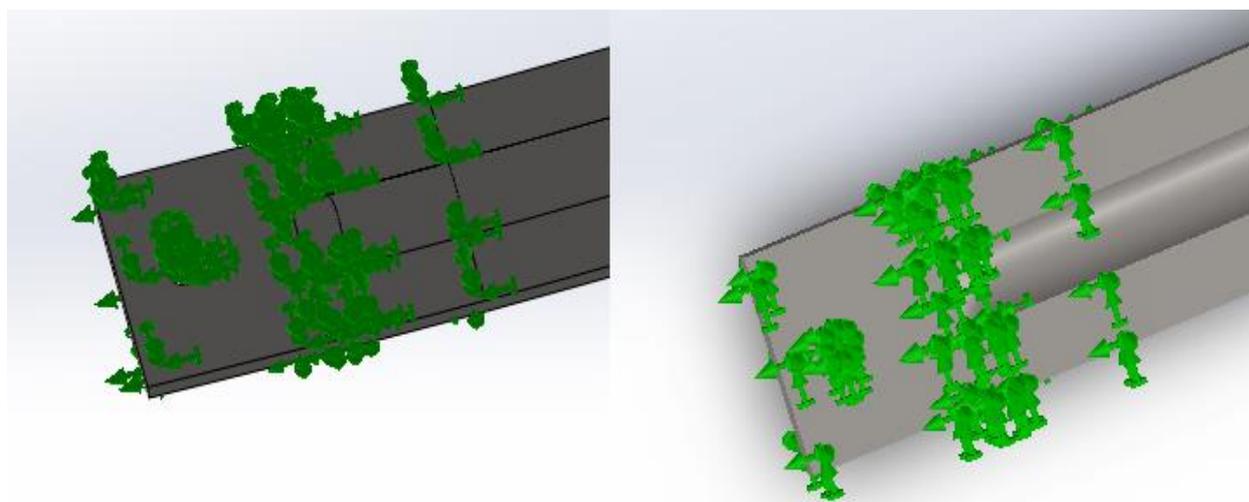


Figura 4.7 - Restrição no componente nas simulações

Como mostra a figura 4.7, o enfuste apresenta um encastramento na extremidade mais alongada do enfuste. A dimensão do encastramento é a mesma que foi utilizada para os primeiros ensaios experimentais, ou seja, 30 mm.

Quanto à força externa aplicada no enfuste esta é aplicada a uma distância do encastramento de 80 mm, como nos ensaios anteriores. Esta aplicação está apresentada na figura 4.8.

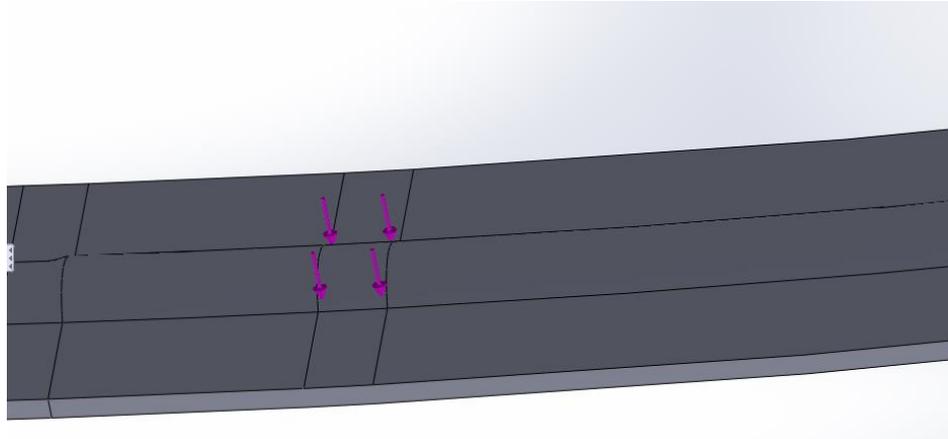


Figura 4.8 - Aplicação pontual da força no enfuste

Para as simulações não-lineares, foi utilizado um controlo de deslocamento para ser possível comparar a carga necessária a ser aplicada de forma a conseguir deslocar os enfustes com a nova nervura. Neste caso, o deslocamento a ser atingido era os 30 mm, onde no enfuste 1, aos 30mm já se tinha atingido a carga máxima que foi aplicada para deslocar o mesmo. Na figura 4.9 estão presentes as definições para as simulações não-lineares.

As simulações não lineares no domínio plástico não tem em conta o retorno elástico que se verificou, por exemplo, nos ensaios práticos realizados anteriormente. Assim, é necessário ter em conta os valores de deslocamento enquanto a carga está a ser aplicada, não sendo possível obter valores de retorno elástico e por sua vez valores de deslocamento final após o mesmo retorno.

O método iterativo utilizado nestas simulações é o método Newton-Raphson, método este onde a matriz de rigidez tangencial é formado e decomposto em cada iteração. Este método apresenta uma alta taxa de convergência e a sua taxa é quadrática.

Em termos de integração foi utilizado o método de Newmark.

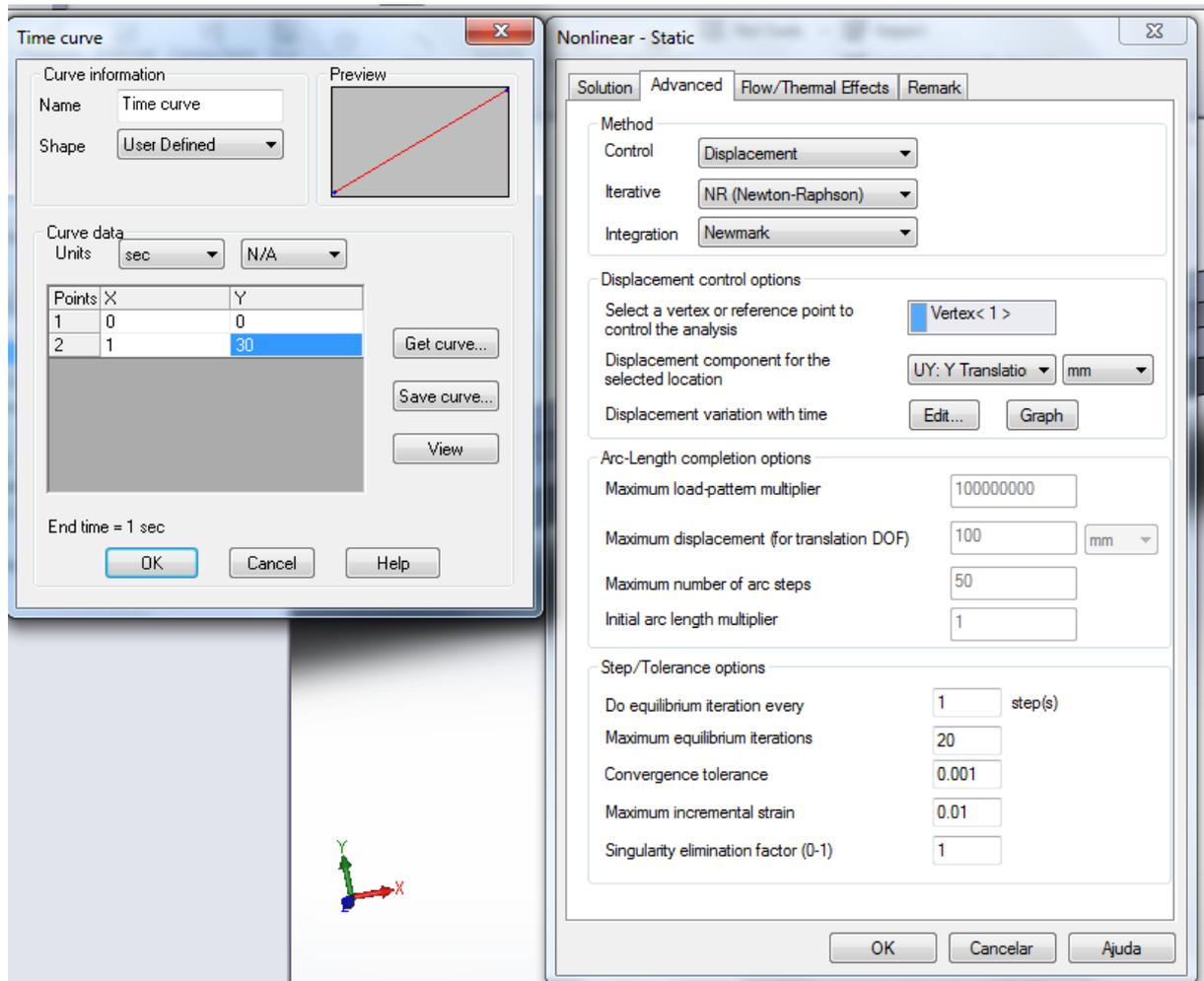


Figura 4.9 - Propriedades das análises não lineares

4.3.2 Efeito da variação da espessura do enfuste

A primeira análise efectuada foi a análise da variação de carga máxima necessária a aplicar no enfuste para diferentes espessuras, de forma a obter um deslocamento aproximado de 30 mm.

O formato do enfuste faz com que a espessura seja bastante importante para o bom funcionamento do componente. Neste caso, em termos de espessuras, primeiramente foi verificado os resultados para uma espessura de 1,3 mm, igual à do enfuste 1 que serviu de comparação. Depois foram utilizadas espessuras de 1 e 1.5.

Espessura 1,3 mm

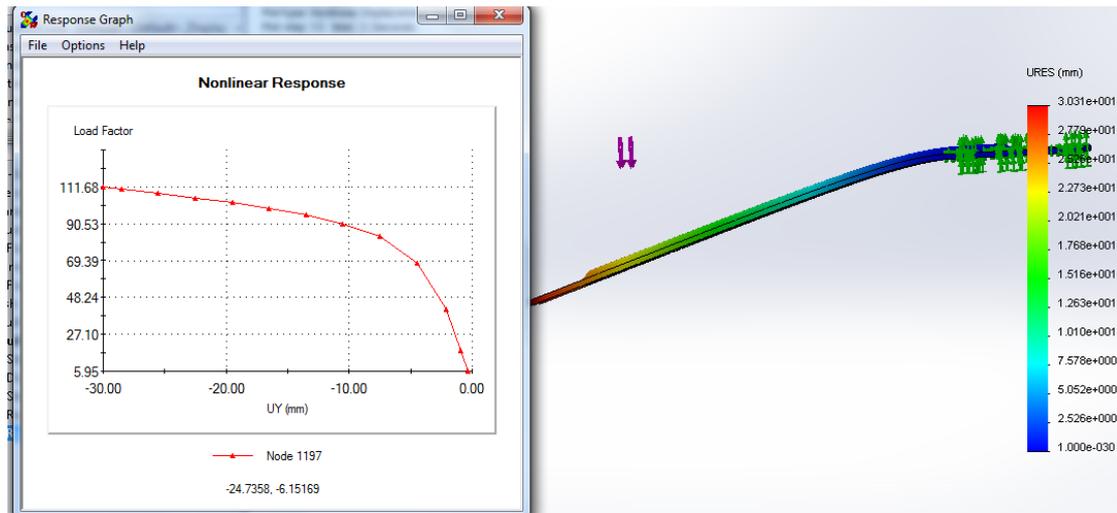


Figura 4.10 – Carga necessária para deslocar espessura de 1,3 mm com aço DP800

Neste primeiro caso, para uma espessura de enfuste de 1,3 mm, para se atingir um deslocamento de 30mm é necessário uma carga de cerca de 111 N, valor menor do que foi necessário para obter esse deslocamento no enfuste 1.

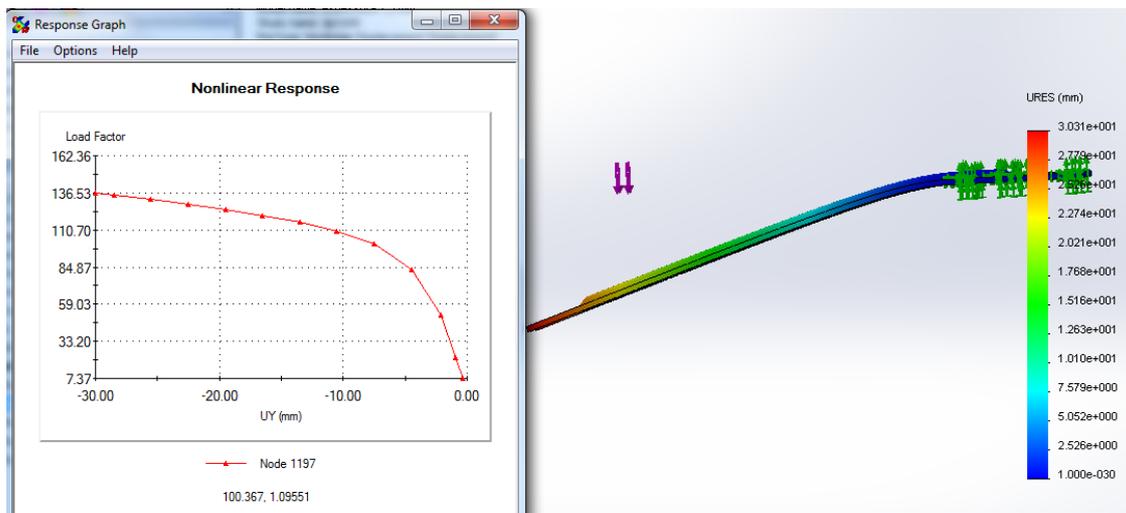


Figura 4.11 - Carga necessária para deslocar espessura de 1,3 mm com aço DP1000

Para o aço DP1000 já se verificou a necessidade de um aumento de carga para provocar um deslocamento de 30 mm, sendo necessários certa de 136 N. Este valor já ultrapassa o valor que foi necessário aplicar no ensaio experimental, mas este enfuste apresenta dimensões gerais maiores que o enfuste 1 testado anteriormente.

Espessura 1 mm

Uma vez que para uma espessura de 1,3 mm se obteve um valor de 111 N para conseguir o deslocamento pretendido, é pressuposto que para uma espessura menor este valor seja menor.

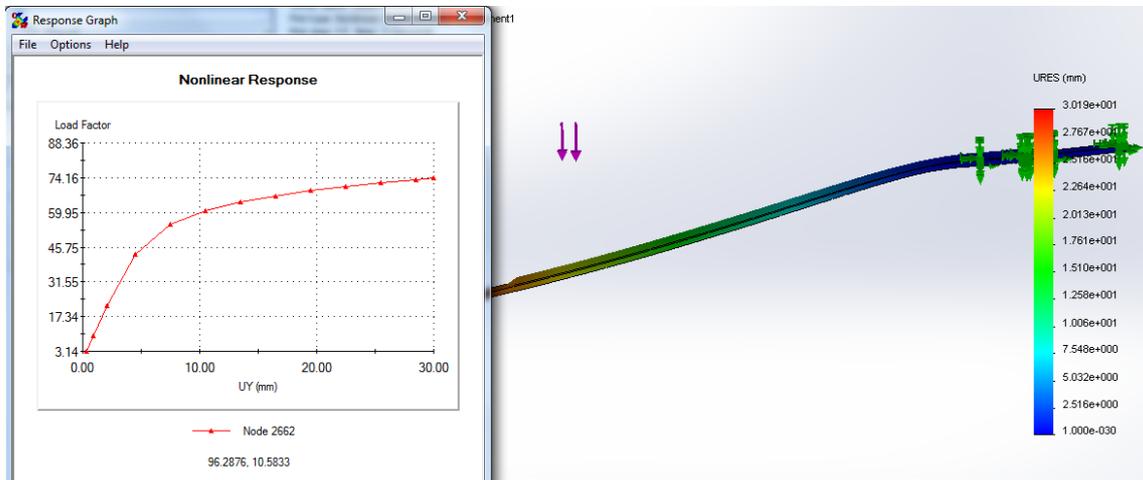


Figura 4.12 - Carga necessária para deslocar espessura de 1 mm com aço DP800

Como era esperado, para uma espessura de 1 mm apenas é necessário uma carga a rondar os 74 N para que esta obtenha um deslocamento de 30 mm quando aplicado um aço DP800.

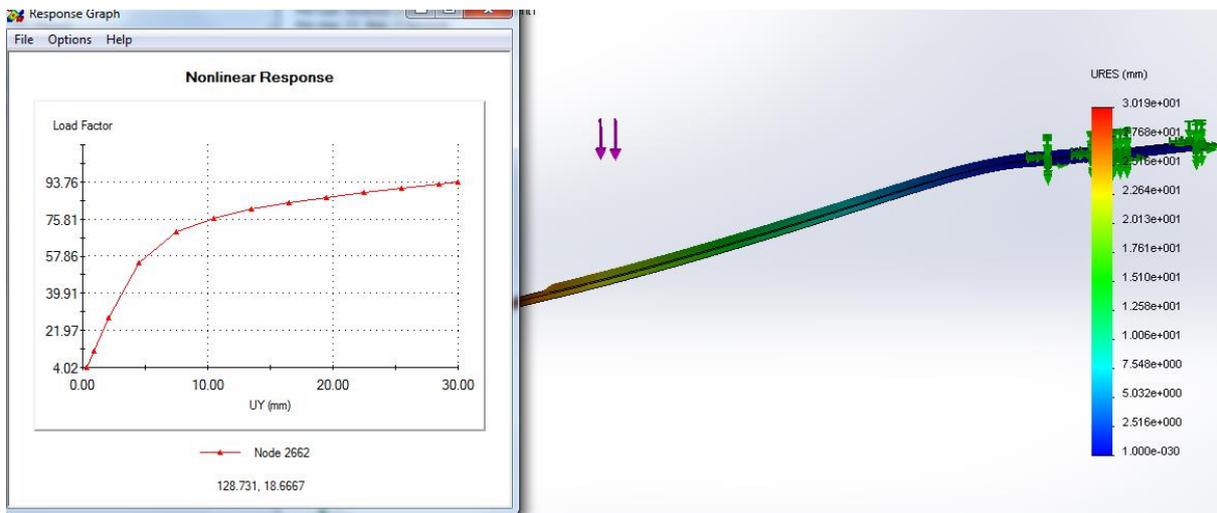


Figura 4.13 - Carga necessária para deslocar espessura de 1 mm com aço DP1000

Quanto à aplicação de um aço DP1000, existe um aumento de carga a aplicar quando comparado com o aço DP800, mas há uma expectável redução quando comparado com a carga necessária a aplicar na espessura de 1,3.

Espessura 1,5 mm

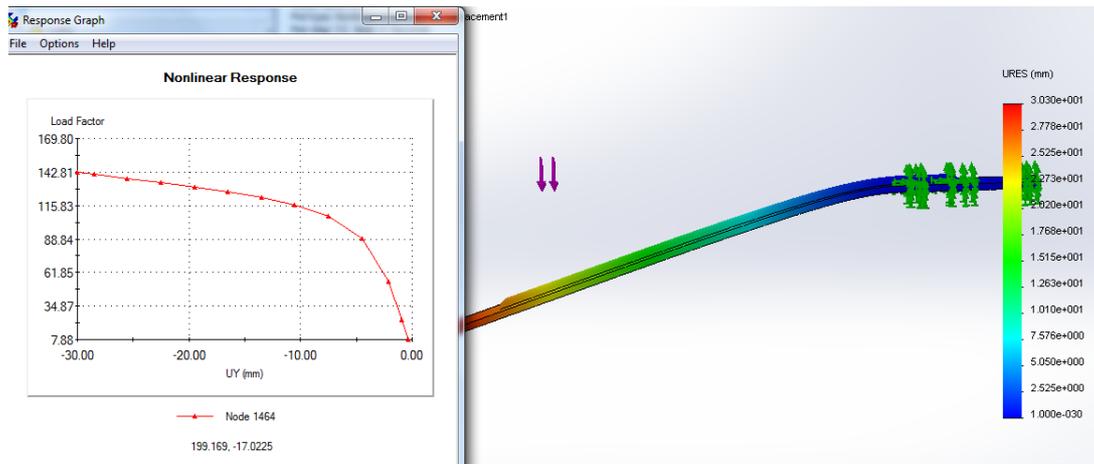


Figura 4.14 - Carga necessária para deslocar espessura de 1,5 mm com aço DP800

Para uma espessura de 1,5 mm, a carga necessária, próxima de 140 N, é superior à carga que foi necessária aplicar nos ensaios de flexão para conseguir obter um deslocamento de 30 mm no enfuste 1, mas como já referido já estamos com uma espessura superior à espessura do enfuste 1 utilizado nesses ensaios, e sendo a espessura a dimensão que mais afecta o rendimento do enfuste é normal que exista uma grande variação de carga a ser aplicada quando se altera essa dimensão.

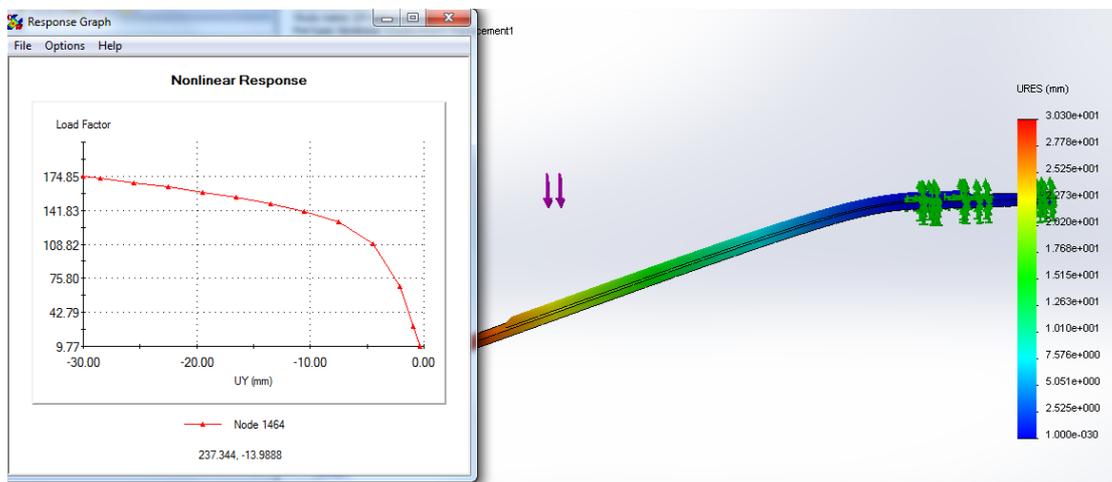


Figura 4.15 - Carga necessária para deslocar espessura de 1,5 mm com aço DP1000

Para um aço DP1000, já se ultrapassa bastante o valor de 120N de referência para se obter um deslocamento de 30 mm, sendo necessária uma carga perto dos 175 N.

A tabela seguinte mostra o resumo dos resultados obtidos para diferentes espessuras.

Tabela 4.1 - Resultados obtidos para espessuras diferentes

Espessura	Carga necessária com aço DP800	Carga necessária com aço DP1000
1 mm	74 N	93 N
1,3 mm	111 N	136 N
1,5 mm	143 N	175 N

Como era de esperar, pequenas variações de espessuras provocam grandes alterações na carga necessária a aplicar para conseguir deslocar o enfuste.

4.3.3 Efeito da variação da largura do enfuste

Esta análise passou pela análise da variação de carga necessária a aplicar no enfuste tendo em conta uma variação na sua largura.

Neste caso, em termos de larguras, primeiramente foi verificado os resultados para uma largura de 20,38 mm, largura esta que foi determinada de início quando foi feito um primeiro modelo de enfuste com a nova nervura, sendo também testado uma largura de 15,38 mm para perceber qual o impacto no enfuste. A espessura do enfuste para estes ensaios foi a espessura de 1 mm.

Largura 20,38 mm

Para esta largura, os resultados são os mesmos já apresentados quando testada a espessura de 1mm no subcapítulo anterior.

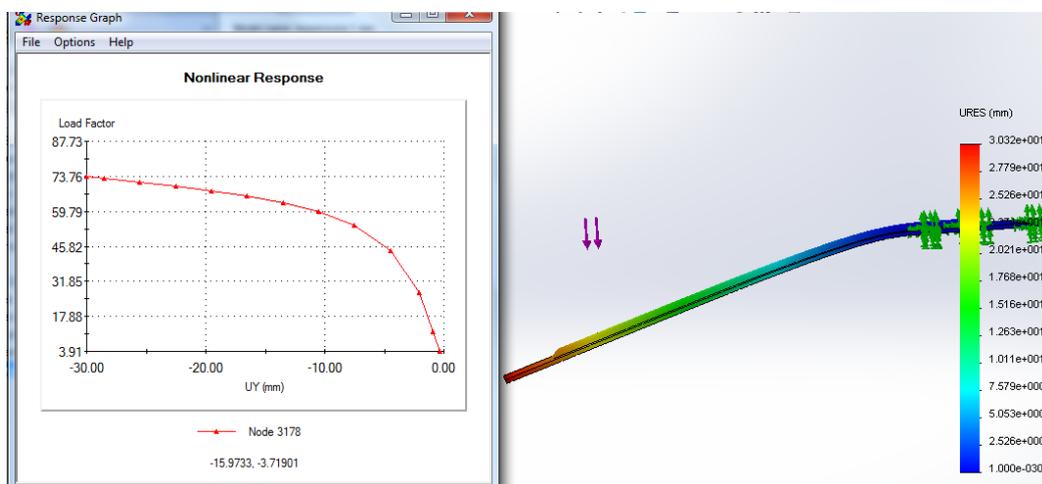


Figura 4.16 - Carga necessária para deslocar espessura de 1 mm com 20,38 mm de largura com aço DP800

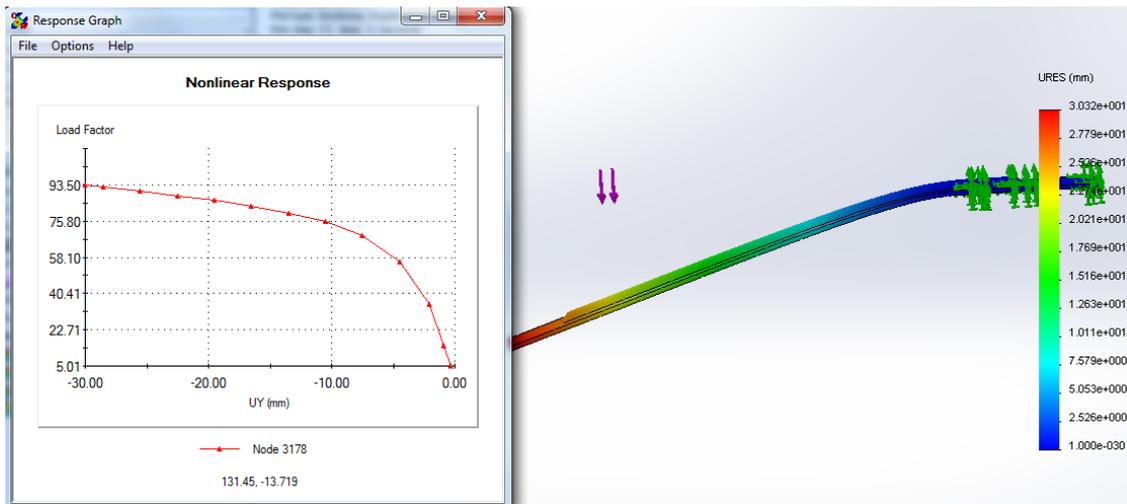


Figura 4.17 - Carga necessária para deslocar espessura de 1 mm com 20,38 mm de largura com aço DP1000

Largura 15,38 mm

Neste ensaio houve uma redução de largura de 5 mm. É esperado uma diminuição de carga necessária para deslocar o enfuste mas nunca tão relevante como na variação das espessuras.

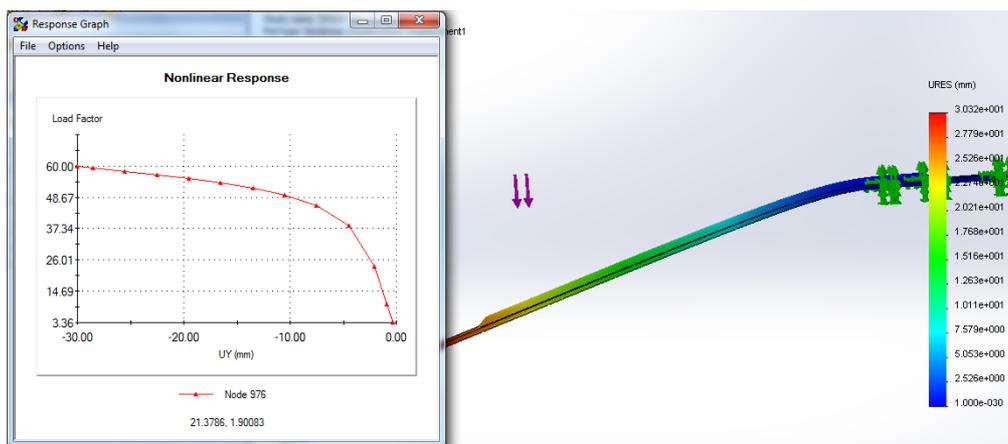


Figura 4.18 - Carga necessária para deslocar espessura de 1 mm com 15,38 mm de largura com aço DP800

Para um aço DP800 houve uma redução em cerca de 13 N para se obter um deslocamento de 30 mm. Não é uma alteração ao nível do que se sucedeu com mudanças de espessura, porque a largura não tem um impacto tão importante como a espessura neste tipo de ensaio. Contudo uma redução de 5 mm já é aproximadamente um quarto de redução na largura predefinida.

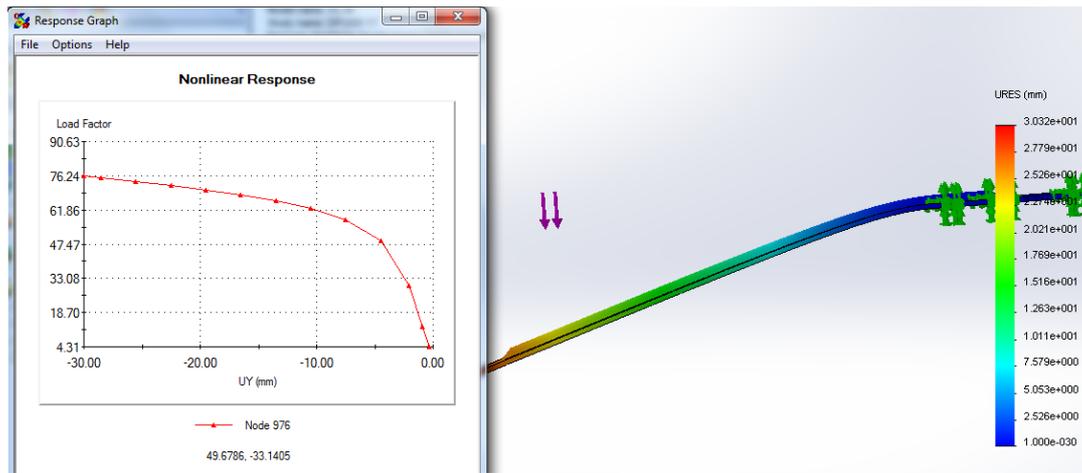


Figura 4.19 - Carga necessária para deslocar espessura de 1 mm com 15,38 mm de largura com aço DP1000

Quanto ao aço DP1000 houve também uma redução de carga necessária a aplicar quando comparada com a largura de 20,38mm, uma redução no valor de 15 N.

Desta análise pode concluir-se que variações de largura não afectam, como era esperado, o comportamento do enfuste, da mesma forma que a variação de espessura o faz.

4.3.4 Efeito da existência de nervura

Neste subcapítulo foi estudada a influência da existência da nervura no enfuste. Como método de comparação para este estudo, foram utilizados os resultados obtidos para uma espessura de 1,5 mm, onde era necessário aplicar uma carga de 143N para atingir um deslocamento de 30 mm, num aço DP800, enquanto para um aço DP1000 eram necessários 175N.

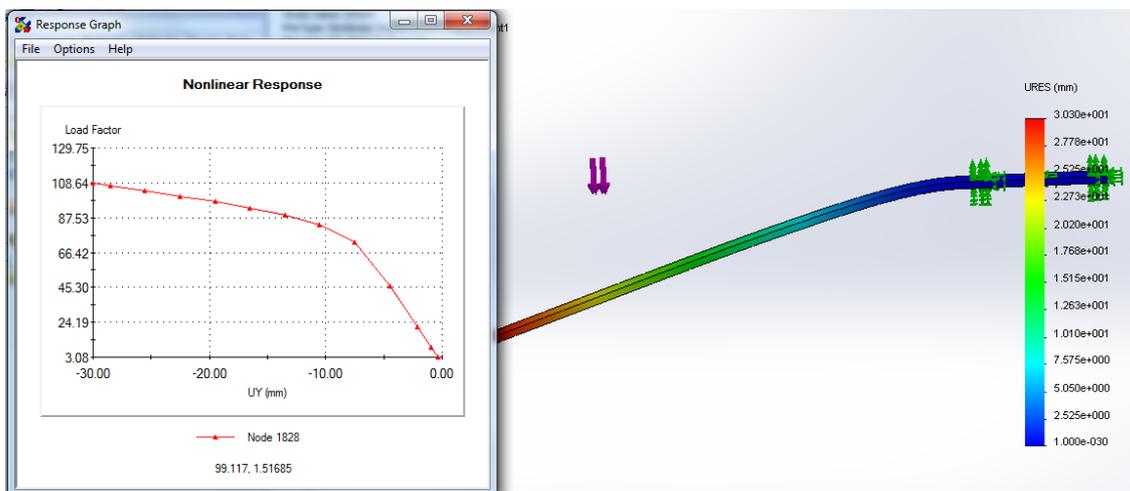


Figura 4.20 - Carga necessária para deslocar espessura de 1,5 mm sem nervura com aço DP800

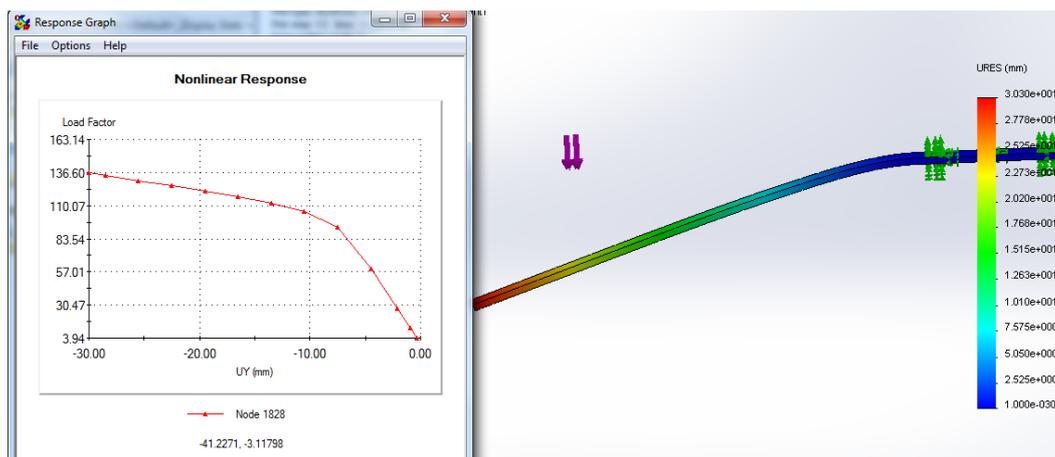


Figura 4.21 - Carga necessária para deslocar espessura de 1,5 mm sem nervura com aço DP1000

Como já foi dito anteriormente a existência de nervura tem como objectivo dar mais rigidez ao componente, e assim a inexistência dela tem grande reflexo no seu comportamento. Como é possível verificar nas figuras anteriores, o facto de não existir nervura no enfuste faz com que seja necessário usar uma carga inferior em cerca de 35 N em relação ao mesmo enfuste com nervura para um aço DP800, e cerca de 40 N inferior para um aço DP1000.

Tabela 4.2 - Resumo de resultados numéricos

Variação de geometria	Carga necessária para DP800	Carga necessária para DP1000
Espessura		
1 mm	74 N	93 N
1,3 mm	111 N	136 N
1,5 mm	143 N	175 N
Largura		
20,38 mm	74 N	93 N
15,38 mm	60 N	76 N
Nervura		
Com nervura	143 N	175 N
Sem nervura	108 N	136 N

4.4 Validação Experimental

Como já referido no capítulo anterior, a empresa em colaboração oferecia a capacidade de produzir enfuste em aços de alta resistência, neste caso o DP 800 e DP 1000, apesar de estes não possuírem curvatura e terem as dimensões de nervura já anteriormente utilizadas na simulação. Para estes ensaios a empresa produziu enfustes com uma largura de 20 mm e uma largura de 18 mm. Os desenhos técnicos enviados para a empresa para ser feito o corte laser estão presentes no Anexo A.

O objectivo para além de diferentes larguras, era obter também enfustes com diferentes espessuras para poder comprovar experimentalmente os resultados obtidos nas simulações. Contudo a empresa apenas conseguiu produzir estes enfustes com uma espessura de 1 mm.

4.4.1 Produção de protótipos de enfustes

A produção dos enfustes produzidos pela empresa partiram inicialmente de corte laser de chapas de 1 mm de espessura. Após o corte laser da chapa, estes enfustes foram sujeitos à criação da nervura. A criação da nervura é feita através de conformação. Foi utilizada uma prensa de 300 toneladas pela empresa para a produção destes protótipos de enfustes.



Figura 4.22 - Prensa utilizada para aplicação da nervura

Na figura 4.22 está presente a prensa utilizada, e como é possível ver esta é utilizada normalmente para aplicação de nervuras de grandes comprimentos, e por isso os enfustes produzidos pela empresa apresentam o seguinte formato.



Figura 4.23 - Enfuste produzido na empresa

4.4.2 Modelo numérico e simulação de enfustes produzidos

Com o objectivo de obter resultados de forma a poderem ser comparados, foram feitos modelos iguais aos enfustes produzidos pela empresa. A simulação numérica realizada nestes enfustes seguiu os mesmos passos das anteriores já apresentadas. Os resultados esperados nestas simulações devem estar próximos dos resultados obtidos para uma espessura de 1 mm com 20,38 mm de largura, pois a nervura utilizada nessas simulações é a mesma da empresa, e tanto o encastramento como a distância da força aplica ao mesmo possuem as dimensões, sendo a única diferente a pequena curvatura apresentada por esse enfuste.

Enfuste com 20 mm de largura

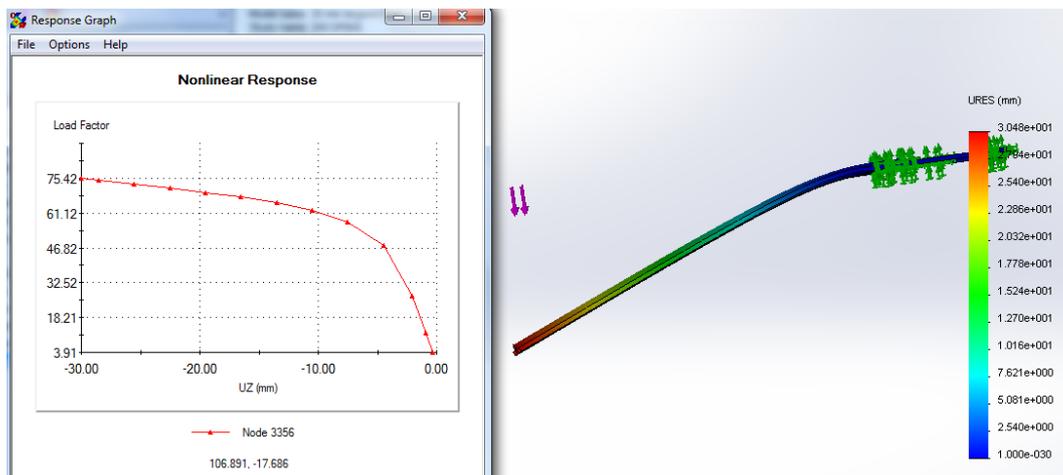


Figura 4.24 - Carga necessária para deslocar enfuste produzido na empresa com 20mm com aço DP800

Para este caso, onde a espessura do enfuste é de 1 mm a carga a aplicar para se atingir um deslocamento de 30 mm tem o valor de 75 N.

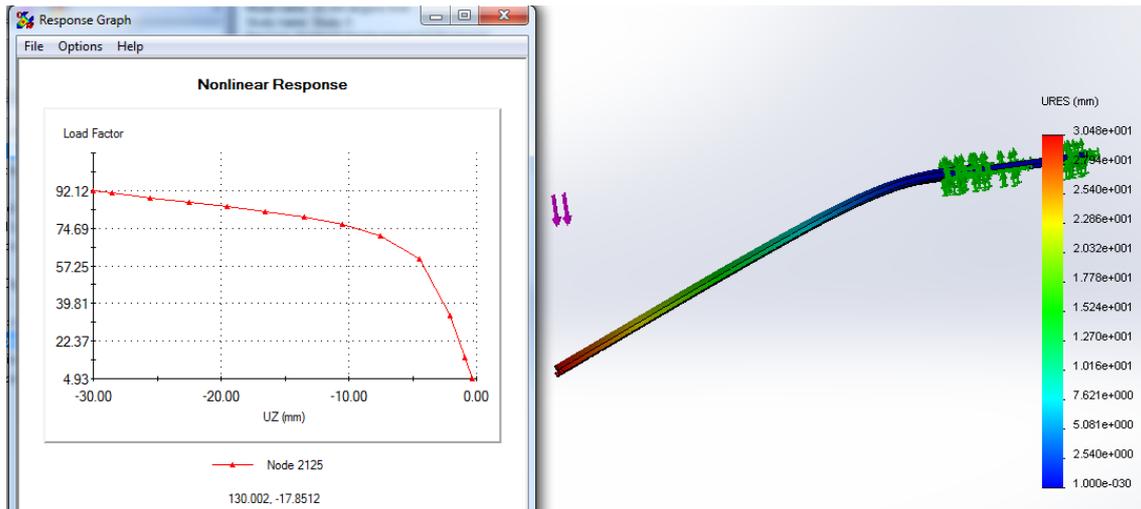


Figura 4.25 - Carga necessária para deslocar enfuste produzido na empresa com 20mm com aço DP1000

Para o aço DP1000, obteve-se um carga de 92N a aplicar no enfuste para atingir um deslocamento de 30 mm.

Enfuste com 18 mm de largura

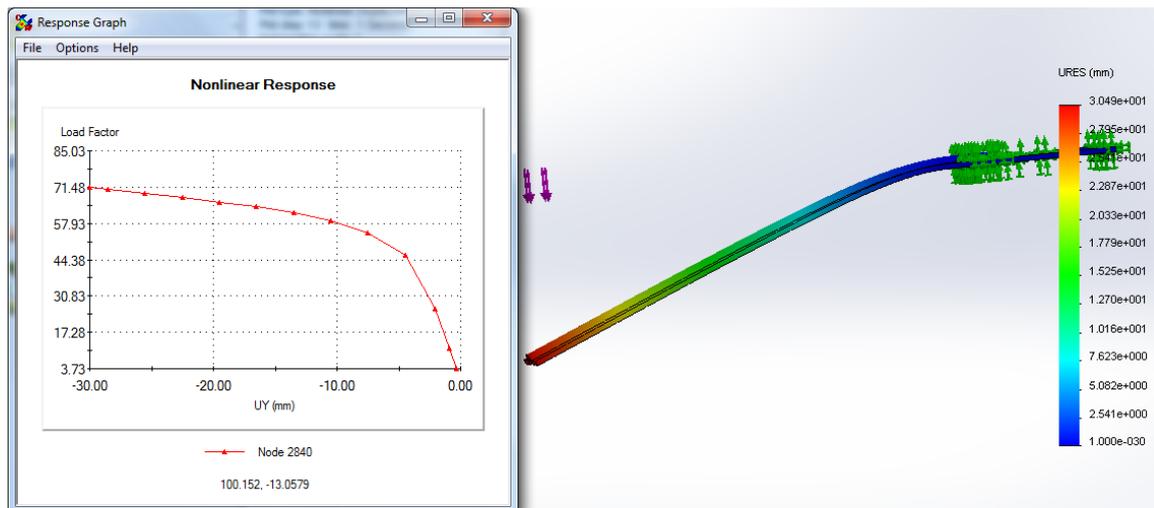


Figura 4.26 - Carga necessária para deslocar enfuste produzido na empresa com 18mm com aço DP800

Para estes caso, onde a espessura do enfuste é de 1 mm mas onde houve uma redução de 2mm de largura a carga necessária para se aplicar até atingir os 30 mm de deslocamento foi de aproximadamente 71 N.

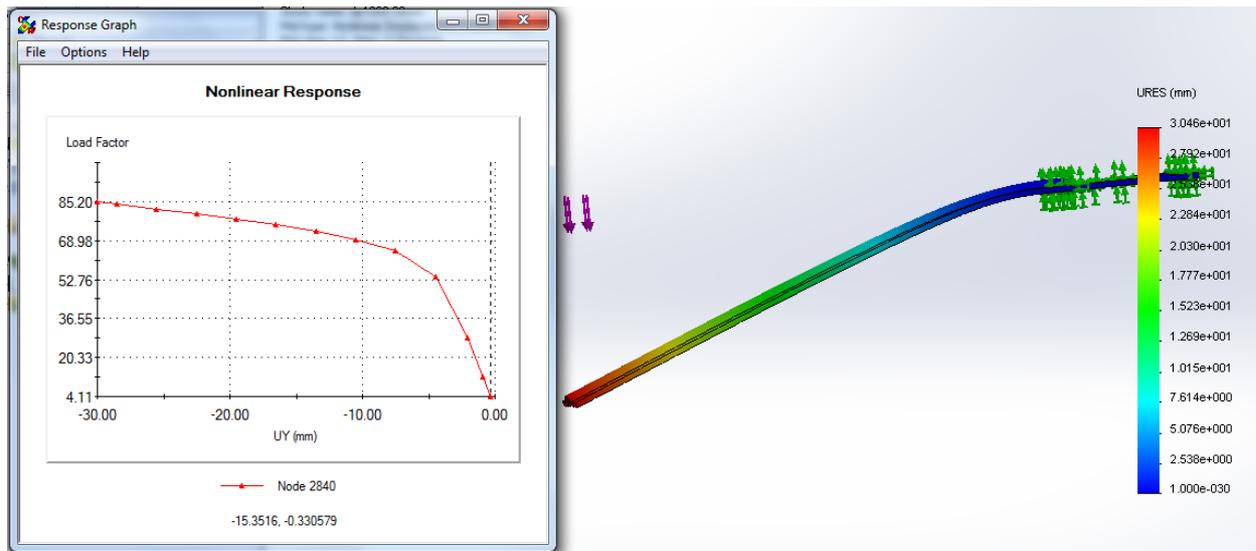


Figura 4.27 - Carga necessária para deslocar enfuste produzido na empresa com 18mm com aço DP1000

Para o aço DP1000 nota-se uma redução de carga por volta dos 7 N, passando então para valor de carga máxima de 85 N necessária a aplicar para atingir um deslocamento de 30 mm no enfuste.

4.4.3 Ensaios experimentais

Os ensaios experimentais foram novamente realizados no Laboratório de Ensaio dos Materiais. Para estes testes, e para haver sempre possibilidade de comparação, foi feito um encastramento total de 30 mm e foi aplicada uma carga a uma distância de encastramento de 80 mm.



Figura 4.28 - Ensaio prático de novo modelo

Esta carga foi aplicada até ser atingido um deslocamento de 40 mm como já se tinha realizado para os outros enfustes anteriormente testados.

Ao todo foram feitos 6 ensaios, onde 3 enfustes tinham uma largura de 18 mm e outros 3 apresentavam uma largura de 20 mm, onde uns eram aço DP800 e outros eram de aço DP1000. Em cada ensaio é dito qual o aço em questão.

Os primeiros ensaios foram realizados em enfustes com 20 mm de espessura. Segundo os resultados obtidos nas simulações numéricas é de esperar que estes enfustes não apresentem a mesma performance que o enfuste 1 testado nos ensaios práticos anteriores, onde foi necessário atingir um valor de carga de 120 N para atingir um deslocamento de 30 mm. Para este caso, nas simulações numéricas uma carga de 75 N para um aço DP800 e uma carga de 92 N foram suficientes para atingir um deslocamento de 30 mm.

Largura 20 mm

De seguida são apresentados os gráficos relativos aos ensaios realizados para estes enfustes.

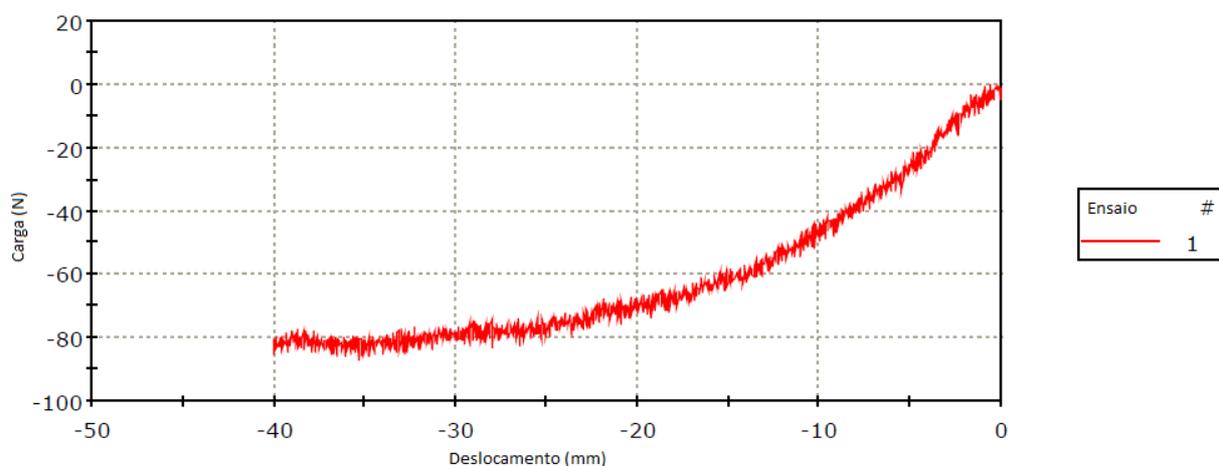


Figura 4.29 – Ensaio 1 de enfuste com 20 mm de largura

Neste primeiro ensaio, tratando-se de um aço DP1000, foi possível verificar que de facto o enfuste se deformou mais facilmente como era esperado, sendo que com uma carga máxima de 80 N foi possível atingir os 40 mm de deslocamento. Em termo de deslocamento final, após retorno elástico, estes enfustes tiveram um retorno de 25 mm, ficando com um deslocamento de 15 mm. Em comparação com a simulação numérica, eram necessários cerca de 92 N para atingir os 30 mm de deslocamento mas um valor de 80 N foi suficiente.

Em termos de rigidez este enfuste apresentou um valor de 5,32 N/mm.

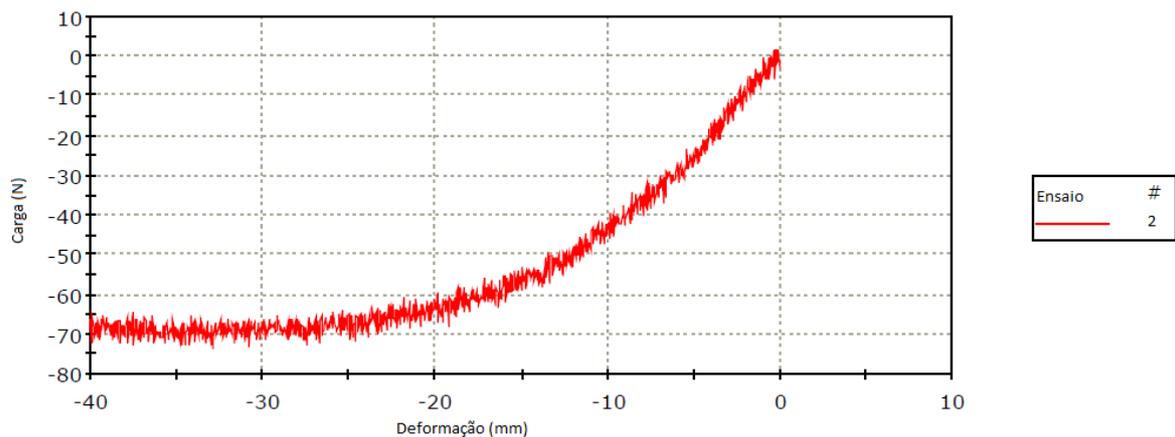


Figura 4.30 - Ensaio 2 de enfuste com 20 mm

O ensaio 2, com um aço DP800, apresentou a necessidade de aplicar uma carga máxima de 70 N para conseguir obter um deslocamento de 40 mm, sendo que o deslocamento final obtido neste ensaio foi de 18 mm, tendo havido um retorno de 22 mm. Segundo as simulações uma carga de 75 N faria com que fosse possível obter um deslocamento de 30 mm, e experimentalmente, foi necessária uma carga de 70 N, uma diferença de 5 N para o experimental. Em termos de rigidez neste ensaio foram obtidos valores de 4,7 N/mm.

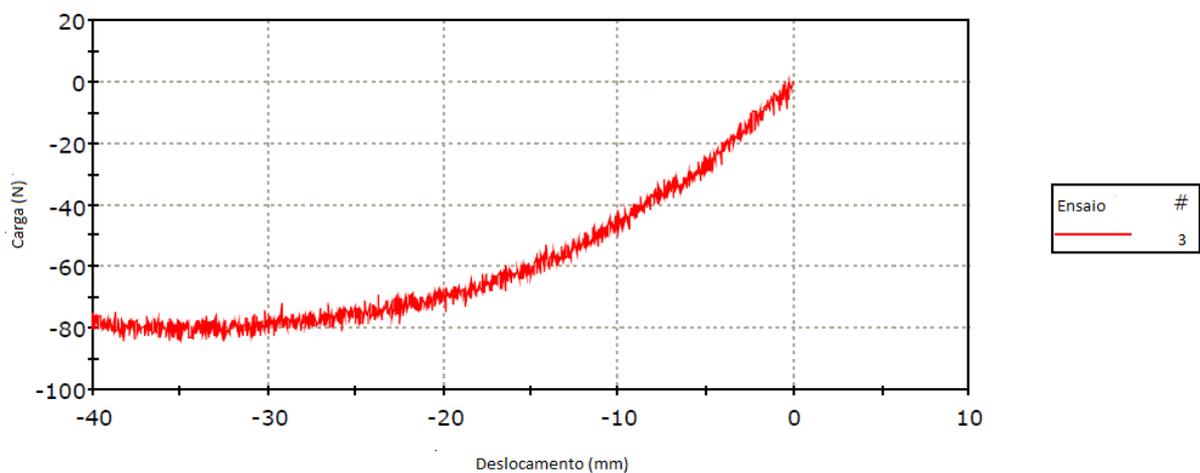


Figura 4.31 - Ensaio 3 de enfuste com 20 mm

Neste último ensaio obteve-se valores praticamente iguais ao ensaio 1, onde foi necessária uma carga de 80N para atingir os 40 mm de deslocamento e foi possível obter um deslocamento final de 15 mm, para um aço DP1000.

Assim sendo, o valor de rigidez do enfuste para este ensaio também este próximo do ensaio 1, tendo apresentado um valor de 5,38 N/mm.

Largura 18 mm

De seguida são apresentados os gráficos relativos aos ensaios realizados para estes enfustes.

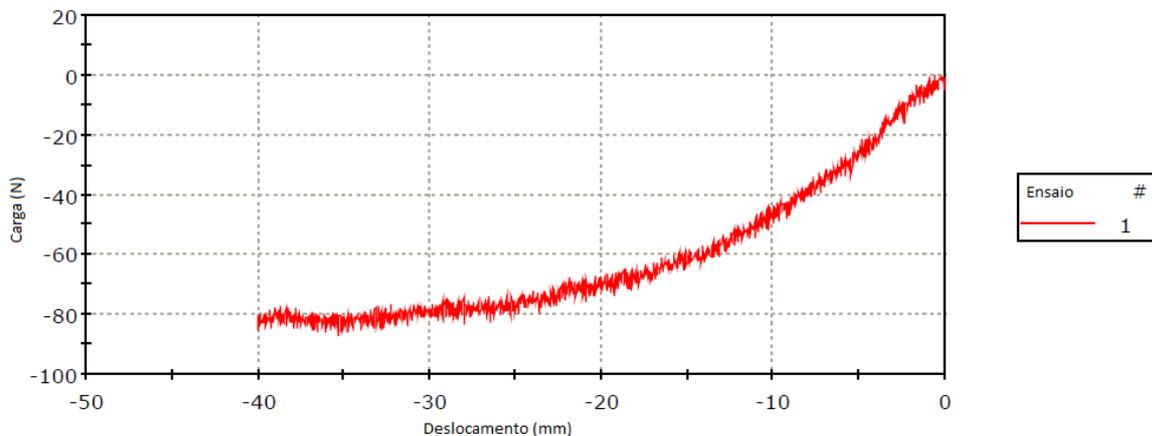


Figura 4.32 - Ensaio 1 de enfuste com 18 mm

Neste primeiro ensaio, com um aço DP1000, foi possível verificar que apesar de haver uma ligeira redução de largura os valores mantiveram-se de acordo com os ensaios anteriores. Em termo de deslocamento, estes enfustes tiveram um retorno de 24 mm, ficando com um deslocamento final de 16 mm. Através da simulação numérica, era espectável uma carga de 85 N atingir um deslocamento de 30 mm, sendo que o ensaio experimental ficou situado numa carga de 80 N.

Em termos de rigidez este ensaio apresentou um valor de 5,8 N/mm, valor perto dos encontrados até agora para aços DP1000.

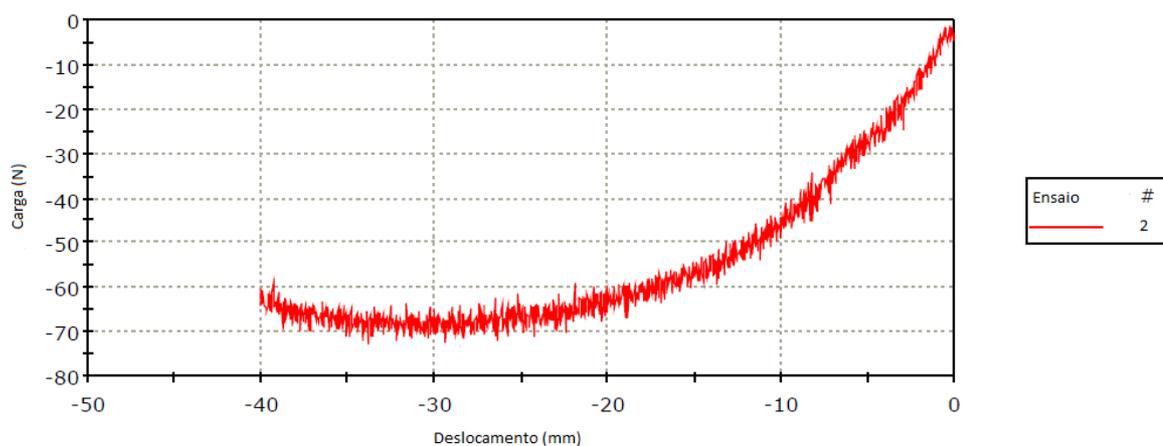


Figura 4.33 – Ensaio 2 de enfuste com 18 mm

Neste segundo ensaio, tratando-se de um aço DP800, os valores de carga rondaram os 70 N novamente para conseguir atingir um deslocamento de 40 mm, havendo depois um retorno de 22,2 mm tendo-se obtido um deslocamento final de 17,8 mm.

O valor de rigidez apresentado neste segundo ensaio com uma largura de 18 mm é 4,58 N/mm. É um valor que se apresenta próximo do ensaio com aço DP800 para uma largura de 20 mm.

Na figura seguinte é apresentado o ensaio 3 para uma largura de 18 mm.

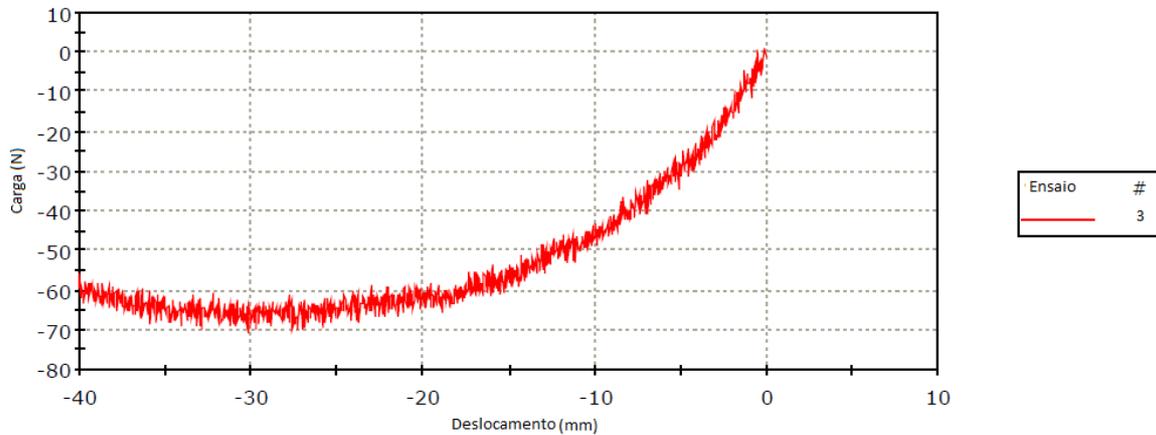


Figura 4.34 - Ensaio 3 de enfuste com 18 mm

Por último, também tratando-se de um aço DP800, neste terceiro ensaio obtivemos uns valores idênticos ao ensaio anterior, com a carga máxima aplicada foi entre os 65 e os 70 N onde o deslocamento final ficou nos 18,2 mm. Em termos de rigidez foi obtido um valor de 4,63 N/mm.

Para estes dois últimos ensaios, a carga aplicada para serem atingidos os 30 mm de deslocamento ficou perto dos 70 N, valor próximos dos 71 N que resultaram da simulação numérica.

Depois destes 6 ensaios realizados foi possível verificar que como foi previsto nas simulações numéricas estes enfustes produzidos na empresa não conseguiriam manter uma performance igual às obtidas nos ensaios iniciais onde o enfuste 1 necessitou de uma carga máxima aplicada de 120 N para atingir um deslocamento de 40 mm final. Na figura 4.35, pode ver-se em detalhe as diferenças entre o enfuste 1 e os protótipos de enfustes testados.

Tabela 4.3 - Comparação de resultados

	Carga necessária na simulação numérica	Carga necessária no ensaio experimental
Largura 20 mm		
DP800	75 N	70 N
DP1000	92 N	80 N
Largura 18 mm		
DP800	71 N	≈65/70
DP1000	85 N	80 N

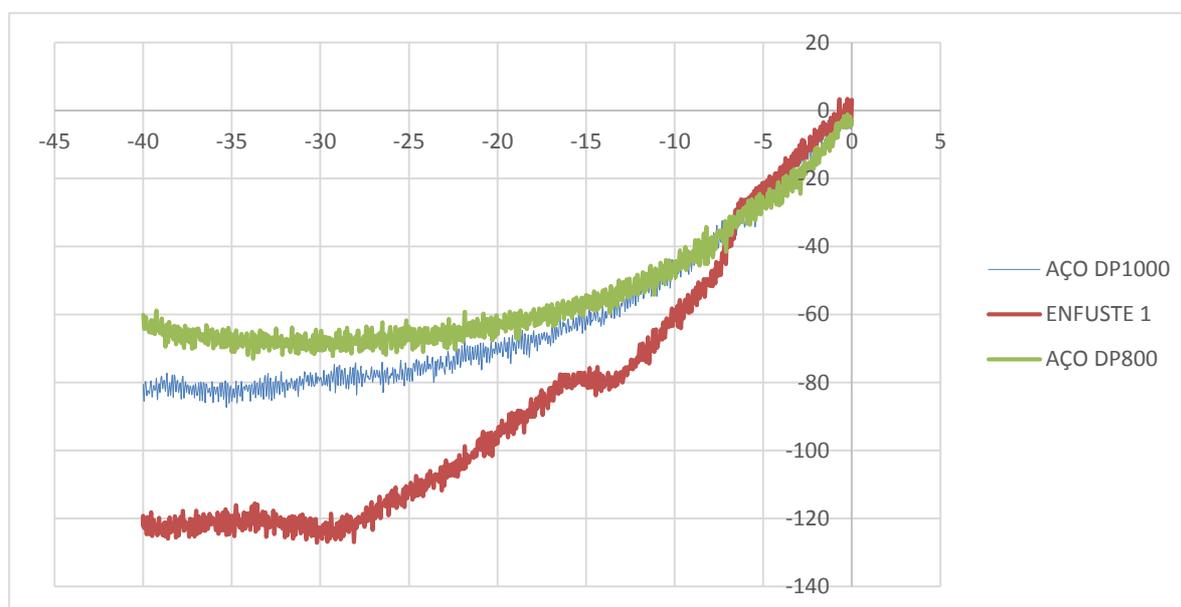


Figura 4.35 – Comparação dos ensaios experimentais

Pequenas diferenças de cargas entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas podem ser explicadas pelo facto do modelo numérico, apresentando a nervura dos enfustes, ser uma aproximação à realidade dos mesmos. Notou-se uma maior diferença no aço DP1000, que pode advir da curva na zona plástica inserida no software não estar totalmente bem definida.

4.4.4 Determinação de espessura mínima necessária

O desempenho dos enfustes neste tipo de ensaios, assim como na sua aplicação no calçado, faz com que a espessura seja a sua dimensão mais importante para o seu desempenho. Como foi possível verificar através dos últimos ensaios experimentais realizados, o protótipo

de enfuste fabricado não conseguiu manter a mesma performance que o enfuste 1 testado inicialmente.

Assim, fazendo algumas considerações razoáveis pode ser possível chegar a uma espessura mínima necessária a ser utilizada no protótipo de enfuste, para este caso específico em aço DP1000, de forma a ter o mesmo rendimento que o enfuste 1.

Primeiramente, e conhecendo já anteriormente que a dureza do enfuste 1 é de 52,8 HRC, e sabendo também que a dureza do aço DP1000 utilizado é de 32 HRC, pode ser feita uma razão entre ambas as durezas dos aços, obtendo então uma razão de 1,65, sendo razoável considerar que:

$$\sigma_{ced_{enfuste1}} = 1,65\sigma_{ced_{DP1000}}$$

Desta igualdade surge:

$$\frac{M_f * y_1}{I_1} = \frac{M_f * y_2}{I_2}$$

Aqui, em termos de momento de inércia, é considerado apenas um simples rectângulo, ignorando a presença de nervura presente em ambos os enfustes testados, sendo que b será a largura do enfuste, e h será a espessura do enfuste.

$$\frac{M_f * \frac{h_1}{2}}{\frac{b_1 h_1^3}{12}} = \frac{M_f * \frac{h_{DP1000}}{2}}{\frac{b_{DP1000} h_{DP1000}^3}{12}}$$

Onde:

$$b_1 - 12,7 \text{ mm}$$

$$h_1 - 1,3 \text{ mm}$$

$$b_{DP1000} - 20 \text{ mm}$$

Onde h_{DP1000} será a incógnita a retirar.

Através dos cálculos, presentes no Anexo II, foi possível chegar a um valor de

$$h_{DP1000} \approx 1,3 \text{ mm},$$

sendo que a largura do protótipo do enfuste em aço DP1000 apresenta uma largura bastante maior que a largura presente no enfuste 1, apresentando assim um maior volume de enfuste.

Estes resultados servem para ter uma ideia da espessura necessária para conseguir um comportamento semelhante ao enfuste 1, mas sem esquecer o facto de que foi ignorado nestes cálculos a presença de nervura em ambos os enfustes.

4.4.5 Apresentação de enfuste modelo

Após o estudo das várias dimensões do enfuste, e a resposta do mesmo a várias alterações das dimensões foi possível concluir que com a nervura possível de fabricar na empresa em colaboração era necessário apresentar uma espessura mínima de 1,5 mm para que, usando ambos os aços, fosse possível obter uma resposta desse mesmo enfuste semelhante à resposta obtida nos ensaios práticos iniciais do enfuste 1. Com o aço DP1000 foi possível através das simulações, e também de cálculos efectuados anteriormente, perceber que uma espessura de 1,3 mm já era possível atingir uma performance idêntica ao enfuste 1, mas os enfustes simulados apresentavam uma maior dimensão geral.

Assim, foi necessário tentar encontrar uma solução que permitisse diminuir ou pelo menos manter a espessura do enfuste 1 inicialmente testado, que apresentava 1,3 mm de espessura, assim como as restantes dimensões de atravacamento.

Como já foi feito um estudo das respostas às variações de espessura, largura e presença de nervura, para encontrar um modelo ideal que consiga ter o mesmo desempenho foi necessário recorrer a alterações na nervura e tentar perceber se estas alterações tem um impacto suficiente para se conseguir uma geometria ideal.

Assim como alternativa foi testado um aumento de profundidade da nervura combinado com um aumento na largura da nervura para perceber o seu efeito. Este aumento da profundidade de nervura deve conseguir acrescentar uma resistência importante ao enfuste pois é uma medida que também tem impacto para um deslocamento em ensaios de flexão. Várias soluções foram testadas com o intuito de encontrar a melhor solução através da nervura de forma a obtermos um enfuste que consiga responder de forma equivalente ao enfuste 1 testado no capítulo 3.

Após estas tentativas foi encontrada uma solução que apresenta as seguintes medidas (as cotas de atravacamento são as mesmas que o enfuste 1 de forma a evitar um aumento de material utilizado no seu fabrico):

- Comprimento total: 119 mm
- Largura total: 12,7 mm

- Espessura: 1,3 mm
- Altura do arco: 4 mm

Quanto à nervura do enfuste, esta possui as seguintes medidas:

- Largura: 6,9 mm
- Comprimento: 90 mm
- Profundidade: 2,2 mm

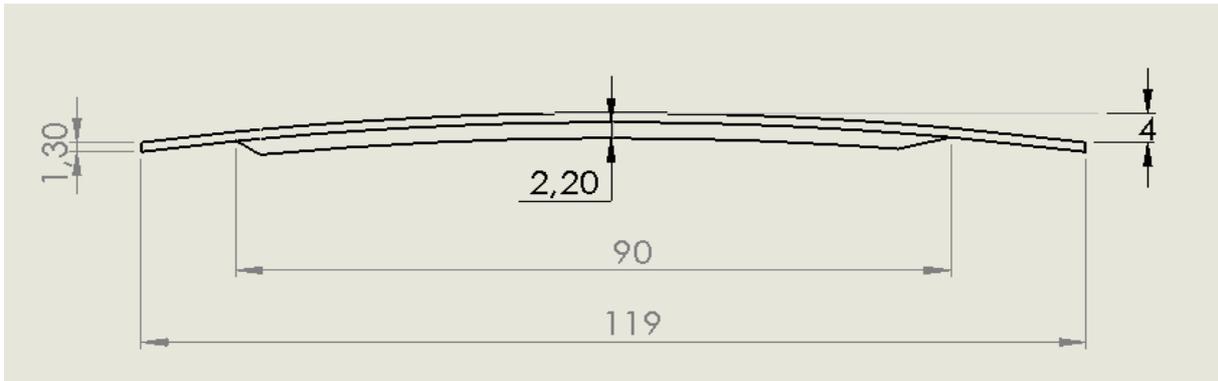


Figura 4.36 – Dimensões gerais de enfuste modelo

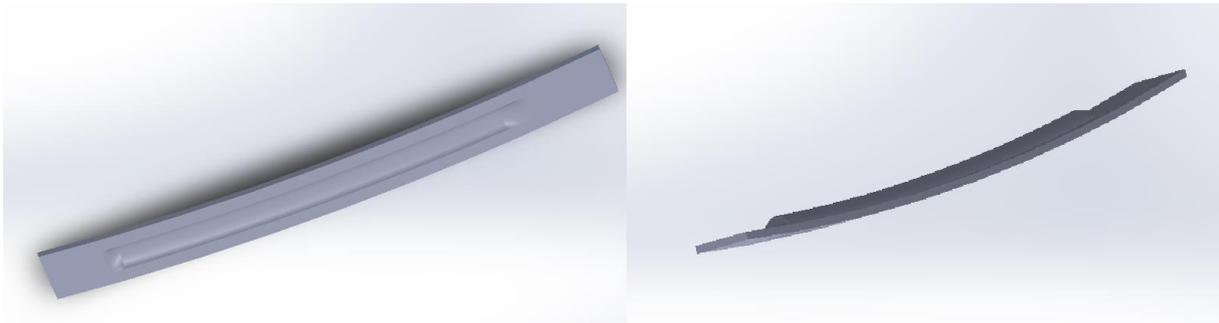


Figura 4.37 – Enfuste modelo

Foi realizada uma simulação numérica não-linear no mesmo sentido das anteriores, de forma a perceber a carga necessária a atingir para se conseguir atingir um deslocamento de 30 mm.

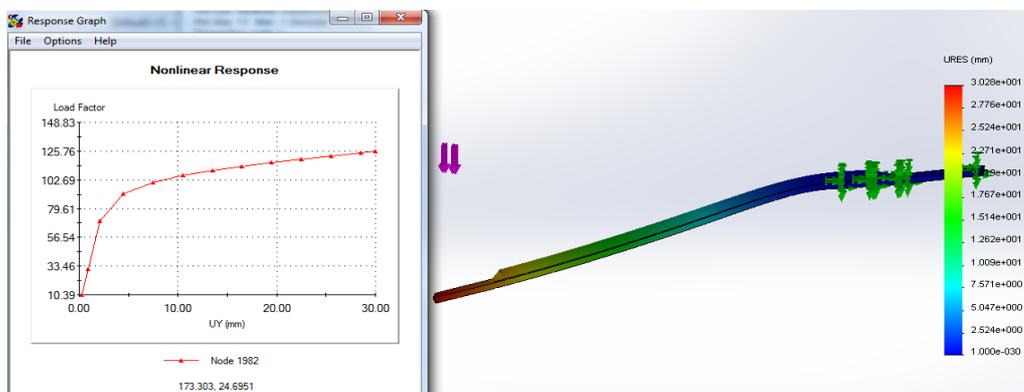


Figura 4.38 - Carga necessária a aplicar no enfuste modelo para um deslocamento de 30mm com aço DP800

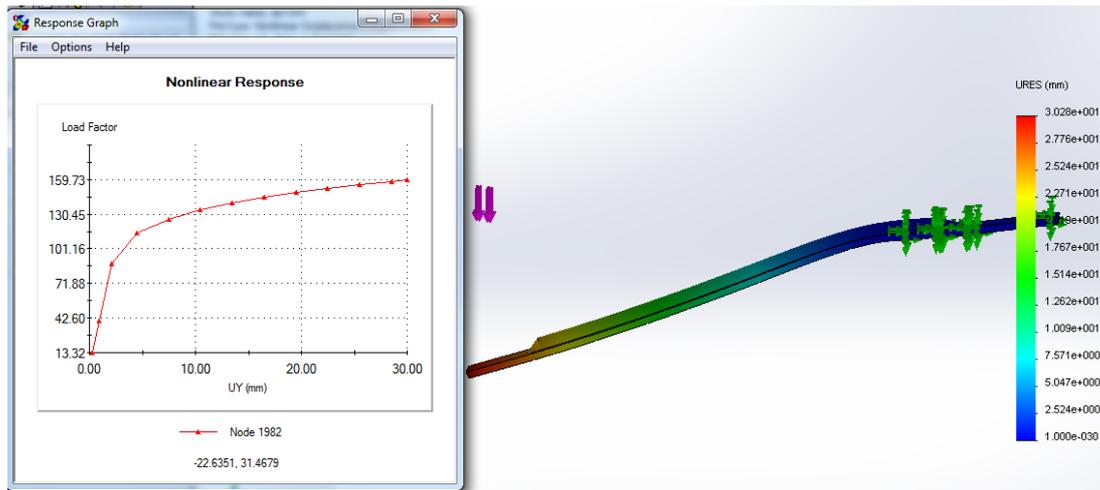


Figura 4.39 - Carga necessária a aplicar no enfuste modelo para um deslocamento de 30mm com aço DP1000

Como é possível verificar, para um aço DP800 a carga a aplicar já é superior aos 120 N aplicados no enfuste 1. Para um aço DP1000, já existe uma grande margem em termos de carga máxima aplicada para se atingir o deslocamento de 30 mm, o que poderia levar a uma redução de altura/largura da nervura. Contudo, aqui pretendeu-se obter uma geometria que segundo as simulações numéricas permitisse obter um comportamento semelhante destes dois aços de alta resistência ao enfuste 1 apresentado no capítulo 3, tendo sido dada uma margem de erro nas simulações numéricas visto que, as que foram comparadas com ensaios experimentais apresentavam, segundo as simulações, mais carga necessária do que foi necessário nos ensaios experimentais. Em anexo, Anexo III, segue o desenho técnico deste modelo de enfuste.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O sector do calçado, com a importância actual no mercado nacional necessita de uma constante actualização e desenvolvimento para permitir que se mantenha sempre no topo do contexto empresarial.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação assenta na realização de ensaios experimentais que permitiram entender o comportamento dos enfustes actualmente no mercado, assim como a aplicação de novos materiais e respectivas respostas. Incidiu também na simulação numérica não linear no domínio plástico com o intuito de perceber quais as alterações que apresentam maior impacto na capacidade que o componente apresenta para responder a cargas sujeitas.

O uso de aços de alta resistência apresentam características que permitem a sua utilização neste tipo de componentes sem a necessidade de recorrer a tratamentos térmicos com o intuito de melhorarem aços e ser utilizados para este componente, assim como apresenta uma boa conformabilidade, é reciclável e em termos de preço consegue ser uma opção viável. Foi possível perceber que os aços actualmente utilizados neste componente conseguem atingir uma grande resistência e rigidez devido principalmente aos tratamentos térmicos a que são sujeitos.

A impossibilidade de consulta de normalização ou a realização de ensaios normalizados não permitiu uma melhor análise do tipo de comportamento específico necessário para este componente em estudo.

Consoante os ensaios realizados, foi possível obter uma geometria final que permite com aços DP800 e DP1000, segundo as simulações numéricas, apresentar um comportamento semelhante ao enfuste 1 que serviu de comparação.

5.2 Trabalho futuro

Em termos de trabalho futuro com relacionamento directo a esta dissertação, era importante a validação experimental do enfuste final apresentado, para verificar se as alterações realizadas apresentam o mesmo impacto experimentalmente.

Contudo, uma possível aquisição de normas era bastante importante para uma melhor validação deste projecto, pois haveria com certeza outros aspectos a ter em conta para o bom funcionamento deste componente.

Tanto em termos de rigidez como em termos, por exemplo, de fadiga, era importante a existência de ensaios experimentais e valores concretos de forma a ser possível um melhor estudo e por sua vez uma solução mais correcta poderia ser trabalhada e apresentada, no sentido de apresentar valores que estão dentro da normalização para esse componente.

BIBLIOGRAFIA

APICCAPS, “Calçado, Componentes e Artigos de Pele – Monografia Estatística 2014”,
Porto, 2014

CONG, Y., LEE, W., ZHANG, M., “Regional plantar foot pressure distributions on high-
heeled shoes-shank curve effects”, 2010

COSTA, S., “Desenvolvimento de componentes para calçado de segurança”, 2009

GUEDES, A., Apontamentos teóricos da Unidade Curricular Tratamentos Térmicos,
Universidade do Minho, 2013

HADLEY, B. P., JOYCE, T., “Shank support and protector for boots and shoes”, United
States Patents, 1880

LINHARES, C., “Utilização e/ou desenvolvimento de modelos numéricos destinados ao
estudo do comportamento dinâmico de estruturas mecânicas de transformadores
de potencia quando sujeitos a curto-circuito”, 2013

MELCHIONNA, F. A., “Shoe shank”, United States Patents 1942

MOURA, C., “Mecânica dos Materiais – 3ª Edição”, - 1998

SILVA, M., “Estudo de novas aplicações da fibra de carbono nos materiais de construção”,
2007

Site da empresa DiGiulio’s. Acedido a 18 de Março de 2015,
<http://www.digiuliosonline.com/>

Site da empresa Printart. Acedido a 18 de Março de 2015, [http://www.printart.pt/enfustes-
de-plastico/](http://www.printart.pt/enfustes-de-plastico/)

Site da empresa TIMBERLAND. Acedido a 12 de Março de 2015,

<http://www.timberland.com>

Site da empresa TRANSMAPPLASTICOS. Acedido a 18 de Março de 2015,

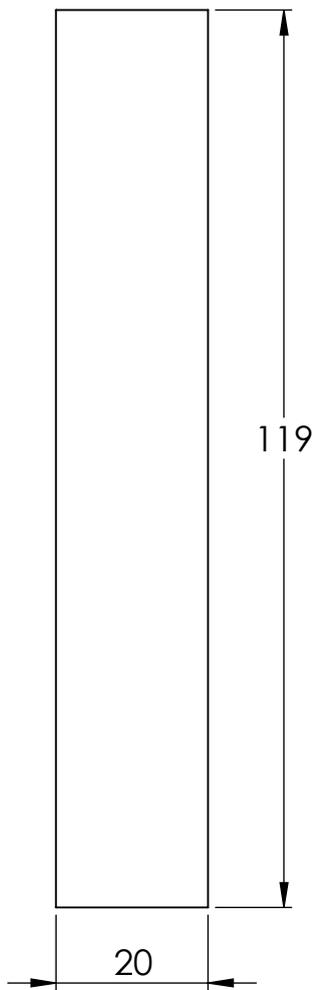
<http://www.transmapplasticos.com>

SMITH, W., “Principios de Ciência e Engenharia dos Materiais”, 1998

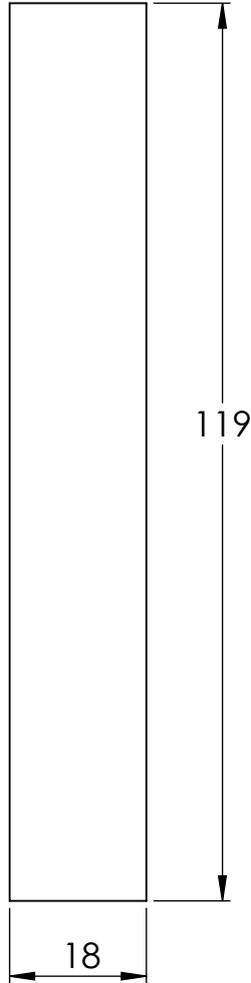
TOSCHI, M. R., “Advanced torque stability shoe shank”, United States Patents 1998

VAN VLACK, L., “Principios de ciência dos materiais”, 1970

**ANEXO I – DESENHOS TÉCNICOS DE PROTÓTIPOS DE
ENFUSTE**



	DATA	NOME	UNIVERSIDADE DO MINHO DEP. ENGENHARIA MECÂNICA DISSERTAÇÃO											
DESENHOU		Luís Félix												
VERIFICOU														
APROVOU														
ESCALA	DESIGNAÇÃO:		20mm	DESENHO N.º										
1:1				1										
TOLERANCIA														
	MATERIAL:		WEIGHT:	<table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>										
				SUBSTITUI:										
				SUBSTITUIDO POR:										



	DATA	NOME	UNIVERSIDADE DO MINHO DEP. ENGENHARIA MECÂNICA Dissertação	 										
DESENHOU		Luís Félix												
VERIFICOU														
APROVOU														
ESCALA	DESIGNAÇÃO:			DESENHO N.º										
1:1	18mm			2										
TOLERANCIA														
	MATERIAL:	WEIGHT:		<table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>										
				SUBSTITUI:										
				SUBSTITUIDO POR:										

ANEXO II – CÁLCULOS AUXILIARES

$$\sigma_{ced_{enfuste1}} = 1,65\sigma_{ced_{DP1000}}$$

Desta igualdade surge:

$$\frac{M_f * y_1}{I_1} = 1,65 * \frac{M_f * y_2}{I_2}$$

Aqui, é considerado que em termos de momento de inércia, é considerado apenas um simples retângulo, ignorando a presença de nervura presente em ambos os enfustes testados, sendo que b será a largura do enfuste, e h será a espessura do enfuste.

$$\frac{M_f * \frac{h_1}{2}}{\frac{b_1 * h_1^3}{12}} = 1,65 * \frac{M_f * \frac{h_{DP1000}}{2}}{\frac{b_{DP1000} * h_{DP1000}^3}{12}}$$

Onde:

$$b_1 - 12,7 \text{ mm}$$

$$h_1 - 1,3 \text{ mm}$$

$$b_{DP1000} - 20 \text{ mm}$$

Onde h_{DP1000} será a incógnita a retirar.

$$\frac{\frac{h_1}{2}}{\frac{12,7 * 1,3^3}{12}} = 1,65 * \frac{\frac{h_{DP1000}}{2}}{\frac{20 * h_{DP1000}^3}{12}}$$

$$\frac{0,65}{2,325} = 1,65 * \frac{\frac{h_{DP1000}}{2}}{\frac{20 * h_{DP1000}^3}{12}}$$

$$\frac{0,28}{1,65} = \frac{\frac{h_{DP1000}}{2}}{\frac{20 * h_{DP1000}^3}{12}}$$

$$\frac{0,28}{1,65} = \frac{\frac{h_{DP1000}}{2}}{\frac{20 * h_{DP1000}^3}{12}}$$

$$0.17 = \frac{12 * h_{DP1000}}{40 * h_{DP1000}^3}$$

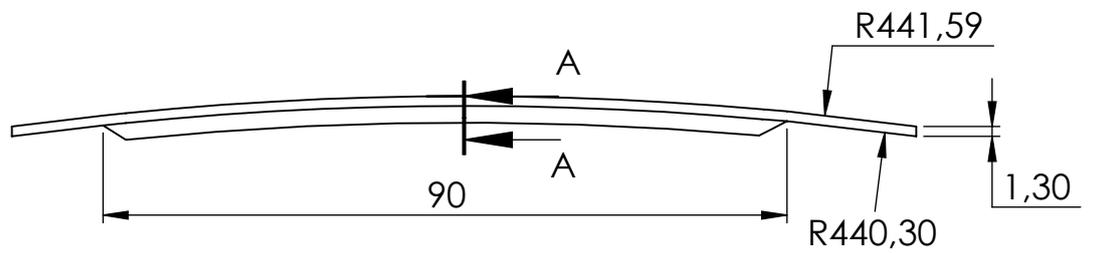
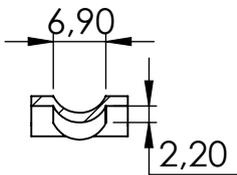
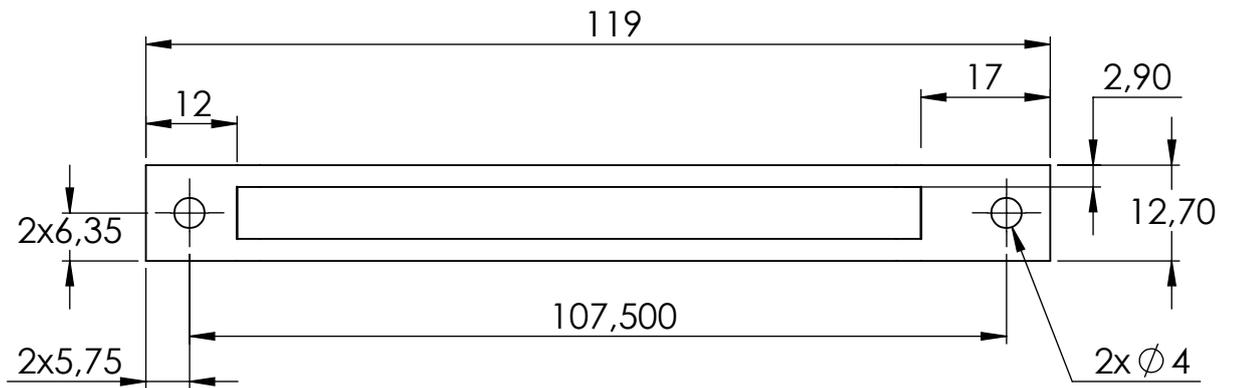
$$6,8 * h_{DP1000}^3 = 12 * h_{DP1000}$$

$$\frac{6,8 * h_{DP1000}^3}{h_{DP1000}} = 12$$

$$h_{DP1000}^2 = \frac{12}{6.8}$$

$$h_{DP1000} \approx 1.3$$

ANEXO III – DESENHO TÉCNICO DE ENFUSTE MODELO



SECTION A-A

	DATA	NOME	UNIVERSIDADE DO MINHO DEP. ENGENHARIA MECÂNICA DISSERTAÇÃO	 
DESENHOU		Luís Félix		
VERIFICOU				
APROVOU				
ESCALA	DESIGNAÇÃO:		DESENHO N.º	
1:1	Enfuste modelo			
TOLERANCIA				
	MATERIAL:	WEIGHT:	SUBSTITUI:	
			SUBSTITUIDO POR:	