

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Joel Filipe Vieira da Silva

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UMA
INSERÇÃO ANTI PENETRAÇÃO PARA
APLICAÇÃO EM CALÇADO DE SEGURANÇA



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Joel Filipe Vieira da Silva

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UMA
INSERÇÃO ANTI PENETRAÇÃO PARA
APLICAÇÃO EM CALÇADO DE SEGURANÇA

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

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor João Pedro Mendonça de Assunção
da Silva

outubro de 2013

DECLARAÇÃO

Nome: Joel Filipe Vieira da Silva

Correio electrónico: vieiradasilvajf@gmail.com

Tel./Tlm.:914659459

Número do Bilhete de Identidade:13789967

Título da dissertação:

Estudo e desenvolvimento de uma inserção anti penetração para aplicação em calçado de segurança

Ano de conclusão: 2013

Orientador(es): João Pedro Mendonça de Assunção Silva

Designação do Mestrado:

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

Área de Especialização:Tecnologias de Manufatura

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

De acordo com a legislação em vigor, não é permitida a reprodução de qualquer parte desta dissertação

Guimarães, ___/___/_____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que de diferentes formas me ajudaram no decorrer desta dissertação.

Ao Professor Doutor João Pedro Mendonça, meu orientador, pela oportunidade de desenvolver este projecto, pela ajuda prestada na delineação das ideias principais, pelas metodologias incentivadoras, pela motivação, pelas oportunidades de desenvolver competências noutros projectos, e por todo o conhecimento científico e ensinamentos partilhados que foram fundamentais no decorrer desta dissertação e continuarão a ser certamente importantes no futuro como Engenheiro e pessoa.

Ao Engenheiro Sérgio Costa, por toda a ajuda, conselhos, motivação, pelo conhecimento transmitido, por toda a disponibilidade numa construção critica e científica do projecto, e por todas as conversas repletas de conhecimento que foram essenciais para esta dissertação.

A todos os meus professores que me orientaram ao longo do curso, pelo conhecimento, e por toda a formação imprescindível para a realização desta dissertação.

Ao engenheiro António Abreu pela disponibilidade e auxílio prestado ao longo deste projecto. À Engenheira Sónia Ferreira e a Professora Doutora Maria José Abreu pelo conhecimento científico transmitido na área da Engenharia de materiais e Engenharia têxtil.

A todas as empresas de calçado de segurança que nos abriram as portas e acolheram sempre da melhor forma, a todo o conhecimento pratico transmitido que seria impossível adquirir de outra forma. De todas estas, um agradecimento especial à empresa ICC-Lavoro pela disposição de recursos técnicos e acompanhamento próximo.

Aos fabricantes de inserções anti penetração que amavelmente forneceram amostras, em especial a empresa Safit que alem de fornecer amostras mostrou um grande interesse no projecto, contribuindo com informação importante para esta dissertação.

Ao departamento de Engenharia de Polímeros pela disposição de equipamento técnico fundamental. Ao Engenheiro Luís Martins por toda a disponibilidade e ajuda prestada nos trabalhos efectuados nos equipamentos de digitalização laser.

A todos os meus amigos que estiveram comigo ao longo do curso, por todo o apoio e ajuda em todos os momentos importantes, e pelos *brainstormings* construtivos que em muito ajudaram o desempenho neste trabalho. Aos meus amigos de longa data por estarem sempre presentes e dispostos a ajudar, e à Psicóloga Daniela Teixeira pela transmissão de conhecimento e pela amizade.

Por fim um agradecimento muito especial à minha família, José Silva, Irene Vieira e Rui Silva, pelo apoio incondicional, pelo esforço e dedicação que sempre os caracterizou, tornando tudo isto possível. Agradeço também à Maria Joaquina Vieira pelos princípios e valores inculcados que foram e serão sempre uteis mostrando que nem sempre estar longe significa não estar presente.

Mais uma vez, um muito obrigado a todos.

RESUMO

Com a preocupação crescente em garantir melhores condições de segurança nos postos de trabalho, aliado ao bom momento que o calçado português se encontra, o subsector do calçado de segurança tornou-se uma indústria promissora onde a necessidade de inovar deixou de ser uma opção para se tornar uma necessidade.

Neste sentido, esta dissertação apresenta um estudo sobre todas as variáveis inerentes às inserções anti penetração existentes, visando otimizar o calçado de segurança existente. Este estudo propõe o desenvolvimento, recorrendo a técnicas de engenharia inversa, de uma nova inserção, completamente inovadora ao nível dos materiais e processos de fabrico utilizados.

Por forma a complementar as temáticas relacionadas com a inserção anti penetração foram efectuadas varias visitas exploratórias a empresas deste sector, procurando reportar todas as variáveis importantes neste componente. Numa primeira fase são explicados conceitos teóricos relacionados não só com o componente em si mas também com o calçado de segurança em geral. Testes e análises experimentais foram efectuados para uma completa caracterização das inserções existentes até ao momento bem como de materiais inovadores. Foi também analisado numericamente, usando FEA (Análise por Elementos Finitos) a influência da espessura na deformação de inserções metálicas, quando sujeitas à penetração.

Por fim, depois de compilada toda a informação adquirida, é apresentada uma solução de uma nova inserção anti penetração. Para o desenvolvimento desta solução foram usadas diferentes metodologias de engenharia inversa.

Palavras-Chave

Inserção Anti Penetração; Calçado de Segurança; EPI; Engenharia Inversa;

ABSTRACT

With growing concern to ensure best health and safety conditions in the workplace, allied with the good moment that the Portuguese footwear, the safety footwear as a sub-sector has become a promising industry where the need for innovation is no longer an option but a necessity.

In this sense, aiming an optimization of the existing safety footwear, this dissertation presents a study of all the variables inherent to a penetration resistant inserts. This study culminates with the development, using reverse engineering techniques, of a brand new penetration resistant insert, completely innovative in terms of materials and processes.

Having in mind a complete study of all issues related to a penetration resistant insert, several industrial visits were made, to report the most important variables in this component. Initially, theoretical concepts are related not only to the component itself but also with the safety footwear in general. Tests and experimental analyzes were performed for a full characterization of existing products. Numerical analyses using FEA (finite element analyses) was also performed to study the influence of thickness in the metallic inserts deformation when subjected to penetration.

Finally, after all the compiled information acquired, a solution of a brand new penetration resistant insert is proposed. To develop this solution, different reverse engineering methodologies were used.

Key Words

Penetration Resistant Inserts; Safety Footwear; EPI; Reverse Engineering

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xv
ACRÓNIMOS	xvii
1 INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO	2
1.1 Contextualização do Calçado de Segurança	3
1.2 Dados Estatísticos Sobre Acidentes de Trabalho.....	4
1.3 Dados sobre o Pé	6
1.4 Equipamentos de Protecção Individual (EPI's).....	7
1.5 Objectivo e Estrutura da Dissertação.....	8
2 ESPECIFICIDADES TÉCNICAS E NORMATIVAS DO CALÇADO DE SEGURANÇA	10
2.1 Tipos de Calçado de Segurança.....	11
2.2 Normas.....	12
2.3 Evolução	13
2.4 Componentes de Protecção.....	15
2.4.1 Inserções Anti Penetração.....	15
2.4.2 Biqueira de Protecção.....	26
2.5 Processo de Fabrico.....	27
2.5.1 Montagem da Inserção Anti Penetração	31
3 PROJECTO ASSISTIDO POR COMPUTADOR DE UMA INSERÇÃO ANTI PENETRAÇÃO	34
3.1 Sistemas CAD	35

3.2	Engenharia Inversa.....	36
3.2.1	Processos de Recolha de Dados e Aquisição de Forma.....	37
3.2.2	Pré-processamento e Tratamento de Dados	40
3.2.3	Engenharia Inversa no Calçado de Segurança	41
3.3	Modelação Tridimensional Assistida.....	43
3.3.1	Aquisição de Dados	43
3.3.2	Obtenção do Modelo Sólido 3D	48
4	ANÁLISES E ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE MATERIAIS	54
4.1	Ensaio Experimental a Inserções Anti Penetração	55
4.1.1	Teste de Resistência à Penetração	57
4.1.2	Análise Metroológica.....	62
4.1.3	Caracterização Química	63
4.2	Análise de Funções e Características	66
	<i>Layout</i> de Funções e Características:	69
4.3	Ensaio Experimental a Novos Materiais.....	71
4.3.1	Sanduíche Metálica de Cortiça	71
4.3.2	Membrana de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE)	74
4.3.3	Compósito Termoplástico - Pure®	75
4.3.4	Spacers	77
5	UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO PROJECTO DE UMA INSERÇÃO ANTI PENETRAÇÃO	84
5.1	Generalidades	85
5.2	Condições de Fronteira.....	86
5.3	Discretização.....	86
5.4	Simulação	89
5.5	Análise de Resultados.....	92
6	PROPOSTA DE INSERÇÃO ANTI PENETRAÇÃO DESENVOLVIDA	94
6.1	Soluções Preliminares	95
6.2	Solução Final	97
6.2.1	Processo de Montagem no Calçado de Segurança.....	99

6.2.2	Junção das Camadas	100
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
7.1	Conclusão	105
7.2	Trabalhos Futuros	106
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
	ANEXO A	112
	ANEXO B	120
	ANEXO C	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Preço médio do calçado nos 15 maiores exportadores a nível mundial [2]	3
Figura 2 – Evolução das importações e exportações do calçado português em milhões de pares e em milhões de dólares [2]	4
Figura 3 – Principais zonas do pé	7
Figura 4 – Componentes constituintes de um sapato de segurança adaptado de [7].....	15
Figura 5 – Fluxograma das principais inserções anti penetração existente	16
Figura 6 – Exemplos de inserções anti penetração metálicas.....	17
Figura 7 – Inserção anti penetração proposta por Kenji Okayasu [8].....	18
Figura 8 – Inserção anti penetração proposta por Albertus A., adaptado de [9].....	19
Figura 9 – Inserção anti penetração proposta por Frederick A. Harrison, adaptado de [10]	20
Figura 10 – Exemplos de diferentes inserções em fibra de aramida.....	21
Figura 11 – Inserção anti penetração em fibra de aramida com reforço metálico.....	22
Figura 12 – Inserção anti penetração proposta por Luigi Bettaglia, adaptado de [13].....	22
Figura 13 – Inserção anti penetração amovível SteelFlex [15].....	23
Figura 14 – Inserção anti penetração proposta por Leo Sartor, adaptado de [16].....	24
Figura 15 - Inserção anti penetração desenvolvida pela marca Lavoro	25
Figura 16 – Biqueira de protecção metálica e biqueira de protecção em material compósito [17]	26
Figura 17 – Diagrama do processo de fabrico do calçado de segurança, adaptado de [18]	28
Figura 18 – Processo de montagem de um sapato.....	30
Figura 19 – Exemplo de sapato strobelado.....	32
Figura 20 – Inserção anti penetração colada na palmilha de montagem	32
Figura 21 – Inserção anti penetração inserida na sola do sapato	32
Figura 22 – Fluxograma do processo de Engenharia Inversa, adaptado de [21]	37
Figura 23 - Técnicas de digitalização 3D para engenharia inversa. Adaptado de [23].....	39
Figura 24 – Exemplo de nuvem de pontos antes e após a remoção dos <i>outliers</i> [25].....	40
Figura 25 – Aquisição de dados por contacto recorrendo a MMC Mitutoyo 8HN706	44
Figura 26 – Equipamento de obtenção de dados sem contacto Roland LPX-600.....	45
Figura 27 – Triangulação laser efectuada pela Roland LPX-600	45

Figura 28 – Inserção anti penetração no interior da Roland LPX-600	46
Figura 29 – Influencia do angulo de digitalização na qualidade da nuvem de pontos final	47
Figura 30 – Pré tratamento da inserção anti penetração composta.....	47
Figura 31 – Visão geral da metodologia usada para o desenvolvimento de uma nova biqueira de protecção	49
Figura 32 – Curvas de secção obtidas através da nuvem de pontos da inserção anti penetração	50
Figura 33 – Curvas de fronteiras obtidas através da nuvem de pontos da inserção anti penetração.....	51
Figura 34 – Visão geral da metodologia em SolidWorks para obtenção do modelo solido 3D	51
Figura 35 – Equipamento utilizado nos testes à penetração das amostras de inserções anti penetração.....	57
Figura 36 – Agulha de teste usada.....	58
Figura 37 – Zona de fixação das amostras	58
Figura 38 – Dimensões da agulha de teste de acordo com a norma EN 12568 [29].....	58
Figura 39 – Equipamento usado para os testes à fadiga.....	61
Figura 40 – Layout tridimensional de funções e características.....	69
Figura 41 – Representação de uma estrutura sanduiche	71
Figura 42 – Sanduiche de cortiça testada à penetração.....	72
Figura 43 – Amostra de UHMWPE testada	74
Figura 44 – Amostra do material Pure®	76
Figura 45: Spacers ensaiados. (a) LMA, (b) N-02509-A01, (c) N-02718-A01, (d) N-02652-A01, (e) N-02593-A01	78
Figura 46 – Condições de fronteira da simulação efectuada	86
Figura 47 – A :Elemento sólido tetraédrico linear; B :Elementos sólidos tetraédricos parabólicos [39].....	87
Figura 48 – Representação da malha aplicada.....	89
Figura 49 – Representação da curva tensão-deformação real do aço AISI 301 [40]	90
Figura 50 – Representação da deformação máxima obtida para o aço AISI 301 e 0.45 mm de espessura.....	91
Figura 51 – Ilustração do modelo tridimensional da primeira solução preliminar.....	96

Figura 52 – Ilustração do modelo tridimensional da zona traseira da segunda solução preliminar	96
Figura 53 – Solução final de uma nova inserção anti penetração.....	98
Figura 54 – Margem para processo de strobagem na inserção anti penetração proposta	100
Figura 55 – União das camadas de fibra de aramida e aço com resina de epoxy	101
Figura 56 - União das camadas de fibra de aramida e aço por acravamento mecânico	102
Figura 57 – Espectrómetro Philips X'Unique II X-Ray	113
Figura 58 – Micrómetro Mitutoyo utilizado	114
Figura 59 – Suporte utilizado na medição	114
Figura 60 – Equipamento Voronoi-Delaunay meshing scheme usado para a medição da permeabilidade ao ar dos spacers.....	115
Figura 61 – Equipamento usado para a medição da permeabilidade ao vapor de agua dos spacers	116
Figura 62 – Alambeta usado para a medição da espessura e propriedades térmicas dos spacers	116
Figura 63 – KES usado para analisar os spacers a compressão	118

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultados dos testes à penetração das inserções metálicas	59
Gráfico 2 – Diferença entre os resultados obtidos numa inserção metálica e numa inserção em fibra de aramida	60
Gráfico 3 – Espessura das inserções anti penetração analisadas	62
Gráfico 4 – Composição química das diferentes amostras – Todos os elementos químicos.....	65
Gráfico 5 – Composição das diferentes amostras – elementos químicos menos abundantes ...	65
Gráfico 6 – Curva força/deslocamento dos testes efectuados a sanduiche e a camada de dupla de aço	73
Gráfico 7 – Resiliência a compressão, para os spacers analisados.	79
Gráfico 8 – Linearidade da curva compressão/espessura (L_c), e energia de compressão por unidade de superfície, (W_c) para os spacers analisados	79
Gráfico 9 – Espessura dos spacers analisados	80
Gráfico 10 – Resistência térmica dos spacers analisados	80
Gráfico 11 – Permeabilidade ao ar para 100 Pa e 200 Pa, nos spacers analisados	81
Gráfico 12 – Índice de permeabilidade ao vapor de água, nos spacers testados.....	82
Gráfico 13 – Gráfico dos resultados do estudo de refinamento da malha para o modelo da inserção anti penetração.....	89
Gráfico 14 – Deformação máxima obtida em função da espessura	91
Gráfico 15 – Permeabilidade ao ar para para 100 e 200 Pa.....	121
Gráfico 16 – Massa por unidade de superfície dos spacers	122
Gráfico 17 – Espessura dos spacers analisados	123
Gráfico 18 – Condutividade térmica dos spacers analisados.....	125
Gráfico 19 – Difusividade térmica dos spacers analisados	126
Gráfico 20 – Absorvidade térmica dos spacers	126
Gráfico 21 – Resistência térmica dos spacers analisados	127
Gráfico 22 – Fluxo de calor dos spacers analisados.....	127
Gráfico 23 – Linearidade da curva compressão/espessura, L_c , e energia de compressão por unidade de superfície, W_c para os spacers.....	129

Gráfico 24 – Resiliência á compressão, R_c , para os spacers analisados.....	130
Gráfico 25 – Compressão a 10 cN/m^2 , EMC, para os spacers analisados.....	130
Gráfico 26 – Atrito máximo e atrito cinético dos spacers analisados.....	132
Gráfico 27 – MaxTorque e Mean Torque dos spacers analisados	133
Gráfico 28 – Permeabilidade ao vapor de água dos spacers analisados	134
Gráfico 29 – Índice de permeabilidade ao vapor de água dos spacers analisados	134

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Lesões nos membros inferiores de acordo com a natureza da lesão (Fonte: Eurostat)	5
Tabela 2 – Requerimentos dos vários tipos de calçado de protecção pessoal.....	12
Tabela 3 – Normalização em vigor para calçado de segurança	12
Tabela 4 – Modelos reais e modelos tridimensionais das inserções anti penetração.....	52
Tabela 5 – Informação relativa as amostras de inserções anti penetração testadas.....	56
Tabela 6 – Resultados da caracterização química efectuada.....	64
Tabela 7 – Tabela de valores relativa às características secundárias.....	68
Tabela 8 – <i>Layout</i> de características e funções	70
Tabela 9 – Valores do ensaio de penetração da sanduiche aço/cortiça e dupla camada de aço	73
Tabela 10 – Valor do ensaio de penetração para as amostras UHMWPE	74
Tabela 11 – Propriedades do material Pure®	76
Tabela 12 – Resultados do estudo de refinamento da malha para o modelo da inserção anti penetração	88
Tabela 13 – Tabela da deformação máxima obtida em função da espessura	91
Tabela 14 – Características do micrómetro Mitutoyo utilizado.....	113

ACRÓNIMOS

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
AISI	American Iron and Steel Institute
CAD	Computer Aided Design (Desenho assistido por computador)
CAE	Computer Aided Engineering (Engenharia Assistida por Computador)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Manufactura Assistida por Computador)
CMM	Coordinante Measuring Machine (Maquina de Medir por Coordenadas)
CTCP	Centro Tecnológico do Calçado de Portugal
EN	European Standard
ESAW	European statistics on accidents at work
EPI	Equipamento de Protecção Individual
UE	União Europeia
FEM	Finite Element Method
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISSO	Internationa Organization for Standardization
KES	Kawabata Evaluation System
NURBS	Non-Uniform Rational Basis Spline
PU	Poliuretano
XRF	X-ray fluorescence





1 INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO



1.1 Contextualização do Calçado de Segurança

O calçado é um dos sectores mais internacionalizados da economia portuguesa. Inicialmente, surgiu como um sector tradicional de mão-de-obra intensiva mas, em apenas duas décadas tornou-se num dos sectores mais dinâmicos e empreendedores. Este sector exporta aproximadamente 85 por cento da sua produção para os mais exigentes mercados internacionais tornando-se um exportador de referência a nível mundial. [1]

A indústria portuguesa de calçado constitui um bom exemplo de como pode ser modernizado um sector inicialmente tradicional. Esta indústria consegue actualmente contrariar a situação económica pouco favorável em que o país se encontra, sendo mesmo considerada um bom exemplo para outros tipos de indústrias. Assim, este sector apresenta um peso inquestionável na economia portuguesa devido à sua capacidade técnica e tecnológica e pela procura constante de soluções dinâmicas e modernas. [2]

A aposta na qualidade dos produtos tem-se tornado uma vertente importante nas empresas nacionais, que aliada à inovação, design e resposta rápida e flexível, colocam Portugal numa posição bem consolidada no mercado mundial. O bom momento que este sector está a atravessar tem despertado nas empresas uma busca constante por novas soluções que visão a melhoria contínua, de forma a aumentar a produtividade e qualidade do produto. [1]

Estes factores catapultaram Portugal para topo dos maiores exportadores mundiais de calçado, sendo o segundo país com um preço médio mais elevado (Figura 1). O que se deve essencialmente à especialização da indústria portuguesa no segmento de calçado com maior valor acrescentado.

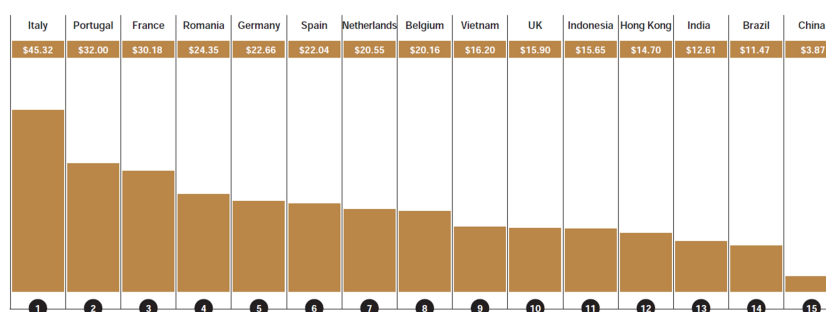


Figura 1 – Preço médio do calçado nos 15 maiores exportadores a nível mundial [2]

A grande evolução das exportações na última década (Figura 2), realça a grande potencialidade inerente a este sector.

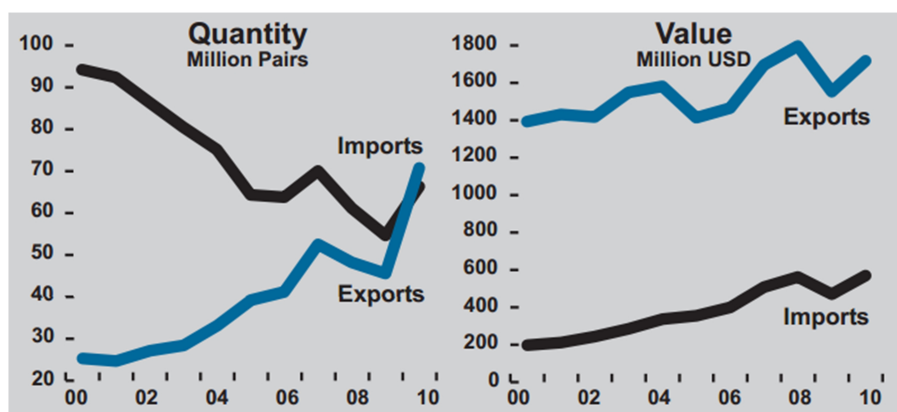


Figura 2 – Evolução das importações e exportações do calçado português em milhões de pares e em milhões de dólares [2]

A importância da indústria do calçado em geral, aliada à preocupação crescente em garantir o bem-estar dos cidadãos nos contextos laborais, conduziu a uma evolução óbvia do calçado de segurança. Este subsector do calçado foi evoluindo de forma análoga nos últimos anos. As estratégias criadas pela União Europeia (UE), com o objectivo de melhorar a vertente da higiene e segurança no trabalho, conduziram a uma maior procura deste equipamento de protecção individual (EPI), levando este subsector a uma busca pela inovação e melhoria dos seus produtos. A optimização dos sapatos de segurança produzidos surgiu de forma a responder às necessidades de um mercado cada vez mais exigente.

1.2 Dados Estatísticos Sobre Acidentes de Trabalho

De acordo com as Estatísticas Europeias de Acidentes de Trabalho (ESAW), todos os anos na UE, antes da aprovação da nova Estratégia Comunitária sobre Saúde e Segurança no Trabalho em Março de 2002, cerca de 3 mil trabalhadores são vítimas de acidentes de trabalho, acidentes esses que levam a mais de três dias de ausência ao trabalho. Além disso, cerca de 5.000 trabalhadores foram vítimas mortais de acidentes de trabalho. [3]

Como referido anteriormente, a UE, juntamente com os Estados-Membros, criaram estratégias que visam o aumento do uso de EPI's e, conseqüentemente, a diminuição do número de acidentes no trabalho.



Em 2010, ocorreram cerca de 2 634 196 acidentes de trabalho na Europa, dos quais 707 292 afectaram as extremidades inferiores. [4]. Durante o mesmo período de tempo, em Portugal, os números foram igualmente grandes, ocorreram 215 632 acidentes, dos quais 52 467 afectaram extremidades inferiores.

A Tabela 1 mostra a evolução dos acidentes de trabalho de acordo com a natureza da lesão causada entre 2002 e 2010 na EU. Apesar de não se ter verificado uma diminuição substancial do número de lesões nas pernas e nos pés, houve uma diminuição na taxa de lesões graves, como lesões internas e amputações de membros, o que levou a um aumento das lesões superficiais.

Tabela 1 – Lesões nos membros inferiores de acordo com a natureza da lesão (Fonte: Eurostat)

<i>Ano</i>	<i>2002</i>	<i>2004</i>	<i>2006</i>	<i>2008</i>	<i>2010</i>
Total	55 988	47 979	54 399	57 016	52 567
Natureza da lesão desconhecida	4%	6%	12%	9%	3%
Lesões superficiais	42%	36%	30%	43%	44%
Fracturas	10%	7%	6%	6%	5%
Deslocações entorses e distensões	23%	27%	34%	32%	39%
Amputações	3%	0,05%	0,04%	0,05%	1%
Concussões e lesões internas	14%	19%	12%	7%	6%
Choques	1%	1%	2%	0,38%	1%
Lesões Múltiplas	0,36%	0,11%	0,34%	0,21%	0,09%
Outras	3%	3%	3%	3%	2%

Em Portugal, este tipo de acidentes leva normalmente à incapacidade do trabalhador durante 15 dias, em média. Além do sofrimento humano, os acidentes têm um forte impacto na produtividade e, conseqüentemente levam a perdas financeiras para a entidade empregadora.

Embora haja uma tendência positiva para o uso de EPI's, especificamente calçado de segurança, existe ainda uma grande percentagem de trabalhadores que rejeita ou negligencia o uso dessa protecção. Goldcher (2005) [5], apresenta alguns dos motivos para que isso aconteça:

- Desconforto no trabalho;
- O excesso de peso, que leva a fadiga no final do dia (dor no calcanhar, dores musculares);
- Falta de flexibilidade, devido ao excesso de rigidez de alguns componentes;
- Modelos inadequados à morfologia de alguns pés;



- Ocorrência de lesões secundárias nos pés devido ao desconforto e falta de flexibilidade;
- Modelos existentes pouco ergonômicos e esteticamente não agradáveis;
- Ventilação inadequada que promovem suor e infecção fúngica.

Desta forma, é evidente a necessidade de melhorar o calçado de segurança existente, com o objectivo promover uma melhor aceitação por parte dos trabalhadores, reduzindo assim o número de lesões no trabalho.

1.3 Dados sobre o Pé

A segurança dos membros inferiores, nomeadamente do pé, são frequentemente negligenciados no trabalho. Esta zona do corpo é frequentemente menosprezada comparativamente a outros assuntos de segurança, o que origina muitas vezes problemas graves. Além de uma grande importância na nossa vida, os pés tem um impacto significativo na nossa saúde e bem-estar geral.

Sendo uma das partes do corpo com maior solicitação durante o dia-a-dia, estes encontram-se constantemente sob tensão. O pé humano caracteriza-se por ser uma estrutura complexa que funciona como suporte do corpo, responsável pela locomoção, distribuição de cargas e estabilidade corporal. Desta forma, a segurança e a saúde desta zona do corpo deve ser considerada uma preocupação fundamental.

A distribuição do peso corporal está concentrada em seis pontos de apoio, sendo o osso do calcanhar o ponto mais importante uma vez que suporta cerca de metade do peso. Qualquer factor que altere a distribuição normal do peso na estrutura do pé causará inconveniência e desconforto, que a longo prazo pode resultar em lesões.

A estrutura do pé está dividida em três partes diferentes: Calcanhar ou zona traseira, metatarso ou arco do pé e flanges ou zona dianteira (Figura 3). Estas três partes trabalham em conjunto para garantir a estabilidade do resto do corpo.

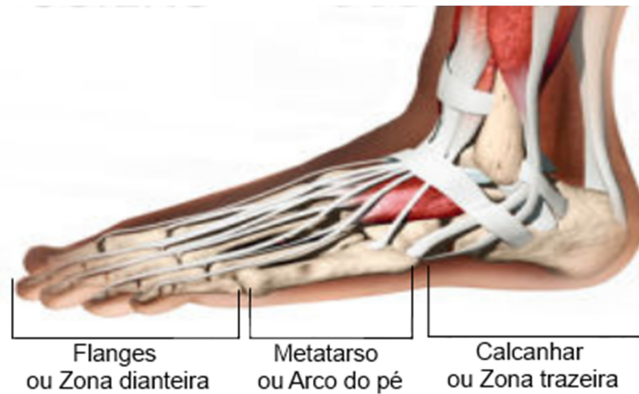


Figura 3 – Principais zonas do pé

Tendo o calçado uma grande importância na condição dos pés, um sapato deve conter propriedades adequadas às três diferentes zonas do pé, de forma a proporcionar um bom nível de conforto. Uma vez que cabe ao calcancar a responsabilidade de suportar metade do peso corporal, o sapato deve conter materiais suaves nesta zona de forma a auxiliar o calcancar nesta tarefa. Por outro lado, a zona dianteira necessita de uma grande flexibilidade para que a não seja posta em causa a locomoção.

1.4 Equipamentos de Protecção Individual (EPI's)

Associado à evolução industrial nas últimas décadas há também a uma maior preocupação em garantir melhores condições de higiene e segurança nos postos de trabalho. Grande parte dos países industrializados criou directivas ou normas que prevêm o uso de diferentes tipos de EPI, que correctamente usados evitam lesões resultantes de acidentes de trabalho.

Todos os EPI's devem estar em conformidade com as normas aplicáveis à sua concepção e fabrico em matéria de segurança e saúde, ser adequados aos riscos a prevenir e às condições existentes no local de trabalho sem implicar por si próprio um aumento de risco.

Os EPI's podem também dividir-se de acordo com o tipo de protecção que oferecem. Assim sendo, essa divisão abrange a protecção individual da cabeça, a protecção individual dos ouvidos, a protecção da face e dos olhos, a protecção de mãos e braços, a protecção da pele, a protecção do tronco e abdómen, a protecção do corpo completo (contra quedas) e a protecção dos membros inferiores.



Para que um EPI apresente uma boa fiabilidade e qualidade é necessário garantir a ausência de riscos e outros factores de perturbação autógenos, em materiais constitutivos apropriados e no estado superficial adequado a todas as partes de um EPI em contacto com o utilizador. A adaptação à morfologia do utilizador, a leveza e qualidade da construção e a compatibilidade com o uso de outros equipamentos de protecção, garantem a o conforto e a eficácia do EPI.

Na união Europeia a produção e venda de EPI's são baseados em directivas suportadas por normas que garantem o correcto fabrico e a devida utilização por parte dos trabalhadores. Esta aproximação de regulamentações gerais (Directivas), complementadas por especificações técnicas (normas), originou grandes alterações a nível de segurança no trabalho nos últimos anos.

1.5 Objectivo e Estrutura da Dissertação

A crescente apreensão em assegurar melhores condições de segurança no local de trabalho, e o bom momento que o calçado português se encontra, serve como plano de fundo desta dissertação. Aliado a estes dois factos encontra-se ainda, como comprovado na secção 1.2, uma necessidade de otimizar o calçado de segurança existente de modo a aumentar o seu uso por parte dos operários. No decorrer desta dissertação foi redigido um artigo, aceite no simpósio internacional SHO2014 (*Occupational Safety and Hygiene*) sobre a necessidade de desenvolver uma nova inserção, comprovando a necessidade de melhorar o calçado de segurança. [6]

De modo a otimizar o calçado de segurança existente, é realizado um estudo que termina com o desenvolvimento de uma nova inserção anti penetração. Para isto foi necessário efectuar uma recolha de informação abrangendo primeiramente o calçado de segurança em geral e numa fase seguinte as inserções anti penetração em particular. No final pretende-se obter uma nova inserção anti penetração inovadora, de modo a colmatar as lacunas das existentes ate ao momento. Para o projecto de um novo componente deste género serão usadas varias técnicas de engenharia que permitam uma completa caracterização e análise quer das inserções existentes, quer de materiais com potencial aplicabilidade.



Para uma melhor compreensão do estudo efectuado, esta dissertação encontra-se dividida em 8 capítulos. No primeiro, é feita uma introdução e enquadramento do tema em estudo, onde são também referenciados alguns conceitos básicos desta temática.

O capítulo seguinte aborda toda a informação considerada fundamental acerca do calçado de segurança, e os seus principais componentes. Neste capítulo além de ser descrito o processo de fabrico do calçado de segurança é explicada a evolução que este tipo de calçado sofreu, dando especial atenção à evolução das inserções anti penetração.

O terceiro capítulo refere aspectos teóricos que serviram de base para o desenvolvimento de uma nova inserção partindo das inserções já existentes.

No quarto capítulo é explicado de que forma foram obtidos os modelos tridimensionais das inserções anti penetração existentes. Neste capítulo é também feita uma comparação entre diferentes metodologias recorrendo a engenharia inversa, justificando qual delas se adequa melhor a esta aplicação.

O Quinto capítulo descreve todas as análises e testes efectuados às inserções anti penetração existentes actualmente, bem como as análises efectuadas a materiais com potencial aplicabilidade. Este capítulo é de extrema relevância, uma vez que a informação obtida nestes testes e análises serviu como ponto de partida para a criação de soluções de uma nova inserção anti penetração.

No seguinte capítulo, é feita uma simulação computacional com o propósito de analisar a influência da espessura na deformação máxima de uma inserção anti penetração metálica.

Por fim, antes das considerações finais, são explicadas as soluções preliminares que deram origem a solução final. É também referido o processo de montagem da inserção num sapato de segurança.



2 ESPECIFICIDADES TÉCNICAS E NORMATIVAS DO CALÇADO DE SEGURANÇA



2.1 Tipos de Calçado de Segurança

Um sapato de segurança é um EPI que visa a protecção dos membros inferiores, é utilizado da mesma forma que um sapato convencional. A principal diferença encontra-se na sua constituição, uma vez que é composto por componentes que lhe conferem protecção avançada sobre vários riscos. Existem vários tipos de lesões que podem ser evitadas com o uso deste EPI, as mais comuns são:

- Queda por escorregamento;
- Lesões devido a queda de objectos pesados;
- Esmagamento dos dedos do pé por corpos pesados;
- Perfuração do pé por objectos pontiagudos.

Sendo assim os componentes com maior importância neste EPI são a inserção anti penetração e a biqueira.

De acordo com a normalização existente, existem vários tipos de calçado com protecção que podem ser classificados como calçado de segurança, calçado de protecção e calçado de trabalho de acordo com a protecção que eles oferecem. O tipo de protecção conferida por qualquer um dos tipos acima mencionados é mostrado na Tabela 2.

Nesta tabela, os números referem-se ao nível de protecção oferecida pelos sapatos. As letras estão relacionadas com o tipo de calçado, S para calçados de segurança, P para calçado de protecção e O para calçado de trabalho. SB^A e PB^B referem-se a todos os materiais que compõem o sapato. S^C, P^C e O^C estão relacionados com sapatos feitos a partir de todos os materiais, excepto os polímeros naturais ou sintéticos e S^D, P^D e O^D estão relacionados com sapatos feitos a partir de polímeros naturais e sintéticos.

A principal diferença entre calçado segurança, calçado de protecção e ocupacional é a protecção na biqueira. No caso de sapatos de segurança, biqueiras devem resistir a um impacto mecânico de 200 J, enquanto o impacto suportado pelos sapatos de protecção deve ser de 100 J. No caso dos sapatos de trabalho, não é obrigatoriamente necessária a protecção na biqueira.



Tabela 2 – Requerimentos dos vários tipos de calçado de protecção pessoal

Nível de protecção	EN ISO 20345						EN ISO 20346						EN ISO 20347				
	Calçado de Segurança						Calçado de Protecção						Calçado de Trabalho				
	SB-	S1-	S2-	S3-	S4-	S5-	PB-	P1-	P2-	P3-	P4-	P5-	O1-	O2-	O3-	O4-	O5-
Protecção básica	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Calcanhar vedado		+	+	+				+	+	+			+	+	+		
Propriedades antiestéticas		+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Absorção de energia no calcanhar		+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Impermeável			+	+				+							+		
Resistência à penetração				+						+		+			+		
Sola com pitons				+						+		+	+		+		

2.2 Normas

De acordo com a actividade em causa os EPI's devem obedecer a normas que estabelecem regras directrizes ou características definias como essenciais. As normas são documentos ou especificações de domínio público e aprovada por instituições juridicamente qualificadas a nível nacional, internacional ou regional, baseado em resultados da ciência, da tecnologia e da experiência, para a optimização de beneficios aos utilizadores. Isto significa que nas normas vêm descritos métodos de ensaio que têm como objectivo validar determinado produto segundo especificações técnicas. No caso do calçado de segurança as normas de maior importância são normas europeias conhecidas por EN estas normas são da autoria da Organização Internacional para a Normalização (ISO). A

Tabela 3 mostra as principais normas para este sector de acordo com a sua função.

Tabela 3 – Normalização em vigor para calçado de segurança

<i>Norma</i>	<i>Tema</i>
EN ISO 12568	Requirements and test methods for toecaps and penetration resistant inserts
EN ISO 13287	Test method for slip resistance
EN ISO 20344	Requirements and test methods for safety, protective and working shoes for professional use.
EN ISO 20345	Specifications for safety shoes for professional use.
EN ISO 20346	Specifications for working shoes for professional use.



2.3 Evolução

A necessidade de proteger os pés contra lesões sempre existiu desde os seres humanos mais primitivos, que usavam madeira ou couro para proteger esta parte do corpo contra eventuais lesões. O primeiro sapato de segurança surgiu na América do Norte, em 1904, para proteger os trabalhadores das fundições. Os sapatos de segurança, tal como os conhecemos hoje em dia, surgiram pela primeira vez na Europa mais precisamente na Alemanha, na década de 40 por altura do final da segunda guerra mundial. [5]

Durante os últimos anos o calçado de segurança tem vindo a sofrer evoluções com o objectivo de aumentar o nível de conforto e protecção conferida ao utilizador sem aumentar significativamente os custos de produção. Pode considerar-se que esta evolução se tem dado em três aspectos diferentes: materiais, design e processo de fabrico.

Uma vez que a fiabilidade que um sapato de segurança apresenta depende essencialmente dos materiais que o constituem, os fabricantes encontram-se constantemente à procura de materiais inovadores que sejam capazes de otimizar o sapato. Com os avanços consideráveis que se fizeram sentir na área dos materiais na última década foi possível criar sapatos mais resistentes, confortáveis e com um tempo de vida mais elevado. Inicialmente, os componentes que conferiam protecção contra penetração e esmagamento do pé eram construídos recorrendo a materiais metálicos. Hoje em dia já é possível conferir o mesmo nível de protecção através de materiais compósitos. Apesar disso, o aço continua a ser o material mais utilizado, uma vez que é o material que oferece um melhor preço e melhores propriedades mecânicas. Os materiais compósitos têm a vantagem de ser mais leves mas, por outro lado, necessitam de uma maior espessura e tamanho para conferir a mesma protecção que o aço, tornando o sapato esteticamente menos agradável. A principal vantagem dos materiais compósitos é não serem detectados em detectores de metais.

Esta evolução reflecte-se também noutros componentes do sapato. A sola é um bom exemplo, uma vez que tem vindo a adquirir propriedades a nível de conforto e segurança de grande importância para um sapato deste tipo.

No que concerne ao design, este EPI sofreu também uma grande evolução. Primordialmente, os sapatos de segurança eram apenas utilizados por um pequeno número de trabalhadores quando



o risco de acidente era elevado. Hoje em dia, devido às alterações que sofreram, existe calçado de protecção com os mais diversos estilos. Este tipo de calçado é, nos dias de hoje, facilmente confundido com um sapato casual para um observador menos atento. Esta evolução contribuiu também para que um maior número de pessoas passasse a usar calçado de segurança. Desta forma, os sapatos de segurança, além de EPI fundamental, tornaram-se também um acessório de moda, transformando o seu fabrico num negócio ainda mais promissor.

Por fim, a evolução no processo de fabrico dos sapatos e dos componentes de protecção acompanhou o progresso ocorrido nas outras áreas. Esta evolução permitiu melhorar o custo de produção sem descartar a qualidade e segurança conferida, levando as empresas a serem mais competitivas num mercado cada vez mais exigente.

2.4 Componentes de Protecção

O calçado de segurança apenas é capaz de conferir protecção ao utilizador devido aos diversos componentes de segurança, que juntos asseguram uma total protecção do pé. Existem vários componentes que pelas características dos seus materiais conferem protecção avançada, de todos eles os que mais se destacam pela importância e protecção conferida são a inserção anti penetração e a biqueira de protecção. A Figura 4 mostra uma bota de segurança e os principais componentes que a constituem. Em seguida são descritos de forma minuciosa os principais componentes, inserção anti penetração e biqueira de protecção, dando um maior relevo à inserção anti penetração.



Figura 4 – Componentes constituintes de um sapato de segurança adaptado de [7]

2.4.1 Inserções Anti Penetração

Nesta secção além de ser explicado os principais conceitos associados as inserções anti penetração, é relatada a evolução que estas foram sofrendo desde o aparecimento dos primeiros tipos de calçado de segurança até aos dias de hoje.

De forma a compreender pormenorizadamente a evolução ocorrida neste tipo de componente de protecção foi realizada uma análise de várias patentes relacionadas com esta temática, recorrendo a ferramentas de busca disponibilizadas pela Tecminho. Além disso foram também analisadas várias amostras de inserções existentes actualmente no mercado.

Actualmente existe uma grande diversidade de inserções, estas podem ser divididas em dois grandes grupos, inserções simples ou inserções compostas. Por inserções simples são compreendidas, todas as que são constituídas apenas por um tipo de material, inserções compostas correspondem às constituídas por vários tipos de matérias ou as que apresentam diferente geometria e espessura em determinadas áreas específicas. A Figura 5 apresenta resumidamente os principais tipos de inserções existentes.

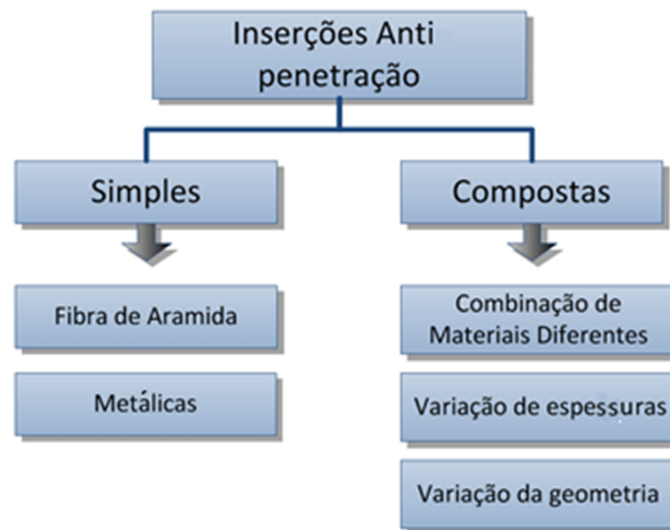


Figura 5 – Fluxograma das principais inserções anti penetração existente

O primeiro tipo de inserções ou palmilhas de segurança a serem criadas foram as inserções metálicas (Figura 6).

Quando foram desenvolvidos os primeiros tipos de calçado de segurança, esta era a única solução que garantia uma protecção da planta do pé contra objectos afiados. Ao longo do tempo e devido á evolução dos materiais metálicos estas tornaram-se mais finas e flexíveis.

Uma inserção metálica consiste numa chapa cortada com a forma da sola do sapato. Alguns tipos de inserções são conformados com o objectivo de facilitar o processo de fabrico do sapato.



Figura 6 – Exemplos de inserções anti penetração metálicas

Nos dias de hoje é possível encontrar uma grande variedade de palmilhas metálicas no mercado, que divergem entre si no tipo de material que as constitui e na espessura. Os materiais utilizados variam entre o alumínio e o aço inoxidável, sendo que a grande maioria é constituída por aços inoxidáveis como é comprovado na secção 4.1.3. Relativamente à espessura, esta varia geralmente entre os 0.3 e 0.5 mm. No capítulo 4.1 são efectuadas análises químicas e metrológicas especificando com maior precisão as espessuras e materiais usados neste tipo de inserções.

Algumas variações destas inserções são pintadas com uma camada de tinta especial, essa camada tem como função proteger o material contra corrosão e em alguns casos facilitar o processo de adesão ao poliuretano (PU) da sola do sapato.

Este tipo de protecção é ainda hoje bastante utilizado pela indústria, isto devido ao seu baixo custo de produção e a sua espessura reduzida. Contudo, as palmilhas metálicas apresentam várias limitações:

- São pouco flexíveis na zona frontal, o que impede o utilizador de caminhar normalmente tornando o sapato desconfortável;

- Apresentam o risco de quebrarem devido a ao grande número de flexões causadas pelo movimento natural do pé, algumas inserções começam a danificar a sola do sapato após algum tempo de uso;
- Rigidez constante ao longo da sua área, o que torna o sapato desconfortável;
- São detectadas em detectores de metal, o facto de terem esta constituição obriga os utilizadores a retirar o calçado de segurança quando necessitam passar por detectores de metais, isto torna-se um factor relevante em indústrias como as de softwares e aeronáutica.

Com o objectivo de melhorar a performance destas inserções foram desenvolvidos vários produtos distintos, sendo que nem todos foram bem aceites pela indústria. A maioria desses produtos fora desenvolvida em ambiente industrial e encontram-se protegidos por patentes.

Kenji Okayasu em 1991 criou uma inserção com o objectivo de melhorar a flexibilidade das inserções usadas até a data (Figura 7) [8]. Para conseguir que as inserções apresentem maior flexibilidade foram usadas pequenas chapas metálicas unidas de forma a permitir que a inserção dobre na zona dianteira. As várias placas metálicas encontram-se ainda envolvidas num invólucro que pode ser de plástico ou de borracha com o objectivo de impedir que a inserção danifique a sola do sapato onde está inserida.

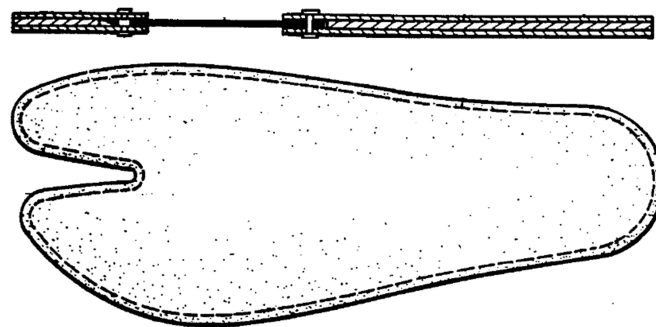


Figura 7 – Inserção anti penetração proposta por Kenji Okayasu [8]

Esta inserção não teve sucesso na indústria uma vez que o seu fabrico é bastante mais complexo que as inserções simples metálicas e a flexibilidade conferida continua a impor restrições ao movimento do pé.

Algum tempo mais tarde, em 1994, Albertus Alevén desenvolveu uma solução composta por várias camadas que visa resolver grande parte das falhas das inserções anteriores. [9]

Após algumas investigações nesta área chegou-se a conclusão que as palmilhas de protecção devem ser rígidas na zona entre o arco do pé e o calcanhar para evitar lesões devido à flexão desta zona e por outro lado, devem ser flexíveis o suficiente na zona da frente, das flanges, para permitir o movimento natural do pé.

Esta solução é a primeira que confere ao mesmo tempo rigidez numa zona e flexibilidade noutra através de uma combinação de vários materiais por camadas.

É constituída por uma camada protectora de plástico com forma e tamanho de acordo com a sola do sapato em questão (A - Figura 8). Esta camada protectora inclui uma zona com protecção específica para o calcanhar, aliada a uma chapa de aço inoxidável que confere protecção na zona dianteira (B - Figura 8). A união entre estas duas camadas encontra-se na zona onde irá existir flexão do pé ao caminhar, permitindo assim que a energia resultante desta flexão seja absorvida pela camada plástica.

Esta palmilha contém também uma camada superior composta por um forro com propriedades anti fungos (C - Figura 8), e uma camada inferior de poliéster (D - Figura 8) que facilita a adesão à sola. A variação da espessura ao longo da sua área resulta também numa optimização da flexibilidade nas zonas onde esta é requerida.

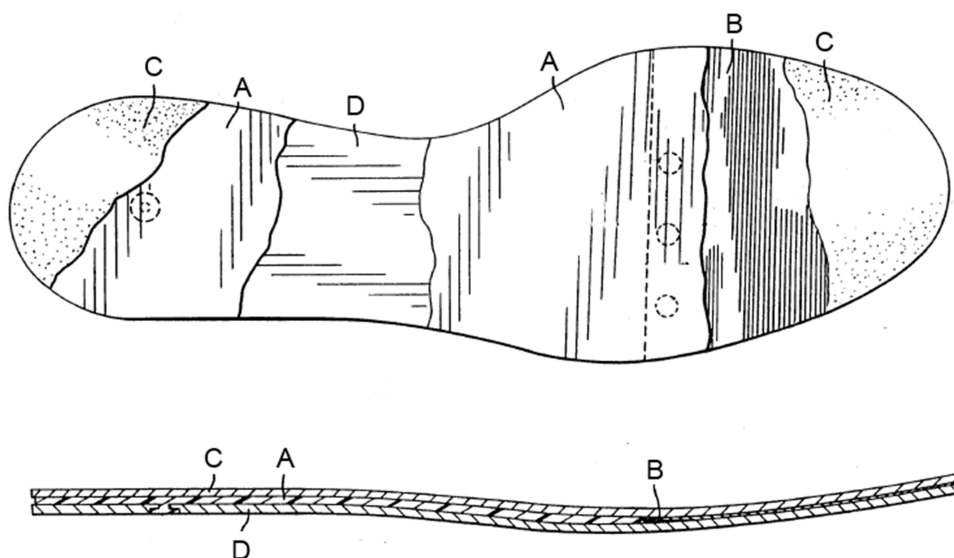


Figura 8 – Inserção anti penetração proposta por Albertus A., adaptado de [9]

Esta é uma solução que aumenta significativamente o conforto do sapato de segurança, contendo inúmeras vantagens relativamente a todas as restantes. As suas desvantagens estão

relacionas com o processo de fabrico complexo que resulta num custo elevado, não sendo economicamente viável para todos os tipos de sapatos. Existem alguns casos em que a placa metálica e a plástica podem separar-se com o uso do sapato, deixando uma área do pé vulnerável a objectos afiados.

Pouco tempo mais tarde, Frederick A. Harrison desenvolveu uma inserção que pretendia eliminar as desvantagens da anterior, essa inserção é composta por material polimérico sem costuras e com um processo de fabrico relativamente mais simples. Esta inserção destaca-se de todas as outras existentes, uma vez que contém uma testeira de protecção para os dedos (A Figura 9) e uma zona especial de protecção lateral para o calcanhar (B Figura 9). Enquanto, no sapato de segurança convencional a palmilha e a testeira são componentes diferentes que são anexadas no momento da montagem do sapato, esta inserção contempla todos esses componentes num só. [10]

A protecção é conferida recorrendo a plásticos resistentes capazes de absorver uma grande quantidade de energia. O material utilizado confere também uma elevada durabilidade e uma boa flexibilidade. Esta inserção contém uma chapa metálica de aço inoxidável (C Figura 9) embebida no material plástico com o objectivo de aumentar o nível de protecção naquela zona. O material metálico inserido, tem como desvantagem induzir demasiada rigidez à inserção. [11]

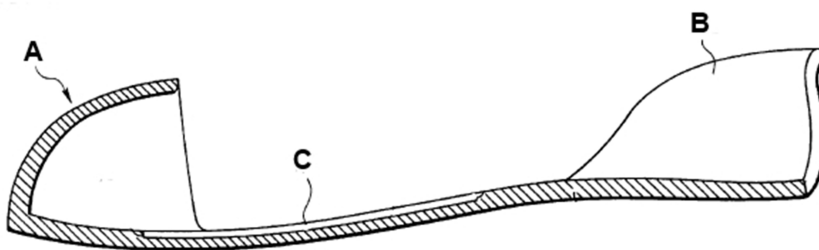


Figura 9 – Inserção anti penetração proposta por Frederick A. Harrison, adaptado de [10]

A partir do ano 2000 começaram a surgir as primeiras patentes de inserções em fibra de aramida. [12]. Fibra de aramida é uma fibra de alto desempenho, que apresenta uma elevada resistência à tracção e baixa densidade. Por essa razão, estas fibras são amplamente utilizadas na indústria aeronáutica engenharia militar para protecção e blindagem balística, entre outras

aplicações, que requerem materiais extremamente resistentes e leves. Este tipo de material é normalmente conhecido pelo seu nome comercial Kevlar® ou Twaron®.

Este material começou a ser utilizado para esta aplicação dada a sua elevada resistência e boa flexibilidade. As inserções constituídas por fibra de aramida são caracterizadas pela sua excelente flexibilidade que proporciona um bom nível de conforto no sapato aliado a baixos custos de produção. O facto de funcionarem como isolante térmico e eléctrico e não serem detectadas em detectores de metal, contribuiu também para que fossem bem aceites por parte da indústria. Existem várias inserções em fibra de aramida, estas diferem entre si principalmente na flexibilidade que cada inserção apresenta. Dependendo dos fabricantes, as inserções podem conter camadas diferentes. A Figura 10 mostra duas inserções em fibra de aramida, uma com camada que facilita a adesão à sola (A) e outra sem essa camada (B).

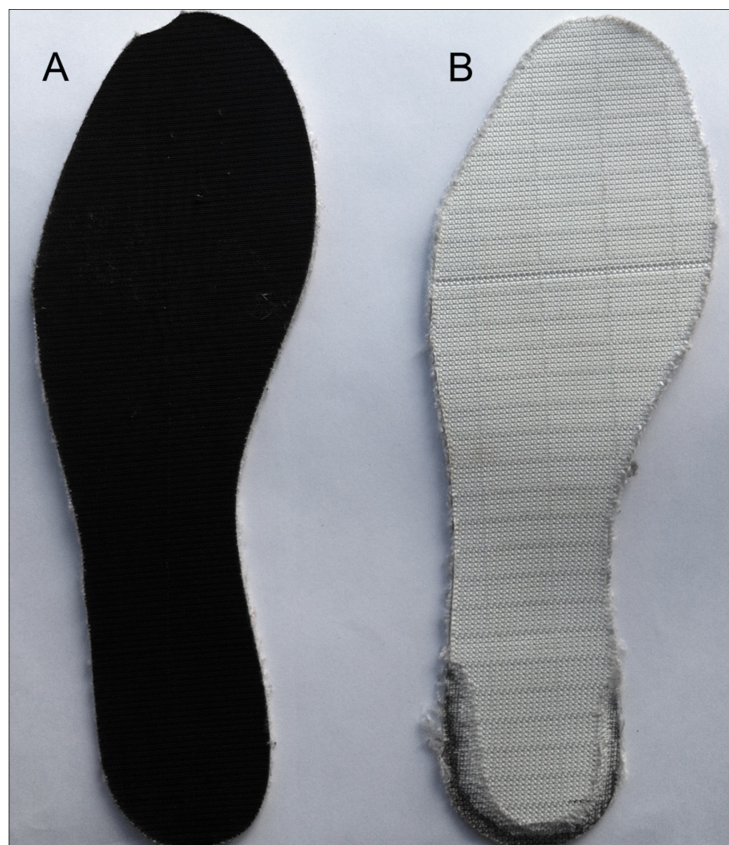


Figura 10 – Exemplos de diferentes inserções em fibra de aramida

As únicas desvantagens que este componente apresenta relativamente aos anteriores, estão relacionadas com a sua flexibilidade constante ao longo da sua área. Como já foi referido previamente é importante que as inserções sejam rígidas na zona traseira, impedindo a torção

dessa parte do pé e para que funcionem como elemento estrutural do sapato. Para resolver este problema em alguns casos é inserido um componente metálico na zona traseira com o objectivo de reforçar estruturalmente e impedir a torção (Figura 11). Outra desvantagem é que apesar de este material resistir as solicitações previstas na normalização, este material é penetrável por objectos muito finos (agulhas).



Figura 11 – Inseto anti penetração em fibra de aramida com reforço metálico

Inicialmente quando foram produzidas as primeiras inserções neste material, o seu custo era muito elevado, mais tarde começou a ser possível produzir estas inserções com um custo mais reduzido, em média apenas 25 cêntimos mais caras que as metálicas. Hoje em dia, a par das inserções metálicas, estas são as mais utilizadas a nível industrial devido às propriedades que oferecem.

Em 2003, Luigi Bettaglia [13], apresenta uma optimização das inserções metálicas simples. Este componente pretende reforçar estruturalmente a zona traseira da inserção, e assim evitar o uso dos outros componentes estruturais no sapato, evitando lesões na zona entre o arco do pé e o calcanhar e também reforçar a estrutura do sapato nessa zona. Reforço esse, conseguido através de nervuras criadas durante o fabrico da inserção. (Figura 12)

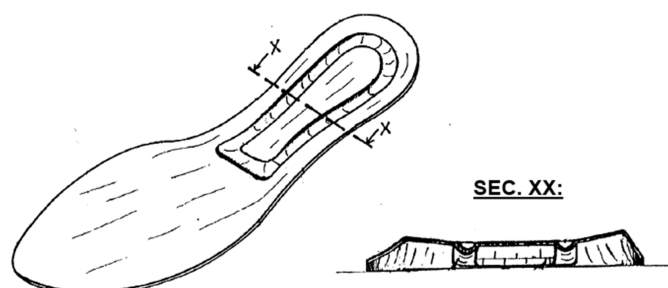


Figura 12 – Inseto anti penetração proposta por Luigi Bettaglia, adaptado de [13]

Na mesma época, foi criada também, a primeira palmilha amovível [14] capaz de conferir protecção anti penetração a qualquer sapato. Consiste numa palmilha projectada para ser colocada num sapato normal, constituída por materiais resistentes. Actualmente, já é possível encontrar no mercado várias palmilhas deste género, que diferem entre si principalmente nos materiais que as constituem.

A maioria é constituída no mínimo por três camadas de materiais diferentes. A primeira camada é constituída por aço inoxidável ou fibra de aramida e tem como função impedir a penetração de objectos afiados. A segunda camada é a que se encontra em contacto com o pé, por essa razão é constituída por poliuretano e a sua espessura e forma varia ao longo da área de maneira a que se adapte à planta do pé. A última camada tem como função absorver a energia dos impactos. Existem ainda alguns produtos com propriedades ortopédicas.

Este tipo de produto proporciona um óptimo nível de conforto ao utilizador, mas destaca-se principalmente pela sua versatilidade, uma vez que permite transformar um sapato comum num sapato com protecção anti penetração. Este produto, uma vez que é amovível não é reconhecido pela legislação actual como um EPI.



Figura 13 – Inserção anti penetração amovível SteelFlex [15]

Em 2008 Leo Sartor, Mario Callegari e Angelo Montemurro apresentam uma solução, que visa ser uma alternativa às inserções metálicas e as de fibra de aramida, com qualidade superior e colmatando as lacunas que cada uma delas possui. [16]

Esta solução apresenta uma variação da flexibilidade ao longo do seu comprimento, dividindo-se em duas zonas distintas. A parte da frente (A Figura 14), composta por várias camadas de fibra de aramida, confere uma boa flexibilidade permitindo que a sola acompanhe os movimentos do pé, já a zona do calcanhar (B Figura 14), é constituída por material compósito (*fibre-reinforced polymer matrix*), e é rígida, servindo de elemento estrutural para o sapato ao mesmo tempo que impede a torção nessa zona, evitando lesões no calcanhar.

Como a rigidez varia ao longo da sua área, o comprimento destas pode variar de forma a se adaptar melhor à forma de caminhar de cada utilizador. Esta palmilha contém uma outra variável que prevê uma camada extra de material metálico de modo a conferir uma maior protecção contra objectos mais finos.

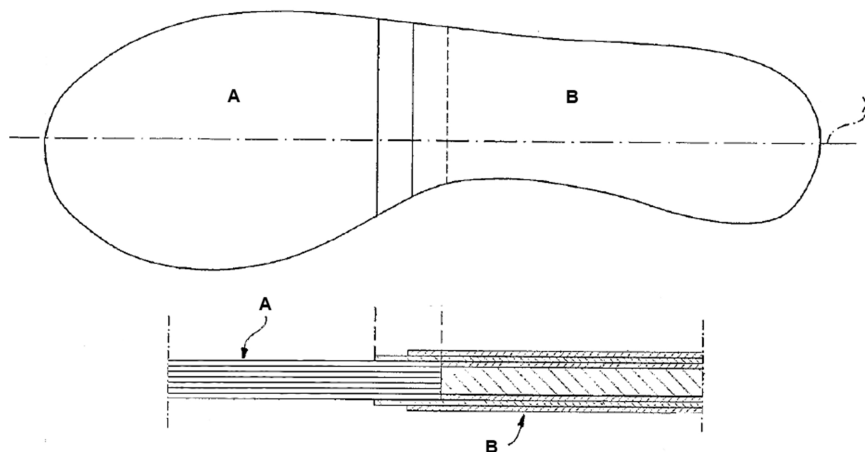


Figura 14 – Inserção anti penetração proposta por Leo Sartor, adaptado de [16]

Esta inserção é a primeira que combina o melhor das inserções metálicas com o melhor das inserções em fibra de aramida. A sua única limitação é o processo de fabrico complexo.

As inserções que combinam diferentes níveis de flexibilidade foram bem aceites a nível industrial. Alguns fabricantes foram desenvolvendo produtos semelhantes de acordo com as suas necessidades.

A inserção seguinte foi desenvolvida pela marca de calçado de segurança Lavoro, tal como a anterior, é constituída por diferentes materiais e contém uma zona mais flexível e uma zona rígida. A parte frontal é constituída por fibra de aramida (A - Figura 15) permitindo uma boa mobilidade do pé, já a zona do calcanhar é composta por várias camadas de materiais diferentes.

A protecção na zona do calcanhar é conferida por uma camada plástica de alta resistência (B - Figura 15), moldada de acordo com o arco que o pé descreve. Esta inserção contém mais duas camadas, uma camada superior de cortiça (C - Figura 15), que tem como objectivo absorver vibrações e aumentar o nível de conforto, e uma camada inferior de poliéster (D - Figura 15) para facilitar a adesão à sola do sapato. O que distingue este componente de todos os outros é uma pequena cavidade na camada plástica na zona do calcanhar, onde é inserido um material extremamente suave (E - Figura 15) de modo a potenciar o conforto do sapato. Contém ainda na camada plástica duas nervuras paralelas que reforçam estruturalmente a inserção.

Esta palmilha proporciona um óptimo conforto ao utilizador do sapato e tal como a anterior consegue aliar as vantagens das inserções em fibra de aramida com as vantagens das inserções rígidas. Da mesma forma que todas as inserções compostas por vários materiais, o seu processo de fabrico é complexo o que eleva o seu custo de produção.

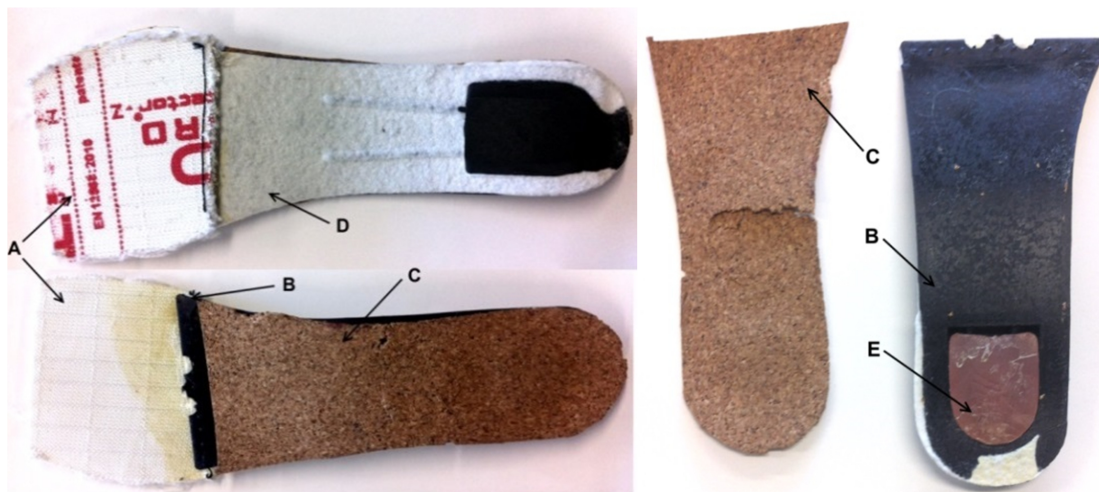


Figura 15 - Inserção anti penetração desenvolvida pela marca Lavoro

Pela análise dos principais componentes usados para a protecção do pé contra objectos afiados, é possível concluir que as inserções mais utilizadas pela indústria são as inserções mais simples, isto devido ao seu custo reduzido. Dado o interesse contínuo das indústrias de calçado de segurança em reduzir os custos de fabrico, as inserções mais baratas são geralmente seleccionadas em detrimento das mais complexas. Algumas marcas ou segmentos de sapatos, onde a qualidade e conforto tem uma maior importância, é comum o uso inserções compostas

mais complexas. As inserções compostas apresentam um custo de produção bastante mais elevado devido ao seu processo de fabrico complexo e aos vários materiais usados.

2.4.2 Biqueira de Protecção

A biqueira de protecção tem como função proteger os dedos do pé contra queda de objectos pesados e esmagamento. Juntamente com a inserção anti perfuração são os componentes de maior importância num EPI deste género.

Os primeiros componentes deste género a serem usados em calçado de segurança eram constituídos por materiais metálicos de grande espessura. Tal como o calçado de segurança e os restantes componentes em geral, a biqueira de protecção sofreu uma grande evolução. Actualmente existem biqueiras constituídas por vários materiais, sendo os mais comuns: aço, alumínio e materiais compósitos. Apesar da variedade existente, as biqueiras em aço são ainda as mais utilizadas, devido ao seu custo mais reduzido aliado às boas propriedades mecânicas. As biqueiras constituídas por materiais compósitos, apesar de não serem as mais utilizadas, tem uma grande importância, permitindo a construção de sapatos de segurança livres de materiais metálicos, o que como referido previamente, é importante para algumas indústrias. A Figura 16 mostra a diferença de tamanhos entre as biqueiras constituídas por aço e material compósito.



Figura 16 – Biqueira de protecção metálica e biqueira de protecção em material compósito [17]



2.5 Processo de Fabrico

O Processo de fabrico de um sapato de segurança tem por base o fabrico de um sapato convencional. Este difere apenas nas etapas onde são montados os componentes de segurança. O processo de fabrico de um sapato de segurança é um processo complexo onde a experiência dos operários continua a ser um factor preponderante no sucesso e na qualidade do produto final.

A inserção e montagem dos componentes de protecção (testeira e palmilha anti perfuração) é a etapa mais importante. Assim é necessário garantir que esses componentes respeitem as dimensões e tolerâncias especificadas pelos fabricantes e pela normalização associada.

Não existe apenas uma forma de produção para todos os segmentos de calçado de segurança. O processo produtivo apresentado é o mais comum entre este tipo de indústria, cada etapa pode variar de acordo com o fabricante e com o modelo de sapato em questão. As principais etapas do processo produtivo são as seguintes:

- Concepção e desenvolvimento;
- Corte;
- Costura;
- Montagem;
- Solado;
- Acabamento.

O diagrama da Figura 17 corresponde ao processo de fabrico de um sapato de segurança, e as principais matérias-primas usadas em cada etapa deste processo.

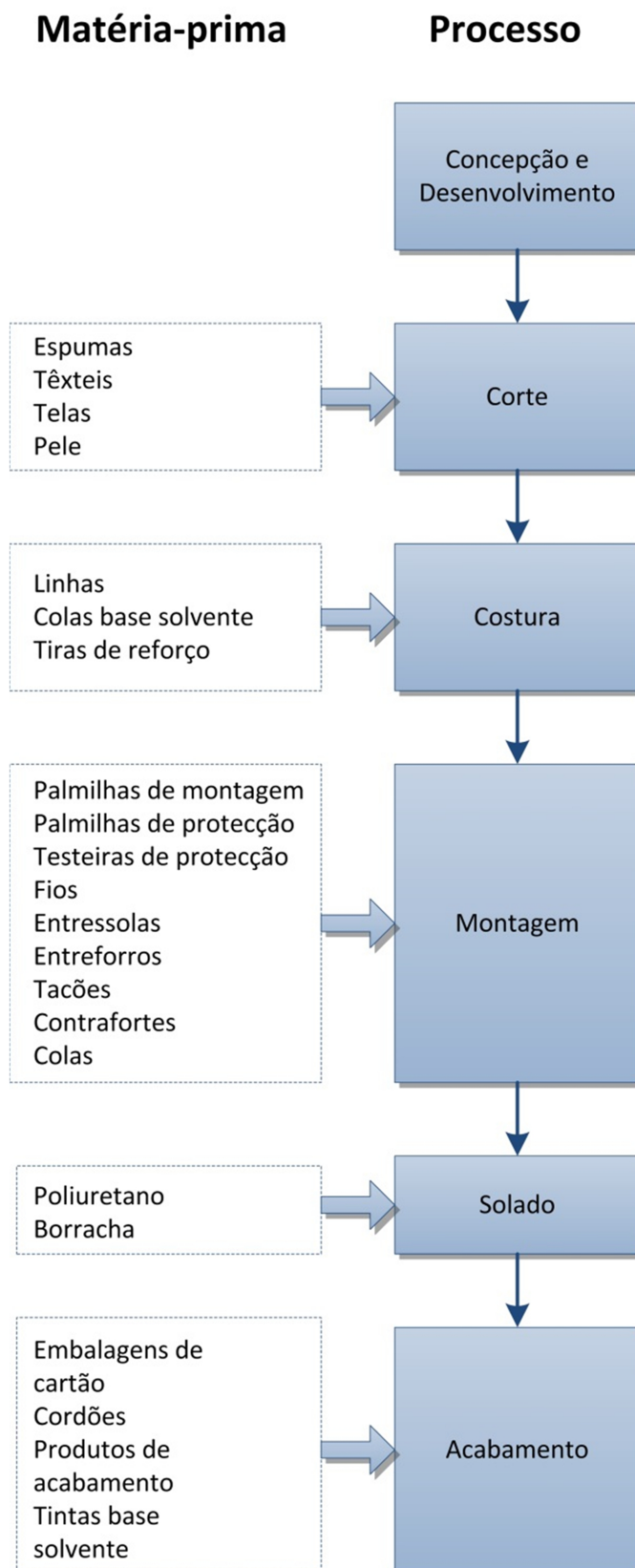


Figura 17 – Diagrama do processo de fabrico do calçado de segurança, adaptado de [18]



- Concepção e desenvolvimento;

É na primeira etapa que a concepção e desenvolvimento de um novo produto são feitos. É efectuado um estudo de mercado de forma a determinar as suas necessidades e de seguida são dados os primeiros passos no sentido de conceber os produtos que o mercado reclama. É também nesta fase que o sapato é desenhado e o seu fabrico é projectado de modo a definir os materiais e processos necessários.

A concepção e desenvolvimento são também responsáveis por alterações que se de efectuem aos modelos já existentes e as respectivas alterações ao nível de cortantes, ferramentas ou moldes.

- Corte

De acordo com o que foi definido na etapa anterior, a matéria prima gáspea (parte exterior superior do calçado, também denominado por corte) é cortada de acordo com o estilo do sapato. Neste processo são utilizados cortantes (molde de aço de um ou dois gumes) e prensas (balancé de braço ou ponte).

Este processo ainda não se encontra completamente automatizado, em grande parte das indústrias é realizado por profissionais experientes, em alguns fabricantes mais evoluídos tecnologicamente já é comum o uso de ferramentas assistidas por computador, *Computer Aided Design* (CAD) e *Computer Aided Manufacturing* (CAM). Nesta etapa são também efectuadas marcações que servirão de base para a etapa seguinte.

- Costura

A secção de costura é normalmente dividida em duas etapas, pré costura e costura. Na pré costura, as peças são tratadas de modo a facilitar a costura propriamente dita. Depois disto, as peças são cosidas dando origem a gáspea. Este processo pode ser realizado automaticamente através de equipamentos de controlo numérico sendo que, na maioria das empresas ainda é efectuado manualmente.

- Montagem

Nesta etapa a gáspea e outros componentes, incluído os componentes de protecção, são montados utilizando procedimentos e equipamentos específicos. É nesta etapa que o sapato começa a ganhar forma. O processo inicia-se com a junção da palmilha de montagem (C - Figura 18) à gáspea (A - Figura 18), recorrendo ao auxílio de uma forma (B - Figura 18) como mostra a figura 16. A forma tem como função auxiliar a montagem dos diversos componentes, e conferir ao sapato a forma do pé.



Figura 18 – Processo de montagem de um sapato

A palmilha de montagem pode ser anexada à gáspea por dois processos distintos, pode ser colada ou cosida. Quando é cosida, o processo denomina-se strobagem.

Depois disto, o conjunto gáspea mais palmilha de montagem são sujeitos a outras operações de montagem efectuadas por máquinas específicas: de fechar bicos e calcaneiras, máquina de aplicar e reactivar cola no corte e na sola, fornos de estabilização, máquina de pontear, prensa, entre outros.



- Sola

Nesta etapa é colocado o solado ou sola dando assim origem a um sapato. As solas podem ser constituídas por materiais distintos, sendo que os mais comuns são borracha e poliuretano (PU). Dependendo do material, as solas são produzidas por processos distintos, vulcanização no caso da borracha ou por injeção no caso do PU.

O tipo de material que constitui a sola tem também influência no processo utilizado para juntar a sola ao resto do sapato.

- Acabamento

Por fim, é efectuado o acabamento. Nesta etapa o calçado é desformado (é retirada a forma) e são feitos os retoques finais, tais como pintura, enceramento, colocação de forros, entre outros. O acabamento varia bastante de acordo com o fabricante e com o modelo de sapato em questão. Alguns fabricantes utilizam nesta etapa, equipamentos que verificam a conformidade dos componentes de segurança, de modo a garantir uma maior qualidade dos produtos produzidos.

2.5.1 Montagem da Inserção Anti Penetração

A montagem da inserção anti penetração no sapato de segurança pode ser efectuada de várias formas, dependendo do tipo de inserção e do fabricante em questão. A inserção de protecção pode ser colada na palmilha de montagem (Figura 20) durante a fase de montagem ou então pode substituir a palmilha de montagem e ser strobilada à parte superior do sapato (Figura 19). Esta última opção apenas é possível com inserções em fibra de aramida. Destes processos o mais económico e o que confere uma melhor flexibilidade ao sapato, é quando a inserção é directamente strobilada, uma vez que deixa de ser necessário o uso da palmilha de montagem.



Figura 19 – Exemplo de sapato strobelado



Figura 20 – Inserção anti penetração colada na palmilha de montagem

A inserção anti penetração pode também ser inserida na fase de junção da sola. Alguns produtores inserem a palmilha anti penetração no solado quando este é produzido, que posteriormente juntarão ao sapato. Na Figura 21 pode-se observar uma inserção anti penetração inserida numa sola antes de ser junta ao sapato.



Figura 21 – Inserção anti penetração inserida na sola do sapato

O processo de montagem da inserção anti penetração tem uma enorme importância no desenvolvimento de um novo componente. Uma nova inserção anti penetração deve adaptar-se ao processo de fabrico já estabelecido, ou facilitar este processo, caso contrário esta não será aceite pela indústria.





3 PROJECTO ASSISTIDO POR COMPUTADOR DE UMA INSERÇÃO ANTI PENETRAÇÃO



3.1 Sistemas CAD

A representação geométrica computadorizada iniciou-se em maior escala no final dos anos 60, início dos anos 70, devido ao advento dos computadores. Esta tecnologia surgiu como um grande avanço no processo de desenvolvimento de um produto. Recorrendo a bases matemáticas esta tecnologia permite a representação de curvas e superfícies, e a possibilidade de modificações rápidas num desenho. Nos anos 80 surgem as curvas NURBS, tornando-se a base de todos os sistemas CAD. Estas curvas proporcionam grandes vantagens, permitindo a representação de circunferências e elipses, aumentando a flexibilidade dos sistemas CAD. [19]

Os sistemas CAD tiveram um enorme impacto em toda a dinâmica industrial, revolucionando por completo o trabalho de engenheiros e designers. Seria impensável nos dias de hoje o desenvolvimento de um produto sem recorrer ao desenho assistido por computador. Este desenvolvimento levou a uma alteração profunda no processo de concepção de um produto em todo o mundo. Existem várias vantagens na sua utilização, desde a minimização dos erros de concepção, aumento da produtividade, aumento da qualidade de concepção e reutilização de projectos já existentes. Estes factores contribuíram para a implementação dos sistemas CAD nos mais diversos ramos da engenharia, arquitectura e design.

Avanços na própria tecnologia CAD tornaram possível o desenvolvimento de novas capacidades como a parametrização de dados. Os principais sistemas de CAD existentes no mercado permitem a parametrização dos modelos criados. Assim, é possível realizar facilmente alterações no modelo pela introdução de novos parâmetros. Esta ferramenta é extremamente útil para refinar um produto até que este corresponda as características pretendidas. Em desenhos complexos e constituídos por várias peças esta ferramenta permite a fácil correcção de erros. Outra grande vantagem da parametrização é a possibilidade de criar um modelo base que pela alteração dos seus parâmetros origina vários produtos diferentes.

A tecnologia CAD aliada à necessidade de obtenção de tempos cada vez mais curtos desde a ideia a execução final da peça, impulsionou o desenvolvimento de outras tecnologias inerentes ao desenho assistido por computador. As tecnologias CAE/CAM sofreram também um grande desenvolvimento tornando-se ferramentas indispensáveis para a concepção de um produto.



O processo de engenharia inversa tem por base esta tecnologia. O objectivo final do processo de engenharia inversa é obter um modelo CAD, esse modelo pode ser usado para replicar, ou criar um novo produto com base num objecto pré existente. Consequentemente, a evolução da engenharia inversa esta directamente associada à evolução da tecnologia CAD.

3.2 Engenharia Inversa

Engenharia Inversa é uma técnica de desenvolvimento de um novo produto usada numa grande variedade de actividades. Existem duas variáveis associadas a esta metodologia, enquanto numa apenas está em causa a forma da superfície de um componente pré existente, a outra variável apresenta uma interpretação mais ampla, envolvendo a compreensão de mecanismos e materiais. [20]

Neste projecto serão usadas essas duas variáveis. Através desta metodologia pretende-se obter todo o tipo de informação e conhecimento necessários para a concepção de uma nova inserção anti penetração para calçado de segurança.

Enquanto a engenharia convencional transforma conceitos e projectos de engenharia em peças reais, a engenharia inversa como o próprio nome indica, apresenta uma perspectiva diferente. Em engenharia inversa, componentes pré existentes são transformados em modelos CAD, que posteriormente podem ser alterados para a criação de novos produtos com base nos produtos já existentes. A existência de um modelo computacional proporciona enormes ganhos na eficiência, qualidade e fabrico de um projecto.

Esta metodologia é aplicada em diversas áreas distintas. Muitas vezes é necessário para replicar uma peça da qual não existem desenhos ou documentos originais. Pode também ser utilizada quando se pretende melhorar um componente existente e para isso são necessárias análises e modificações do componente original. Outra aplicação importante, é a personalização de superfícies de acordo com a morfologia do corpo humano, usada para a criação de produtos, tais como próteses, capacetes ou vestuário especial.

Devido aos grandes beneficios que a engenharia inversa oferece ao desenvolvimento de um produto, esta metodologia é amplamente utilizada em indústrias desde a engenharia militar, ciências biomédicas, engenharia aeronáutica, entre outros. Com o advento da prototipagem

rápida e a crescente comercialização das impressoras 3D, esta metodologia tornou-se uma ferramenta fundamental, permitindo replicar uma grande gama de peças e objectos.

A primeira etapa para o desenvolvimento de um produto por engenharia inversa é normalmente a aquisição de dados. Esta etapa tem uma importância crucial no desenvolvimento futuro do projecto. Para isso são usados Scanners 3D que fornecem um conjunto de informação relativa à superfície da peça em questão. Existem vários tipos de scanners 3D, o equipamento escolhido deve ser o que melhor se adapta a peça em questão. A informação fornecida por estes equipamentos permite também a obtenção de informações como o volume e área da superfície da peça. A informação recolhida tem como objectivo permitir a obtenção de um modelo CAD 3D, no entanto essa informação tem de ser previamente tratada. O tratamento de dados é um problema difícil e complexo, uma vez que não existe ainda uma solução totalmente automática. Nesta dissertação são exploradas duas metodologias distintas de modo a seleccionar a que melhor se adapta ao modelo das inserções. A Figura 22 mostra as várias etapas do processo de engenharia inversa.

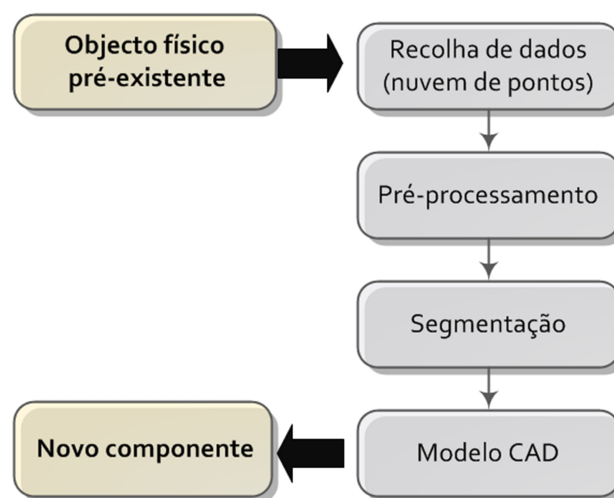


Figura 22 – Fluxograma do processo de Engenharia Inversa, adaptado de [21]

3.2.1 Processos de Recolha de Dados e Aquisição de Forma

A aquisição de forma de um objecto físico é um passo crucial no processo de engenharia inversa. Esta importância deve-se não só ao facto de ser o primeiro passo mas também porque uma aquisição de dados mal efectuada irá comprometer todo o processo. Apenas é possível



obter um bom resultado final se a tecnologia seleccionada para a aquisição de dados for adequada a peça em causa.

Na aquisição de dados pretende-se obter informação relativa à superfície de um respectivo objecto. Desta forma, os equipamentos usados interagem com a superfície da peça de modo a conseguir obter informação sobre a posição de diferentes pontos no espaço. As coordenadas desses pontos são então usadas para auxiliar a criação do modelo CAD 3D. A informação destes equipamentos é transmitida normalmente sobre a forma de nuvem de pontos.

Existem vários equipamentos de aquisição de dados para engenharia inversa, estes podem ser divididos em dois grandes tipos: aquisição de pontos com contacto e sem contacto mecânico. A continuidade como é feita a digitalização define a estratégia utilizada, que pode ser por varrimento ou ponto a ponto. Ponto a ponto, significa que os pontos são adquiridos de forma discreta. Varrimento, significa que a digitalização é realizada de uma forma contínua ao longo de uma linha ou trajectória. A estratégia seleccionada deve ser adequada à peça e à tecnologia em questão.

Os equipamentos de aquisição de dados por contacto usam braços mecânicos para tocar na superfície do objecto, enquanto sensores determinam as coordenadas relativas da superfície do objecto. Este tipo de equipamentos apresenta algumas limitações para peças com geometrias complexas, nestes casos é frequente existirem zonas onde os braços robóticos não conseguem tocar. Outra limitação destes equipamentos, diz respeito ao tipo de material, uma vez que para registar um ponto o apalpador sujeita o material a uma determinada pressão, tornando impossível a digitalização precisa de materiais macios e flexíveis. Equipamentos que usam contacto para aquisição de forma são mais robustos do que os equipamentos de aquisição de dados sem contacto, estes normalmente proporcionam maior precisão, maior repetibilidade e menor ruído. Em contrapartida a aquisição de dados é mais demorada.

Existem diferentes equipamentos deste tipo, sendo que os mais populares são as máquinas de medir por coordenadas (MMC). Estas máquinas podem ser programadas para seguir caminhos ao longo da superfície de um determinado objecto obtendo medições precisas e livres de ruído.

[20]



Os equipamentos de aquisição de dados sem contacto permitem a obtenção de informação relativa a uma superfície, sem recorrer qualquer tipo de contacto mecânico. Estes equipamentos usam uma fonte de energia (laser, luz branca, microondas) para interagir com o objecto, permitindo obter informação referente à posição relativa da superfície. A tecnologia mais utilizada dentro destes dispositivos é a triangulação óptica, onde um feixe luminoso incide sobre as superfícies da peça e o ângulo da reflexão é medido por um sensor óptico.

Apesar da boa capacidade de aquisição de dados num curto período de tempo, e uma grande flexibilidade, esta tecnologia apresenta também algumas limitações. Estes equipamentos são incapazes de adquirir correctamente informação em superfícies paralelas à direcção do eixo do laser. Quando os objectos são constituídos por superfícies brilhantes, escuras ou transparentes torna-se impossível para sensor receber informação correctamente. Nestes casos é frequente pintar os objectos para uma correcta digitalização.

Os equipamentos de aquisição de dados sem contacto são usados em áreas da engenharia onde a velocidade de aquisição de dados tem um peso superior à precisão, ou então quando as características do material não permitem uma digitalização com contacto. A tolerância típica dos scanners de contacto varia entre os 0.01 e os 0.02 mm, enquanto nos scanners sem contacto varia entre 0.025 e 0.2 mm. [22] O seguinte diagrama mostra os vários métodos de levantamento de forma.

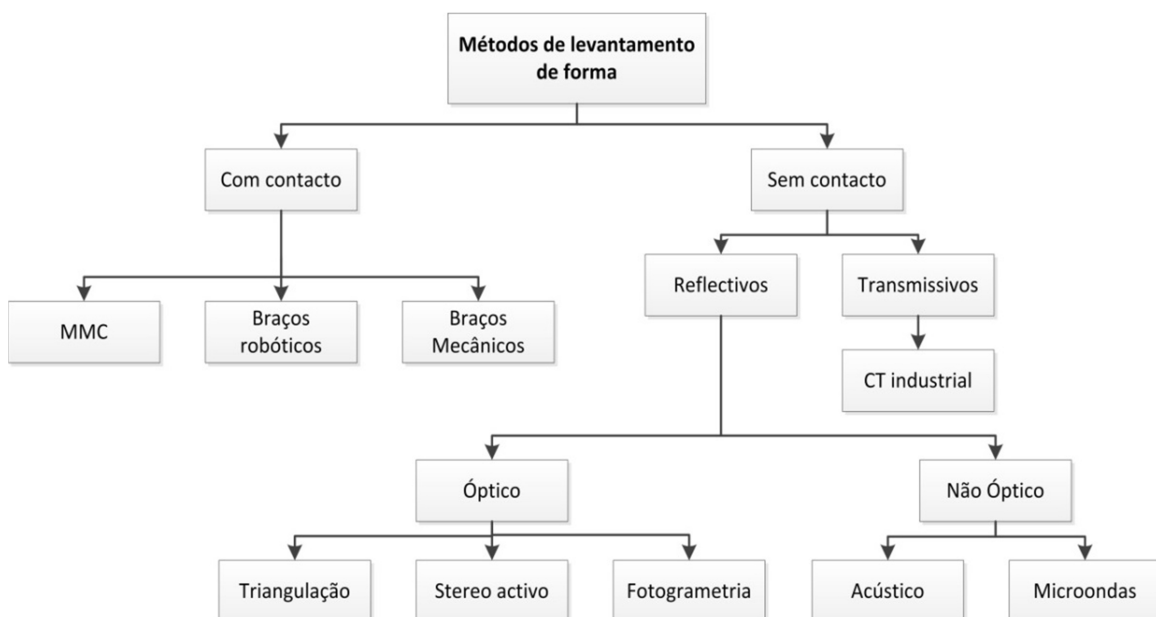


Figura 23 - Técnicas de digitalização 3D para engenharia inversa. Adaptado de [23]

3.2.2 Pré-processamento e Tratamento de Dados

Uma vez que não existe ainda uma ferramenta completamente automatizada que permita a criação de um modelo CAD a partir da informação gerada na aquisição de dados, essa informação necessita ser tratada antes da construção do modelo 3D. O pré processamento dessa informação tem impacto directo na qualidade do modelo CAD final. A fim de melhorar a racionalidade e integridade dos dados, as nuvens de pontos precisam geralmente de algum pré-processamento, tal como o registo das nuvens de pontos num sistema de coordenadas, e remoção dos *outliers*. [24]

Outliers são pontos que apresentam um grande afastamento dos restantes, e são originados por limitações dos equipamentos ou erros de medição. Independentemente do equipamento utilizado existem sempre *outliers*. Estes pontos devem ser removidos de uma nuvem de pontos para que não gerem uma representação errada do objecto em causa. A sua eliminação não é uma tarefa trivial, para isso existem vários *softwares* que baseados em dados estatísticos auxiliam esse processo.

Dependendo do dispositivo de recolha de dados utilizado, o pré-processamento deve ser diferente, conseqüentemente, é sempre necessário ter em consideração que tipo de equipamento foi utilizado. A Figura 24 mostra uma nuvem de pontos antes e depois da remoção dos respectivos *outliers*.

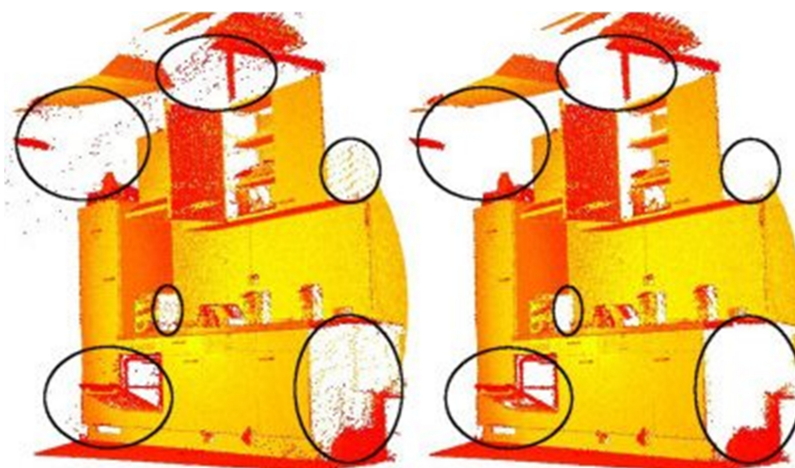


Figura 24 – Exemplo de nuvem de pontos antes e após a remoção dos *outliers* [25]



Em dispositivos de recolha de pontos por contacto existe em geral, menos ruído e menos *outlier*, tornando o pré-processamento uma tarefa mais fácil. Isto acontece porque normalmente são usadas estratégias de recolha de pontos adaptadas para cada objecto em particular, ao contrário do que acontece em dispositivos de aquisição de dados sem contacto. Nestes dispositivos a recolha de dados é feita por varrimentos, recolhendo uma quantidade de informação maior, o que contribui para um maior ruído e conseqüentemente mais *outliers*. A menor precisão e os princípios de funcionamento dos dispositivos de levantamento de dados sem contacto induzem também a alguns erros de medição.

Alguns autores defendem que uma segmentação da peça a quando da digitalização leva a melhores resultados na nuvem de pontos final no caso de superfícies simples. [26]

Após o pré-processamento de dados e antes de obter o modelo CAD final, é comum proceder a um seccionamento que irá permitir a montagem das superfícies constituintes do modelo CAD. Este passo é o mais trabalhoso e demorado no processo de engenharia inversa. São usadas actualmente em diversos estudos várias técnicas de segmentação diferentes. A técnica usada deve, como em todos os passos do processo de engenharia inversa, ser escolhida de acordo com o objecto em questão. É também necessário ter em consideração a precisão e a finalidade que o modelo tridimensional terá. Existem aplicações de engenharia onde o design é mais importante do que a exactidão dimensional, logo o forma como o modelo CAD é construído será diferente. Existem vários softwares e rotinas que adaptadas a casos particulares facilitam esta etapa, proporcionando enormes ganhos de tempo.

3.2.3 Engenharia Inversa no Calçado de Segurança

A engenharia inversa é uma técnica amplamente utilizada em toda a indústria do calçado. A evolução dos sistemas CAD/CAM veio permitir às empresas deste sector utilizarem esta técnica para a criação e desenvolvimento de novos produtos. Em indústrias de produção de calçado é comum o uso de engenharia inversa para o desenvolvimento de novos modelos a partir de modelos antigos. Alguns designers usam também a engenharia inversa para a criação dos modelos tridimensionais das suas criações.



No calçado de segurança a engenharia inversa tem sido usada para o desenvolvimento e melhoria de componentes de protecção. Sérgio L. Costa (2013), recorre a estas técnicas para o desenvolvimento de uma nova biqueira de protecção completamente inovadora. Esta nova biqueira de protecção apresenta uma diminuição significativa de material, sem por em causa o nível de protecção conferida. Estes progressos apenas foram possíveis com o contributo da engenharia inversa para a alteração e manipulação da superfície da biqueira. [17]



3.3 Modelação Tridimensional Assistida

O desenvolvimento de uma nova inserção anti penetração foi realizado, como já referido, recorrendo a técnicas de engenharia inversa. Sendo assim antes de proceder à criação de uma nova inserção anti penetração foram criados modelos CAD tridimensionais relativos a algumas inserções já existentes. Após a obtenção destes modelos tridimensionais estes serão alterados de acordo com todas as especificações e parâmetros definidos para a nova inserção anti penetração.

Nesta secção será explicado de que forma foi obtidos os modelos CAD, isto é, serão abordadas as principais etapas de engenharia inversa aplicada a este caso em específico. Os fundamentos teóricos referente as várias etapas deste processo encontram-se explicadas com maior detalhe nos subcapítulos anteriores.

3.3.1 Aquisição de Dados

A variável de maior importância na aquisição de dados é a escolha do equipamento a utilizar. Neste projecto foram usados dois equipamentos de aquisição de dados distintos, uma máquina de medir por coordenadas e um equipamento de aquisição de dados por laser. A escolha de dois equipamentos distintos deve-se ao facto das inserções digitalizadas apresentarem propriedades diferentes, enquanto uma apresenta superfícies livres e materiais flexíveis, outra é rígida e plana.

A possibilidade de usar dois métodos distintos, representa um grande interesse a nível didáctico, uma vez que permitiu conhecer e compreender de forma prática todas as diferenças inerentes a estes equipamentos, não só na aquisição de dados mas também no processamento e criação do modelo CAD.

3.3.1.1 Aquisição de Dados por Contacto

O dispositivo de obtenção de dados por contacto utilizado, foi uma máquina de medir por coordenadas existentes no laboratório de metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica (Mitutoyo 8HN706). Este equipamento permite obtenção de pontos com uma distância característica de 0.5 μm e exactidão na ordem dos 0.03 mm.



Máquina de medir por coordenadas é o instrumento mais usado dentro dos que utilizam contacto para aquisição de dados. Este tipo de equipamento utiliza braços mecânicos para entrar em contacto com a superfície, enquanto sensores detectam as coordenadas de cada ponto. Uma máquina de medir por coordenadas pode ser controlada manualmente por um operador especializado ou por um computador.

Apesar de permitir a obtenção de uma nuvem de pontos com pouco ruído e alta precisão, o acesso a algumas superfícies de peças complexas pode ser complicado ou mesmo impossível, limitando o uso deste equipamento. A recolha de pontos recorrendo a um equipamento deste género, devido à sua elevada exactidão, é um processo muito lento comparado com processos de recolha de pontos sem contacto. Desta forma, ao contrário do que acontece nos dispositivos de aquisição de dados sem contacto, é necessário definir uma estratégia de recolha de pontos ao longo da superfície da inserção.

Antes de proceder à medição, tendo em conta a forma da inserção digitalizada, foi definida a estratégia de medição a usar. Por se tratar de uma peça relativamente simples sem alterações significativas na sua espessura, apenas se tornou necessário obter as coordenadas de pontos nas extremidades da inserção, como mostra a Figura 25.

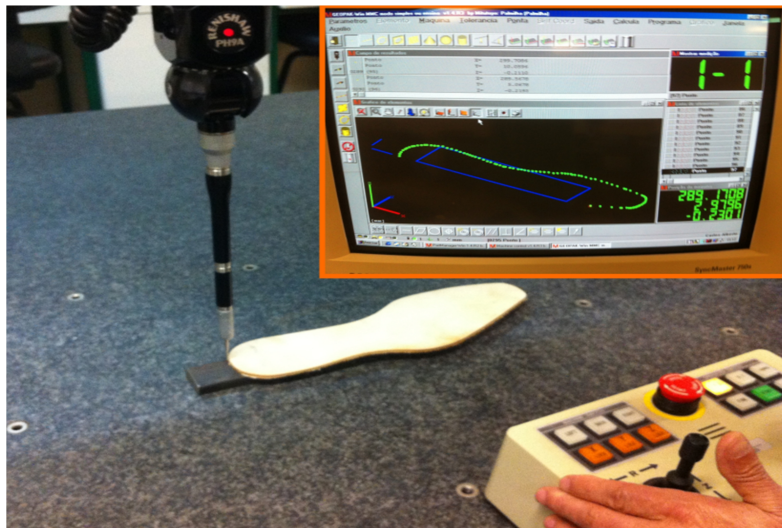


Figura 25 – Aquisição de dados por contacto recorrendo a MMC Mitutoyo 8HN706

3.3.1.2 Aquisição de Dados sem Contacto

Para o levantamento de dados das restantes inserções foi utilizado o scanner laser Roland LPX-600 (Figura 26).



Figura 26 – Equipamento de obtenção de dados sem contacto Roland LPX-600

O equipamento Roland LPX-600, permite a obtenção de pontos sem contacto que possibilita obter nuvens de pontos através de princípios ópticos. A determinação da localização dos pontos dos objectos é efectuada por triangulação. É utilizada a localização e ângulos entre o raio laser e o sensor óptico para determinar as coordenadas de cada ponto. Dispositivos deste género usam uma fonte de luz (laser neste caso), que é projectada com um ângulo conhecido para a superfície. Um sensor óptico recebe a luz reflectida pela superfície e através de triangulações geométricas entre os ângulos e a distância do objecto ao ponto, as suas coordenadas são calculadas (Figura 27).

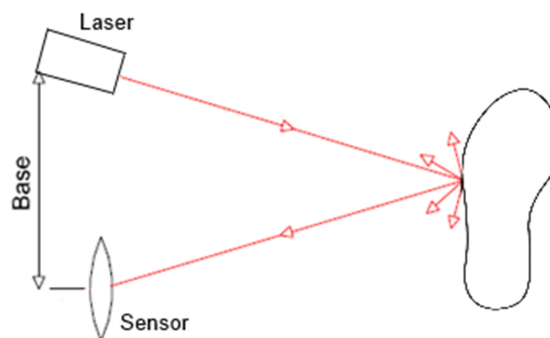


Figura 27 – Triangulação laser efectuada pela Roland LPX-600



No caso deste equipamento, o laser e o sensor estão montados numa plataforma que apenas se movimentam segundo o eixo do z . Existe um prato rotativo que confere à peça um movimento circular, devido a isto o scanner apresenta dois modos de funcionamento, *plane scan* e *rotary scan*. Este scanner permite a obtenção de pontos com uma repetibilidade de aproximadamente 0.05 mm, e possibilita ao utilizador alterar o *scanning pitch*, tendo esta variável influência directa no tempo que dura o processo. Os valores mais baixos permitidos para este equipamento são de 0.2 mm *plane scanning* e 0.18 graus para *rotary scanning*.

As primeiras digitalizações efectuadas neste equipamento não geraram resultados favoráveis devido a problemas comuns nestes tipos de equipamentos.

Um dos problemas está relacionado com a cor das inserções, que impedia uma boa aquisição de pontos. Para melhorar os resultados obtidos as inserções foram pintadas com uma tinta de cor branco mate, uma vez que quanto mais clara e opaca for a superfície, mais fácil é para o sensor detectar o raio laser (Figura 28). [27]

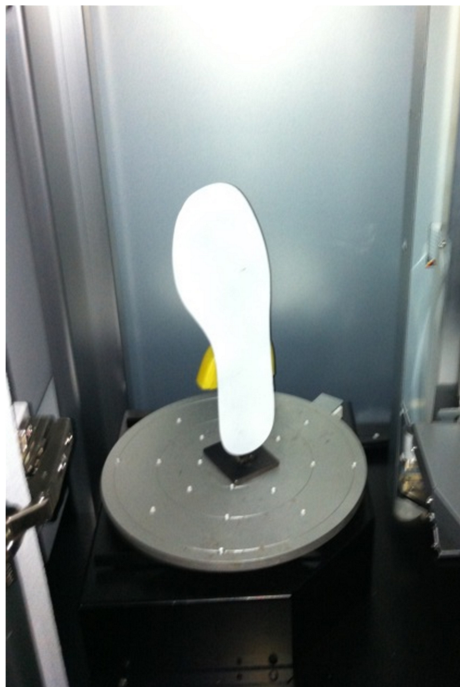


Figura 28 – Inserção anti penetração no interior da Roland LPX-600

Outro problema encontrado está relacionado com o ângulo a que o objecto se encontra no interior do equipamento. Depois de várias digitalizações concluiu-se que o ângulo tinha uma grande influência na qualidade da digitalização obtida. Para facilitar o processo foi usada uma

estrutura auxiliar fixada no prato rotativo do equipamento, que permite variar de forma facilitada o ângulo da peça. A Figura 29 mostra diferentes nuvens de pontos obtidas com o componente colocado em ângulos diferentes.

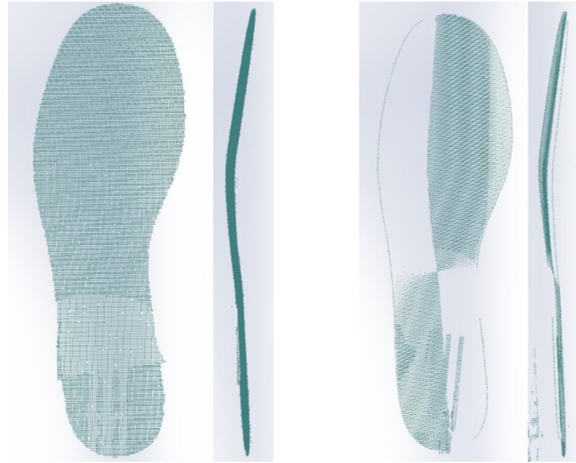


Figura 29 – Influencia do angulo de digitalização na qualidade da nuvem de pontos final

A última inserção a ser digitalizada apresentou algumas dificuldades, que foram resolvidas de forma a obter uma digitalização com boa qualidade. Uma vez que é composta por vários materiais (mais informação sobre os materiais constituintes na secção 2.4.1), as primeiras digitalizações revelaram-se com fraca qualidade, faltando mesmo informação sobre algumas partes do componente. Para solucionar o problema, esta inserção foi dividida em várias partes que posteriormente foram pintadas e digitalizadas separadamente como mostra a Figura 30.



Figura 30 – Pré tratamento da inserção anti penetração composta



3.3.2 Obtenção do Modelo Sólido 3D

Tendo em vista a obtenção de um modelo CAD tridimensional das inserções, foi efectuado o processamento e tratamento dos dados obtidos no processo de aquisição de forma. Para isso, realizou-se uma análise de softwares e rotinas de forma a identificar a que melhor se adapta a este caso particular.

Existem várias abordagens possíveis para obter um modelo sólido 3D. Neste caso o estudo focou-se na comparação entre duas metodologias. Uma das metodologias testada, já validada em componentes para calçado de segurança, recorre a algoritmos em MATLAB para a criação de curvas que darão origem ao modelo CAD final. [28] Por outro lado, a outra metodologia testada corresponde a um suplemento do software SolidWorks que auxilia, passo a passo, a criação do modelo final.

3.3.2.1 Metodologia para Criação de Componentes para Calçado de Segurança Usando Engenharia inversa.

Esta metodologia foi desenvolvida e testada para a criação de novos componentes de protecção para calçado de segurança, encontrando-se assim validada para a obtenção de um modelo CAD completamente funcional. O desenvolvimento desta metodologia culminou com uma publicação na conferência internacional ASME 2013, o que salienta a potencialidade desta metodologia a nível industrial.

A principal diferença que esta metodologia apresenta comparativamente com outras usadas para este propósito, é o facto de reduzir os passos necessários até ao modelo final. A redução dos passos torna a criação de um novo produto, por engenharia inversa, uma tarefa significativamente mais rápida e simples, factores estes que no contexto industrial actual são de enorme importância.

Como todas as rotinas para engenharia inversa, esta metodologia inicia-se com aquisição de dados, tendo esta etapa neste caso, um impacto ainda maior no sucesso do modelo CAD final. A nuvem de pontos proveniente da digitalização é então inserida no programa em MATLAB que automaticamente secciona os pontos segundo um eixo pré definido, e gera curvas que permitem através da criação de superfícies obter um modelo sólido tridimensional. Antes de inserir a

nuvem de pontos no programa apenas é necessário proceder à orientação da mesma segundo um sistema de eixos. A Figura 32 mostra uma visão geral desta metodologia no caso da biqueira de protecção.

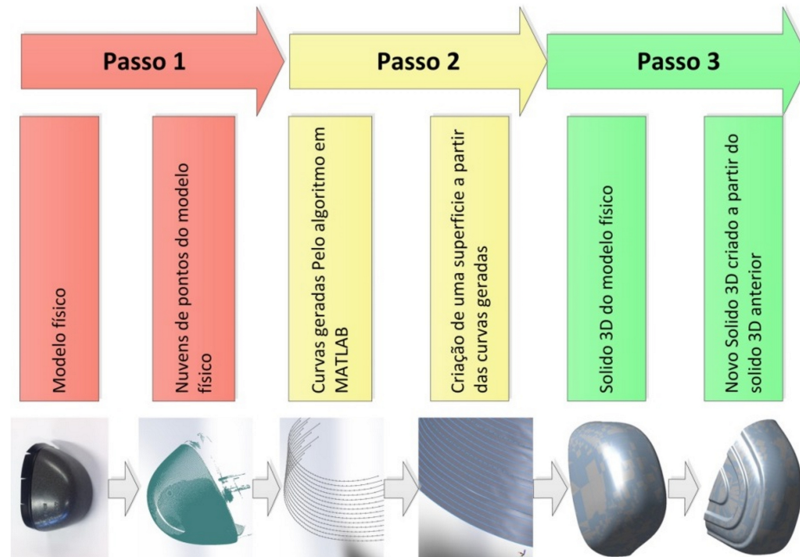


Figura 31 – Visão geral da metodologia usada para o desenvolvimento de uma nova biqueira de protecção

Relativamente à biqueira de protecção, esta metodologia apresentou excelentes resultados. Por se tratar de um objecto com superfícies complexas de forma livre e a nuvem de pontos proveniente da aquisição de dados ser bastante pesada, a criação de um modelo tridimensional seria demorada e trabalhosa sem o uso desta metodologia.

Devido ao sucesso noutros componentes para calçado de segurança, esta metodologia foi testada para o caso das inserções anti penetração. Os resultados obtidos por esta abordagem não foram favoráveis. Apesar da facilidade e rapidez, os resultados finais não permitiram a construção de um modelo sólido tridimensional.

Esta metodologia secciona a nuvem de pontos num eixo pré definido criando curvas para as diferentes secções. A Figura 32 ilustra o seccionamento efectuado pela metodologia no caso das inserções anti penetração. Apesar de ser possível construir um modelo sólido recorrendo a estas curvas a sua qualidade seria reduzida. Neste caso em particular, em vez de curvas ao longo da secção pretende-se obter curvas de fronteira, que permitirão obter um modelo sólido com boa qualidade.

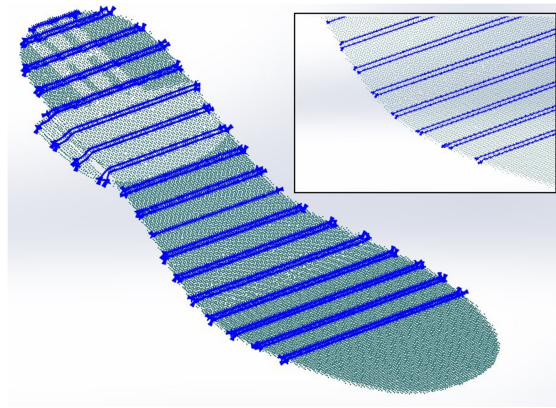


Figura 32 – Curvas de secção obtidas através da nuvem de pontos da inserção anti penetração

3.3.2.2 SolidWorks – Scan to 3D

A segunda metodologia testada recorre ao suplemento Scan to 3D do software SolidWorks. Este suplemento auxilia a criação de um sólido, partindo de uma nuvem de pontos através de um conjunto de passos propostos.

Apesar de esta metodologia ser mais demorada e trabalhosa que a anterior, é relativamente mais rápida e fácil que outras utilizadas para este propósito. Esta metodologia requer algum conhecimento prévio de conceitos e métodos de engenharia inversa para que o modelo final apresente uma boa qualidade.

Ao contrário de algumas metodologias onde os dados obtidos necessitam ser tratados previamente, para remoção do ruído e suavização da nuvem de pontos, e só depois ser construído o modelo CAD, este software permite efectuar todos os passos no mesmo suplemento. Outra das vantagens deste software está relacionada com análises por elementos finitos. O modelo CAD obtido no final é compatível com todo o tipo de análises, quer sejam estáticas ou dinâmicas, que podem ser efectuadas no próprio software recorrendo a outro suplemento especializado.

Esta metodologia apresentou bons resultados na modelação das inserções, uma vez que permite de forma bastante facilitada a criação de curvas de fronteira, ao contrário do que se verificou na metodologia testada anteriormente. Devido à forma da inserção, as curvas de fronteira (Figura 33) permitem, neste caso em particular, criar uma superfície correspondente a superfície do objecto, de forma mais fácil e com melhor qualidade que as curvas de secção. A superfície

criada será a base do modelo sólido. A Figura 34, mostra uma visão geral desta metodologia, bem como das principais etapas para obtenção do modelo sólido 3D.

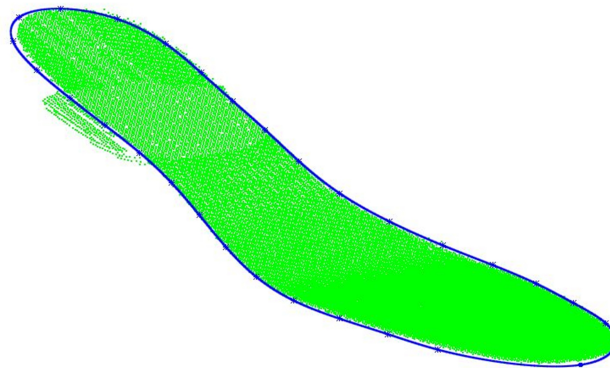


Figura 33 – Curvas de fronteiras obtidas através da nuvem de pontos da inserção anti penetração

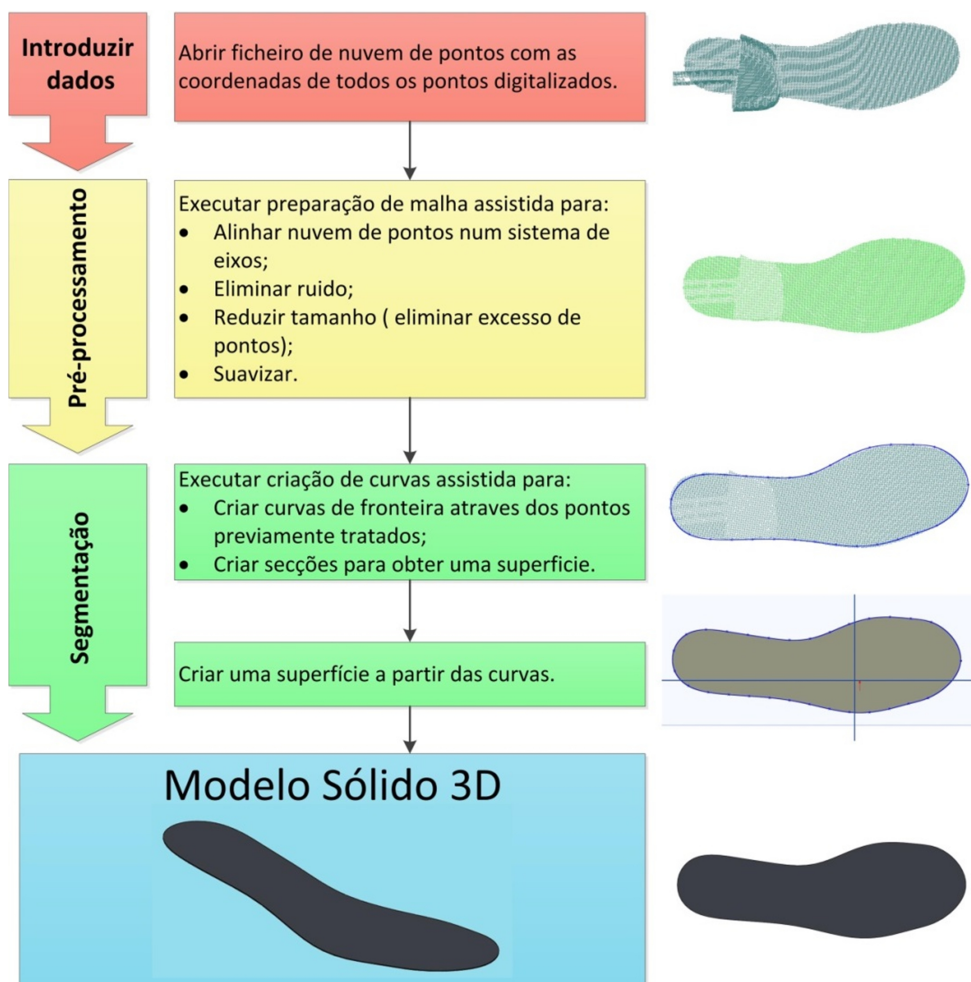


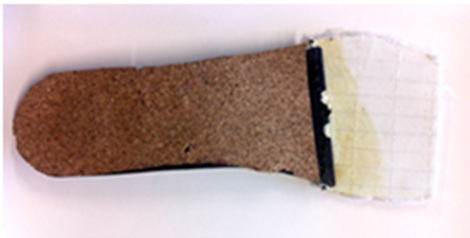




Figura 34 – Visão geral da metodologia em SolidWorks para obtenção do modelo sólido 3D

3.3.2.3 Modelos Sólidos 3D

Uma vez que a metodologia que recorre ao software SolidWorks foi a que apresentou melhores resultados neste estudo, foi utilizada para obtenção dos modelos tridimensionais das três inserções digitalizadas. A Tabela 4 mostra o modelo CAD final das inserções digitalizadas. Estes modelos têm como principal objectivo auxiliar o desenvolvimento de um novo modelo CAD para a nova inserção.

Tabela 4 – Modelos reais e modelos tridimensionais das inserções anti penetração

Modelo Real	Modelo CAD
	
	
	
	





4 ANÁLISES E ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE MATERIAIS



4.1 Ensaio Experimentais a Inserções Anti Penetração

Sendo este um componente de protecção, o cumprimento de toda a normalização associada é fundamental para garantir a segurança dos utilizadores e a fiabilidade do sapato de segurança. Todas as inserções anti penetração devem ser certificadas por entidades especializadas, só depois podem ser inseridas em calçado de segurança. Isto torna os testes e ensaios numa temática de importância crucial, não só no desenvolvimento de novos componentes, mas também na validação e certificação de componentes já existentes.

Para o desenvolvimento de uma nova inserção anti penetração, além de todo o contexto normativo, é necessário obter todo o tipo de informação referente aos produtos existentes no mercado. Tendo como objectivo uma completa caracterização das inserções existentes, foram realizados testes e análises a várias amostras usadas actualmente pela indústria. As amostras analisadas, metálicas e em fibra de aramida, correspondem aos tipos de inserções mais utilizados pela indústria. Todas as amostras são provenientes de fabricantes distintos, e são certificadas pela normalização associada. As amostras utilizadas, bem como o respectivo fabricante, encontram-se descritos na Tabela 5.

Neste subcapítulo, além de uma referência aos principais testes e ensaios contemplados pela norma EN 12568, dando especial atenção ao teste da penetração, são analisados os valores de análises metrológicas e químicas feitas às diversas amostras, que serviram de base a escolha e selecção de materiais para uma nova inserção.

Tabela 5 – Informação relativa as amostras de inserções anti penetração testadas

Marca / Distribuidor	Material	País de origem	
SteelFlex	Metálico	Canada	
AçoReal	Metálico	Brasil	
Safit	Metálico	Itália	
OSB	Metálico	-	
Haix	Metálico	-	
Q Zero Flex	Fibra de aramida	China	
Protector-Z	Fibra de aramida	China	

4.1.1 Teste de Resistência à Penetração

Os testes práticos foram realizados no laboratório da empresa ICC – Industria e Comercio de Calçado e apenas foram possíveis dada a disponibilidade e interesse da empresa neste projecto. A empresa ICC, embora seja parte integrante do Centro Tecnológico do Calçado de Portugal (CTCP), possui um pequeno laboratório técnico pela necessidade de complementar e confirma testes aos seus produtos. Este laboratório é acreditado pelo CTCP que por sua vez é acreditado pelo Instituto Português da qualidade (IPQ), responsável pelos testes segundo as normalizações referidas no capítulo 2.2.

Estas normas contemplam uma serie de testes, tanto para a biqueira de protecção como para a inserção anti penetração, que culminam com a certificação desse produto. Apenas foram efectuados os testes à penetração uma vez que estes são os mais importantes. Todos os outros testes servem para garantir a durabilidade e estabilidade da inserção ao longo do seu ciclo de vida.

O ensaio é efectuado num equipamento apropriado para o efeito, capaz de aplicar uma velocidade uniforme de 10 ± 3 mm/min e uma força de compressão de no mínimo 2 kN. Neste caso foi usado um dinamómetro da marca JUPITER (Figura 35) que comporta uma zona de fixação da palmilha (Figura 36), com um orifício de forma a atravessar a agulha de teste (Figura 37), que provoca a deformação ou perfuração na inserção.



Figura 35 – Equipamento utilizado nos testes à penetração das amostras de inserções anti penetração



Figura 36 – Agulha de teste usada

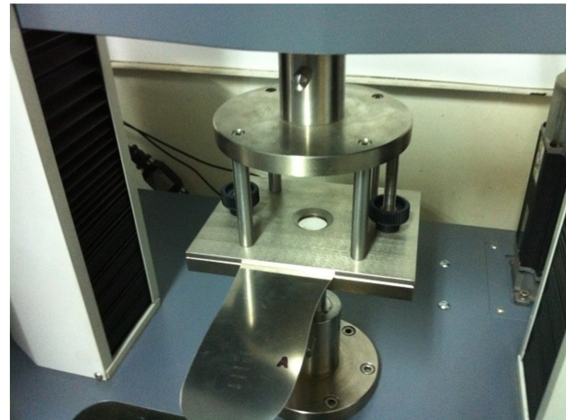


Figura 37 – Zona de fixação das amostras

A agulha usada para a penetração deve respeitar as dimensões estabelecidas pela norma, esta deve conter um diâmetro de $(4,5 \pm 0,05)$ mm com uma extremidade truncada com $(1,00 \pm 0,02)$ mm, tal como mostra a Figura 34. A norma aconselha também que o material constituinte da agulha deve conter uma dureza $HRC \geq 60$.

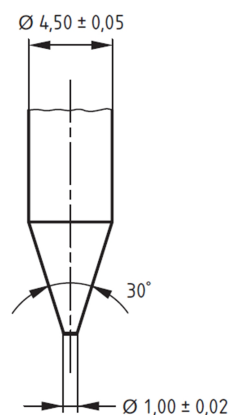


Figura 38 – Dimensões da agulha de teste de acordo com a norma EN 12568 [29]

Para validar uma determinada inserção, deve ser aplicada uma força de 1 100 N na ponta do prego. Este procedimento deve ser repetido nunca menos de três vezes e caso o prego não penetre em nenhuma delas a peça encontra-se aprovada no teste. Salienta-se ainda que a zona regularizada de penetração é composta por toda a área da palmilha que dista 10 mm da extremidade e uma distância mínima de 30 mm entre dois pontos de penetração.

Resultados:

Como era de esperar ambas as inserções passaram no teste à penetração. O principal objectivo deste teste era perceber se existiam diferenças no comportamento mecânico dos materiais. O Gráfico 1 mostra os resultados obtidos no teste efectuado as diferentes inserções mecânicas. Como pode ser observado neste gráfico não há uma diferença significativa entre a deformação ocorrida nas várias inserções, pode então dizer-se que estes componentes apresentam um comportamento mecânico semelhante.

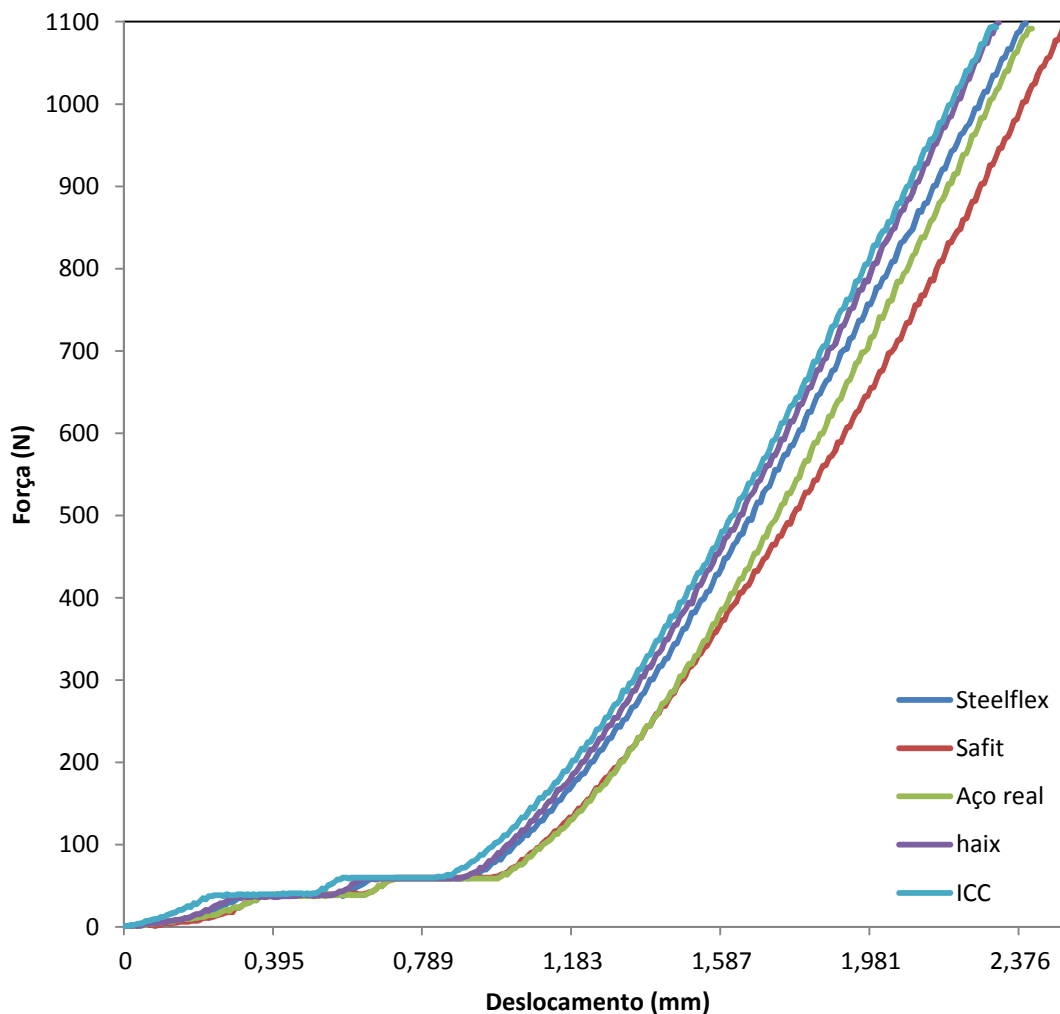


Gráfico 1 – Resultados dos testes à penetração das inserções metálicas

O Gráfico 2 mostra a diferença entre a curva força deformação obtida numa inserção metálica e a curva obtida numa inserção em fibra de aramida. As inserções constituídas por fibra de aramida apresentam uma clara diferença no comportamento mecânico comparativamente as inserções metálicas, como se observa no gráfico as inserções em fibra de aramida apresentam

uma deformação muito superior as metálicas. Esta deformação tem geralmente consequências negativas quando este material é usado num sapato de segurança, apesar de não permitir a penetração, este material permite que um objecto afiado provoque lesões superficiais no pé do individuo.

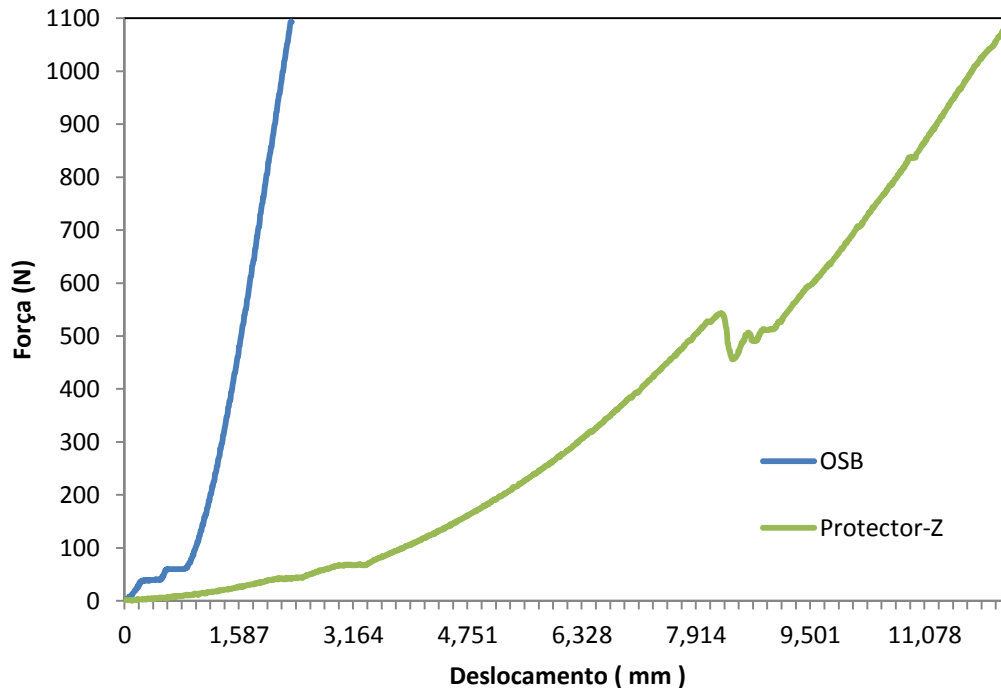


Gráfico 2 – Diferença entre os resultados obtidos numa inserção metálica e numa inserção em fibra de aramida

4.1.1.1 Outros ensaios

A par do teste de resistência à penetração, existem outros testes aos quais as inserções devem ser sujeitas. Esses testes são imprescindíveis para certificar um componente deste género, mas obviamente não são importantes para garantir a resistência mecânica da inserção.

Em seguida serão descritos alguns dos testes complementares, bem como os equipamentos usados para esses mesmos testes.

- Teste à Fadiga da Palmilha

Este teste tem como finalidade determinar a resistência à fadiga de inserções de aço utilizadas no fabrico de calçado de segurança. Durante o ensaio os provetes são flectidos numa cadência



de 16 ciclos/s, em que a guia de flexão levanta a extremidade frontal da palmilha 33 mm a partir da posição horizontal neutra. Para que inserção passe este teste, esta deve flectir 1 000 000 de vezes sem quebras. No final uma inspecção visual é consumada para verificar se existiu ou não fractura na peça testada. O equipamento usado para esta finalidade encontra-se representado na Figura 39.



Figura 39 – Equipamento usado para os testes à fadiga

- Teste à corrosão

Por fim, para garantir que as inserções apresentam boas qualidades anti corrosão, são sujeitas a um teste à corrosão. Este teste deve ser efectuado recorrendo a uma solução aquosa de cloreto de sódio e a papel de filtro. O papel de filtro deve ser completamente embebido na solução e deve revestir a superfície das inserções que posterior mente deve ser deixada em repouso durante 48 horas. No final as inserções são analisadas com o objectivo de verificar se existe algum sinal de corrosão na sua superfície.

4.1.2 Análise Metrológica

Foi realizada uma análise metrológica a todas as inserções compostas por materiais metálicos. O principal objectivo desta análise é perceber se existem diferenças significativas na espessura das diferentes amostras. Para tal foi registada a espessura em cinco pontos distintos da inserção definidos previamente.

A análise metrológica foi realizada no laboratório de metrologia do departamento de engenharia mecânica da universidade do Minho. Para mais detalhes acerca dos equipamentos e métodos utilizados deve ser consultado o Anexo 1.

Resultados:

O gráfico seguinte mostra os resultados obtidos:

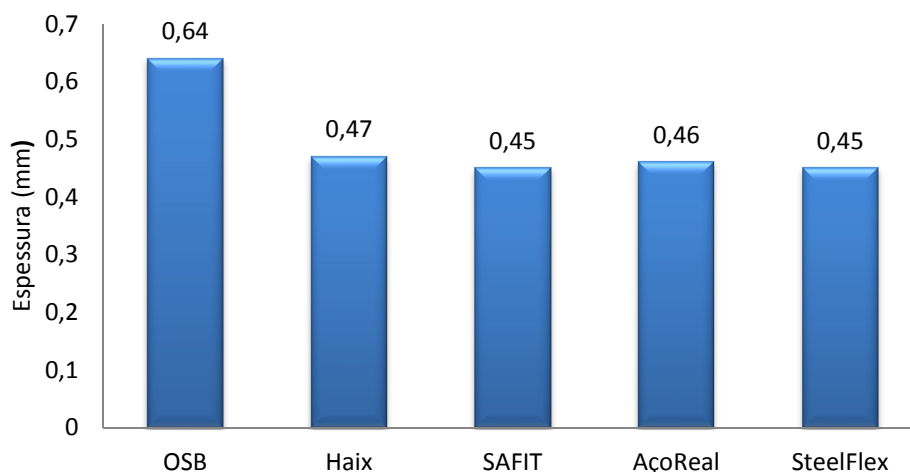


Gráfico 3 – Espessura das inserções anti penetração analisadas

Através dos resultados obtidos pode-se concluir que não existe uma diferença significativa entre os diferentes fabricantes de inserções anti penetração.

As inserções OSB apresentam uma espessura ligeiramente maior, devido a camada de tinta pela qual se encontram revestidas. Esta camada tem como função facilitar a adesão à sola do sapato e impedir a corrosão das inserções. O acréscimo de espessura causada por essa camada de tinta não apresenta consequências negativas no processo de fabrico do sapato nem na flexibilidade da inserção.



4.1.3 Caracterização Química

Através de uma análise química, pretende-se obter informação mais detalhada sobre os materiais constituintes das diversas inserções. A análise desta informação terá influência na escolha de novos materiais para uma possível utilização num novo produto deste género.

Esta análise foi efectuada no laboratório de materiais do Departamento de Engenharia Mecânica, recorrendo a equipamento de espectrometria de fluorescência de raios X (XRF). Esta técnica baseia-se na medida das intensidades dos raios X emitidos pelos elementos constituintes da amostra através da dispersão de energia. [30]

Os raios X fazem parte do espectro electromagnético e são expressos em termos de energia ou comprimento de onda. XRF é uma consequência das mudanças que ocorrem dentro de um átomo. Um átomo estável é constituído por um núcleo e electrões em órbita do núcleo. Os Electrões em órbita são organizados em níveis, em que cada nível é constituído por electrões com a mesma energia. Quando um feixe de raios X colide com um átomo, a sua estabilidade é afectada, dando origem a uma alteração na configuração electrónica dos seus níveis de energia. A diferença de energia produzida pelos movimentos de electrões entre os níveis de energia do átomo é uma característica do elemento. Através deste princípio é possível aferir os vários elementos constituintes de uma amostra.

Devido à sua relativa facilidade operacional e baixo custo de equipamento esta técnica é amplamente utilizada para a caracterização de metais e minerais.

Resultados:

Os resultados obtidos nas análises realizadas encontram-se compilados de forma resumida na Tabela 6 – Resultados da caracterização química efectuada. Para a identificação do material em questão, os valores de cada amostra foram confrontados com tabelas de identificação dos materiais presentes no *ASM Metals Handbook – Properties and selection*.



Tabela 6 – Resultados da caracterização química efectuada

	SteelFlex	Safit	Açoreal	Haix	OSB
Fe	72,6 %	72,3 %	71,3 %	73,5 %	72,2 %
Cr	15,2 %	15 %	18 %	16,5 %	16,5 %
Mn	9,42 %	9,84 %	9,61 %	1,67 %	6,27 %
Ni	0,897 %	0,525 %	0,486 %	6,85 %	4,3 %
Cu	1,41 %	1,7 %	0,0102 %	0,0729 %	0,0216 %
Mo	0,065 %	0,018 %	0,0115 %	0,147 %	0,212 %
Co	0,133 %	0,113 %	0,0896 %	0,224 %	0,149 %
P	0,0678 %	0,0472 %	0,0225 %	0,0268 %	0,0316 %
Si	0,154 %	0,283 %	0,412 %	0,934 %	0,26 %
V	0,0339 %	0,0866 %	0,0634 %	0,0912 %	0,0438 %
C	0,11 %	0,11 %	0,18 %	0,12 %	0,11%
S	<0,01 %	<0,01 %	0,0106 %	<0,01 %	<0,01 %
Ti	-	-	-	0,0156	-
Tipo de Aço AISI	202	202	202	301	201

De acordo com os resultados obtidos, pode ser concluído que todas as inserções são compostas por aços inoxidáveis austeníticos. Este tipo de materiais caracteriza-se pela sua elevada resistência à corrosão. Os aços inoxidáveis apresentam-se como uma liga constituída principalmente por ferro, cromo e níquel. As suas características ímpares devem-se à presença do elemento cromo, que a partir de um determinado valor entra em contacto com o oxigénio formando uma película finíssima de óxido de cromo sobre a superfície do aço. Essa pequena película é impermeável e insolúvel quando exposta aos meios corrosivos, tornando o aço inoxidável resistente a oxidação e corrosão.

Os aços inoxidáveis são divididos em três grupos diferentes que diferem entre si na sua microestrutura: Martensíticos, Ferríticos ou Austeníticos. Como já foi referido as inserções anti penetração examinadas, pela sua composição química, estão inseridas no grupo dos Austeníticos. Este grupo é o que apresenta uma maior resistência à corrosão. Além disso estes aços combinam baixa tensão de cedência com alta resistência à tracção e um favorável



alongamento, oferecendo as melhores propriedades para trabalhabilidade a frio. O endurecimento neste grupo específico de aços inoxidáveis através de tratamentos térmicos é bastante limitado, sendo que a resistência à tracção e dureza podem ser aumentadas por encruamento.

Os Gráfico 4 Gráfico 5 mostram a diferença da composição química entre as diferentes inserções. O Gráfico 4 mostra a totalidade dos elementos químicos, enquanto o Gráfico 5 corresponde aos elementos menos abundantes para uma melhor interpretação das diferenças.

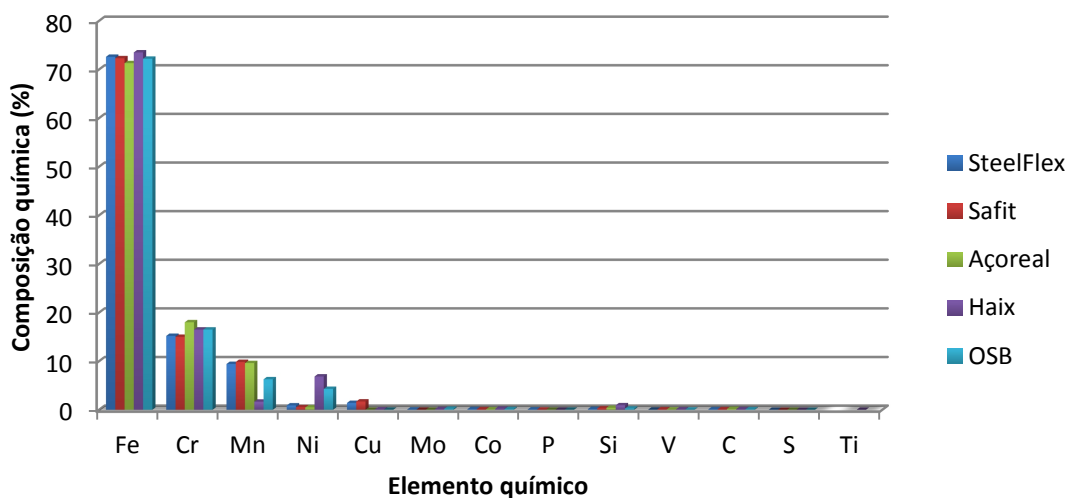


Gráfico 4 – Composição química das diferentes amostras – Todos os elementos químicos

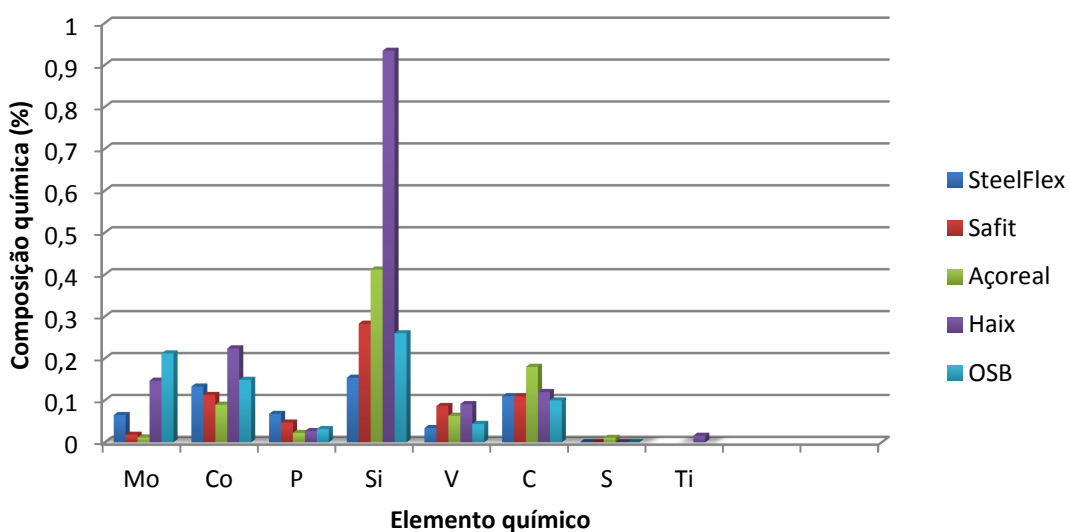


Gráfico 5 – Composição das diferentes amostras – elementos químicos menos abundantes



A principal diferença entre as inserções analisadas reside na percentagem de Manganês, Níquel e Sílica que constituem a inserção “Haix”. Devido à sua composição conter uma maior percentagem de Níquel e menor percentagem de manganês o seu material constituinte encontra-se na série 300 ao contrário das restantes inserções que se encontram na série 200. Esta inserção é também a que apresentou uma menor deformação nos testes à penetração (secção 4.1.1).

A série 300 é caracterizada por um maior teor em Níquel. O preço elevado do Níquel levou a uma maior utilização de aços 200 em algumas aplicações, uma vez que estes aços apresentam um custo reduzido, ao mesmo tempo que as suas propriedades físicas e mecânicas são similares aos aços da série 300 [31]. Os materiais constituintes das restantes inserções são aços inoxidáveis de serie 200, mas é visível um teor em níquel muito abaixo do normalmente encontrado em aços deste tipo, o que pode estar relacionado com uma optimização ao nível dos materiais, por parte dos produtores de inserções anti penetração.

4.2 Análise de Funções e Características

Para o desenvolvimento de um novo produto é necessário considerar as funções que este vai desempenhar no seu mercado alvo. Pela análise das inserções desenvolvidas até ao momento, compreende-se que há um grande número de funções e características que as diferencia entre si. Pretende-se então hierarquizar essas funções para posteriormente seleccionar quais delas a nova inserção anti penetração deve conter.

As funções ou características podem ser divididas em três grupos distintos, que se distinguem pela sua importância, podem ser restrições (neste caso impostas pela normalização associada), funções principais, ou funções secundárias.

Em seguida são referidas as características ou funções divididas pelo seu grau de importância.

Restrições (impostas pela norma EN 12568):

- Anti penetração;
- Anti Corrosão;
- Resistência à fadiga;

**Funções Principais:**

- Flexibilidade na zona frontal – A flexibilidade na zona frontal é fundamental para garantir um bom nível de conforto e permitir ao sapato acompanhar o movimento natural do pé sem impor restrições;
- Anti torção na zona do calcanhar – Ao contrário da zona da frente, a parte traseira deve ser rígida para funcionar como reforço estrutural do sapato e impedir lesões devido a torção do calcanhar;

Funções Secundárias:

- Protecções contra lesões do calcanhar – Algumas inserções podem ser dotadas de materiais específicos na zona do calcanhar de modo a impedir lesões no calcanhar em caso de queda;
- Propriedades anti fungos – Esta propriedade é normalmente conferida à palmilha de conforto, mas existem inserções que contemplam esta característica de modo a aumentar a qualidade final do sapato;
- Protecção lateral – As inserções comuns apenas protegem a planta do pé, protecção lateral refere-se a uma protecção extra da zona lateral do pé;
- Baixa espessura – A espessura é muito importante no processo de montagem da inserção anti penetração com a biqueira de protecção, espessuras demasiado elevadas põem em causa a protecção conferida pela biqueira;
- Permeabilidade – Existem inserções que devido aos materiais que as compõem apresentam bons níveis de permeabilidade, permitindo melhores níveis de conforto térmico.
- Boa aderência à sola – A aderência da inserção a sola do sapato é importantíssima para assegurar a durabilidade, e garantir protecção total ao longo do tempo de vida do sapato;
- Baixo peso – Uma das razões que leva alguns trabalhadores a não usarem calçado de segurança é o peso elevado deste EPI, desta forma o peso da inserção é um factor importante a ter em consideração;
- Livre de metal (não detectável em detectores de metal) – Em indústrias como a industria aeronáutica, transportes aéreos, industria de softwares onde é comum os operários



passarem por detectores de metais, o facto do calçado de segurança não conter materiais metálicos é bastante valorizado.

- Amortecimento de impactos – Apesar de as inserções impedirem a penetração de objectos afiados, estes objectos podem causar mau estar no pé devido ao impacto causado. Em calçado de segurança de qualidade é comum o uso de uma camada para absorver esses impactos, aumentando o nível de conforto do sapato;

Uma vez que se torna impossível aliar todas estas características numa inserção e ao mesmo tempo conseguir que o seu custo seja aceitável, é necessário definir quais as características secundárias mais importantes. Para definir quais dessas características devem ser conferidas à nova inserção, foram comparadas tendo em conta critérios fundamentais para o seu sucesso. Os critérios usados para esta comparação foram: importância no mercado alvo, grau de inovação e importância nos fabricantes de calçado de segurança. A tabela de valores (Tabela 7) mostra a diferenciação entre as várias funções. Esta diferenciação foi efectuada tendo em conta a experiência adquirida nas visitas a várias empresas deste sector.

Tabela 7 – Tabela de valores relativa às características secundárias

Funções e características	Importância no Mercado Alvo	Inovação	Importância no Fabricante	Total
Protecção contra lesões do calcanhar	4	3	2	9
Propriedade anti fungos	2	3	2	7
Protecção lateral	2	3	4	9
Baixa espessura	5	3	5	13
Permeabilidade	1	3	2	6
Aderência	3	3	5	11
Baixo peso	4	3	5	13
Livre de metal	4	1	1	6
Amortecimento de impactos	5	4	4	13

Pela análise da tabela pode concluir-se que as características secundárias mais importantes para este componente são à baixa espessura, baixo peso, amortecimento de impactos e a boa aderência à sola.

Layout de Funções e Características:

Definidas as características mais importantes, torna-se necessário analisar em que zona da inserção essas características são requeridas. Existem algumas características ou funções que são necessárias em toda a área, mas a maior parte apenas é apenas essencial em zonas específicas. Esta informação será utilizada para auxiliar o processo de design da nova inserção, bem como dos materiais a utilizar em cada zona permitindo assim, uma optimização ao nível dos custos de fabrico. Para uma melhor interpretação a Figura 40 e a Tabela 8 mostra o *layout* numa perspectiva dimensional e a área onde cada função é requerida.

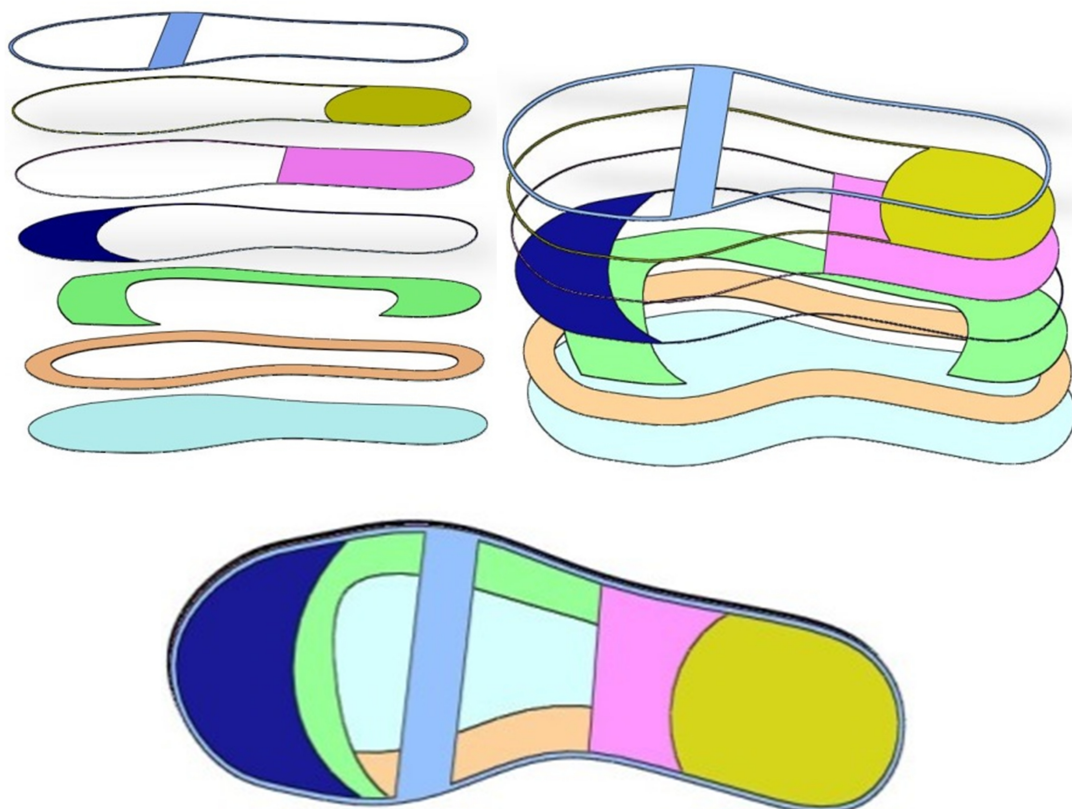


Figura 40 – Layout tridimensional de funções e características

Tabela 8 – *Layout* de características e funções

Funções	Layout
Flexibilidade	
Protecção Calcanhar	
Anti Torção	
Permeabilidade	
Conforto	
Adesão à sola	
Anti Penetração	
Antifúgico	
Amortecimento impactos	
Distribuição de energia	

4.3 Ensaio Experimentais a Novos Materiais

Tendo em vista a utilização de materiais diferentes na concepção de uma nova inserção anti penetração, foram analisados e testados várias matérias com o objectivo de validar a sua aplicabilidade numa nova inserção.

Os vários materiais foram testados de acordo com a sua potencial função na nova inserção, foram então efectuados dois tipos de testes distintos, testes ao conforto e testes à penetração.

Os testes à penetração foram efectuados de acordo com os procedimentos previstos pela normalização em vigor, os equipamentos e métodos utilizados são os descritos na secção 4.1.1. Relativamente ao conforto foram efectuados testes a um grande conjunto de variáveis, sendo que as mais importantes são: Condutividade, difusividade e resistência térmica, compressão em função da espessura, resiliência a compressão e permeabilidade ao vapor de água.

A informação obtida nestes testes serve como base para a selecção de materiais para a nova inserção anti penetração.

4.3.1 Sanduíche Metálica de Cortiça

Uma estrutura sanduiche é constituída por duas camadas finas de alta resistência cobrindo ambos os lados e um núcleo de baixa densidade como representa a Figura 41. Os materiais usados neste tipo de estruturas pode ser de diferentes tipos. Para as camadas exteriores de alta resistência são normalmente usados materiais metálicos como aço ou alumínio, o núcleo pode ser de materiais sintéticos ou cortiça.

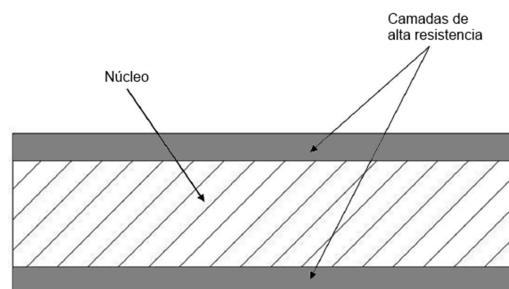


Figura 41 – Representação de uma estrutura sanduiche



Este tipo de estruturas combina uma alta performance mecânica fornecida pelas camadas exteriores, uma baixa densidade e alta absorção de energia conferida pelo núcleo. Estas estruturas são bastante promissoras em absorção e dissipação de energia e resistência a impactos, uma vez que tem a capacidade de se deformar plasticamente sob diferentes cargas. Tem também a vantagem de terem um baixo peso devido à baixa densidade do material do núcleo, o que em algumas aplicações é extremamente importante.

Devido às suas propriedades sanduiches com núcleo de cortiça, tem vindo a ser adoptadas num grande número de aplicações. Na indústria aeroespacial são usadas estruturas deste género para protecção térmica de veículos espaciais, na indústria automóvel e aeronáutica para a construção de elementos estruturais, na área da construção são usadas para isolamento térmico, acústico e absorção de vibrações. Os seus benefícios quando sujeitas a ondas de choque, impacto balístico ou a compressão já foram testados em estudos, demonstrando sempre resultados positivos. [32] [33] [34]

Este conjunto de materiais apresenta as propriedades requeridas para a zona traseira da inserção anti penetração, onde se pretende que exista alguma rigidez estrutural, baixo peso, amortecimento e distribuição de energias.

Neste estudo foi testada uma sanduiche metálica com núcleo de cortiça composta por duas camadas de aço inoxidável de 0.5 mm e um núcleo com 2mm de cortiça (Figura 42). O seu comportamento foi comparado com testes efectuados a duas camadas metálicas com a mesma espessura sem cortiça no meio.



Figura 42 – Sanduiche de cortiça testada à penetração



Resultados:

Tabela 9 – Valores do ensaio de penetração da sanduiche aço/cortiça e dupla camada de aço

Material	Força suportada	Deformação
Sanduiche aço/cortiça	1025 N	5,25 mm
Camada de aço dupla	1040 N	3,50 mm

Os resultados obtidos mostram que o uso da cortiça no interior de duas camadas de aço, funcionando como estrutura sanduiche, não trás nenhuma vantagem relativamente ao comportamento do material à penetração. Os valores da força suportada pela sanduiche aço cortiça são inferiores aos obtidos usando apenas duas camadas de aço sobrepostas. A força suportada pela dupla camada de aço é ligeiramente maior do que a suportada pela da sanduiche, e a deformação é menor, comprovando assim que apesar das boas propriedades apresentadas à compressão e ao choque este tipo de estruturas não apresenta um bom comportamento quando sujeito à penetração de um objecto afiado. Os valores presentes na Tabela 9 correspondem a força suportada até ao momento em que o material foi penetrado, e a deformação ocorrida nesse momento, já o Gráfico 6 mostra a curva completa obtida neste teste.

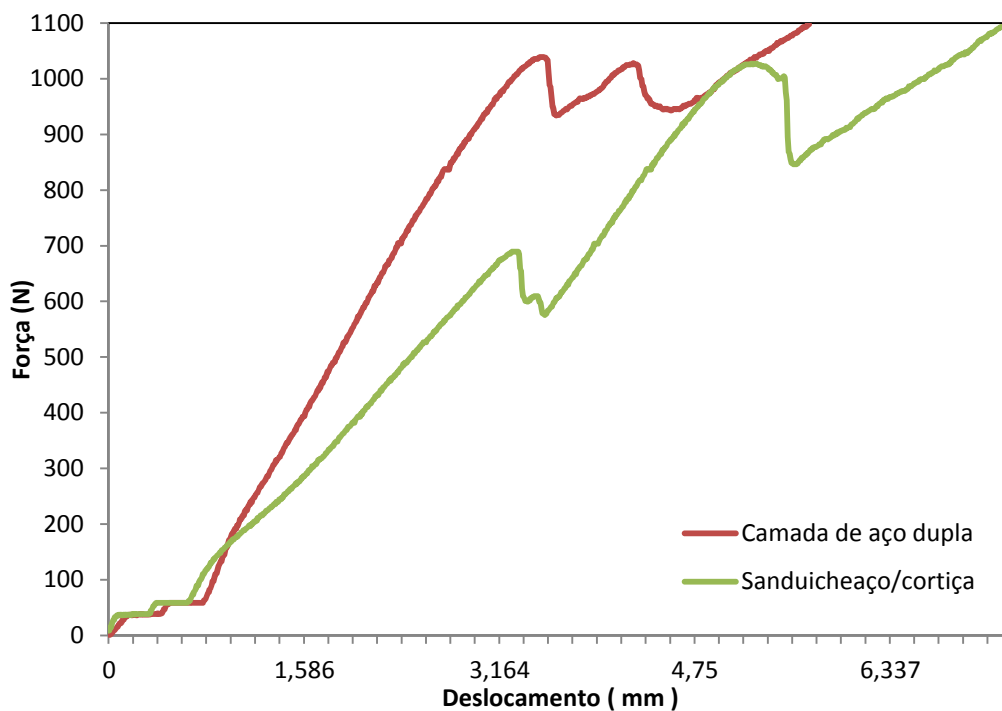


Gráfico 6 – Curva força/deslocamento dos testes efectuados a sanduiche e a camada de dupla de aço

4.3.2 Membrana de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE)

Polietileno de ultra alto peso molecular é um polímero semi-cristalino linear, que se diferencia dos restantes tipos de polietileno pelo seu elevado peso molecular.

Este tipo de fibras tem sido utilizada para construção de elementos de protecção balística e para aplicações onde é requerida uma boa resistência ao impacto. Este material além de ser mais leve e barato que as fibras de aramida, apresenta níveis de absorção de energia maiores. [35]

Devidas as características referidas e a sua boa flexibilidade, este material apresenta elevado potencial para ser usado nas zonas da inserção onde se pretende conferir flexibilidade. Foram testadas duas amostras que contem pesos diferentes, 100 g/m² e 400 g/m² (Figura 43).



Figura 43 – Amostra de UHMWPE testada

Resultados:

Tabela 10 – Valor do ensaio de penetração para as amostras UHMWPE

Material	Força suportada	Deformação
UHMWPE – 100 g/m ²	160 N	13 mm
UHMWPE – 400 g/m ²	665 N	16 mm

Pela análise da Tabela 10, pode concluir-se que as amostras testadas apresentam uma resistência a penetração linear, pois a amostra de 100 g/m² tem uma resistência á penetração



≈ 4 vezes inferior á da amostra de 400 g/m^2 . Assim, sendo, para que uma amostra do deste material resistisse aos 1100 N , este deveria ter $\approx 750 \text{ g/m}^2$.

Pelos resultados obtidos comprovou-se que este material não deve ser usado nesta aplicação. Considerando que a resistência à penetração aumenta de forma linear com o peso, apenas passaria nos testes uma amostra de 750 g/m^2 , como a flexibilidade diminui com o peso neste material, uma amostra com 750 g/m^2 teria pouca flexibilidade.

4.3.3 Compósito Termoplástico - Pure®

Foram efectuados também testes a um material compósito, produzido e patenteado pela empresa holandesa Pure, estes materiais são construídos à base de polipropileno co-extrudido. As propriedades que este material apresenta enquadram-se nas propriedades requeridas para uma inserção anti penetração, salientam-se as seguintes características:

- Baixo peso e densidade;
- Grande resistência ao impacto;
- Baixo coeficiente de expansão térmica;
- Boa rigidez;
- 100% Reciclável.

Este tipo de compósitos permite uma optimização das suas propriedades recorrendo a uma reorientação das moléculas. Devido as boas propriedades, este compósito é utilizado em equipamentos de protecção pessoal bem como em equipamentos de protecção balística. A Figura 44 corresponde às amostras testadas, cedidas pela empresa Pure, as propriedades anunciadas pelo fabricante encontram-se na Figura 44.



Figura 44 – Amostra do material Pure®

Tabela 11 – Propriedades do material Pure®

Propriedades Pure®:	
Densidade:	0,78 g/cm ³
Módulo de elasticidade:	5,5 GPa
Módulo de flexão:	4,5-5,5 GPa
Rigidez:	5,5 GPa
Resistência á tracção:	200 MPa

Resultados:

A espessura das diferentes amostras recebidas varia entre 0,13 e 0,40 mm de espessura, pelo que a primeira a ser testada foi a mais espessa.

A amostra de 0,40 mm não passou nos testes, e apenas suportou 180 N. O valor obtido é bastante baixo, estando muito distante dos 1100 N requeridos. Tendo em conta os resultados negativos da amostra mais espessa, as restantes não foram testadas.



4.3.4 Spacers

Spacers são tecidos tridimensionais complexos constituídos por duas camadas de tecido separadas que são ligadas verticalmente entre elas. Existem vários tipos de materiais deste género, os mais convencionais usam fios para unir as duas camadas de tecido, estes materiais apresentam uma boa capacidade de absorção de energia, boa elasticidade e boa capacidade de deformação sobre cargas aplicadas. No entanto a ligação entre as duas camadas de tecido pode ser efectuada recorrendo ao reforço estrutural de têxteis avançados elevando as propriedades mecânicas deste material. Devido a combinação de propriedades que oferece, este material tem vindo a ser utilizado em varias aplicações distintas desde o vestuário a indústria aeronáutica e militar, sendo mesmo considerado uma tendência para o futuro do calçado. [36] Ao contrário dos materiais anteriores, que o objectivo da sua utilização seria conferir protecção, este material foi testado para conferir conforto à inserção anti penetração.

Os materiais mais utilizados para absorver energia e conferir a sensação de conforto são as espumas de poliuretano, devidas as boas características de compressão, estes materiais são usados numa grande variedade de aplicações como: calçado, estofos de automóveis, mobiliário, componentes electrónicos, entre outros. Apesar das suas boas características apresenta algumas desvantagens, não é um produto reciclável, apresenta uma baixa permeabilidade ao ar o que causa mau estar em ambientes quentes e liberta gases venenosos quando entra em combustão. Os spacers apresentam características mecânicas à compressão semelhantes às espumas de poliuretano e não apresentam tais desvantagens, uma vez que são completamente recicláveis, apresentam boa permeabilidade ao ar, boa termorregulação, tudo isto graças a sua estrutura 3D. Xiaohua Ye apresenta um estudo que comprova que os spacers conferem um melhor conforto comparados com espumas de poliuretano. [37]

Comprovado teoricamente que os spacers alem de ser um material inovador e promissor contem melhores características ao nível do conforto que os materiais mais utilizados nos dias de hoje, foram ensaiados 5 spacers diferentes representados na Figura 45. Um Spacer fornecido pela empresa LMA sediada em Santo Tirso, composto por 90% de Poliéster e 10% de X-Static, e quatro spacers da Heathcoat na Inglaterra, compostos por 100% de Poliéster.

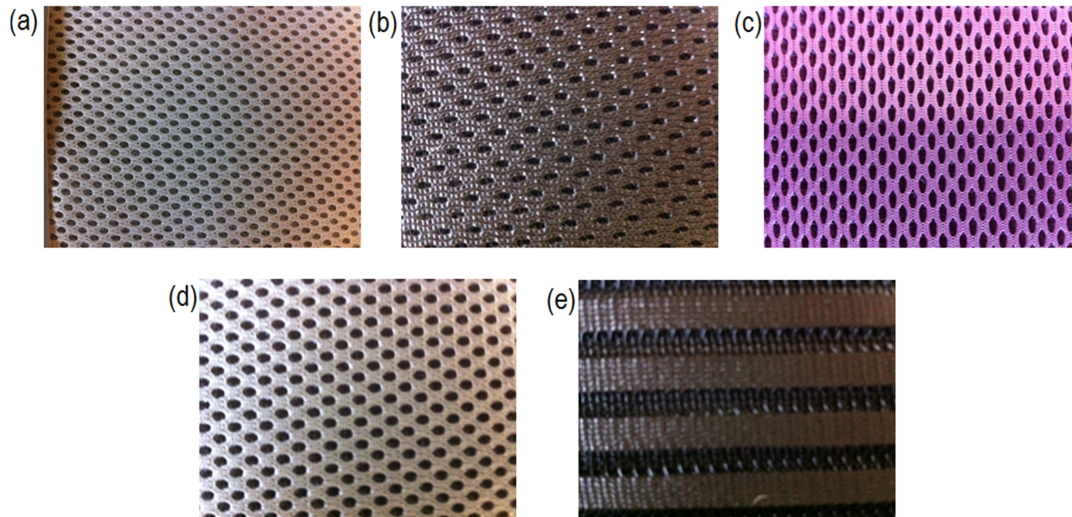


Figura 45: Spacers ensaiados. (a) LMA, (b) N-02509-A01, (c) N-02718-A01, (d) N-02652-A01, (e) N-02593-A01

Resultados:

Nesta secção serão apresentados e discutidos os valores das variáveis consideradas mais importantes. O anexo B contém informação complementar relativa a análise dos spacers nomeadamente, resultados obtidos para outras variáveis, bem como equipamentos e métodos utilizados.

O Gráfico 7 apresenta os valores da resiliência à compressão (R_c) enquanto o Gráfico 8 apresenta a compressão em função da espessura (L_c), e a energia de compressão por unidade de superfície. Não foi possível obter resultados para o spacer N-02509-A01 devido a sua espessura superior ao permitido pelo equipamento utilizado. Estes testes foram efectuados recorrendo ao *Kawabata Evaluation System for Fabrics* (KES)

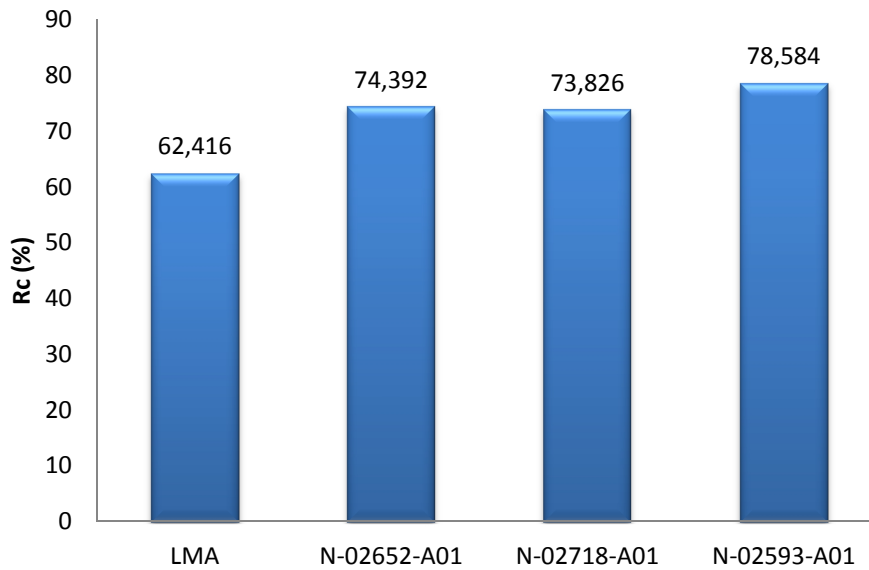


Gráfico 7 – Resiliência a compressão, para os spacers analisados.

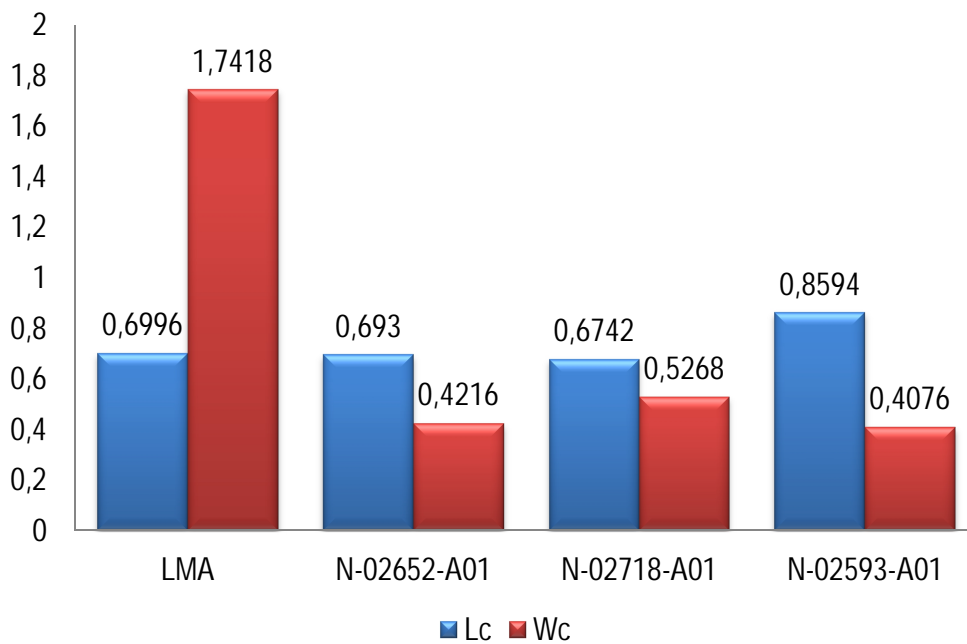


Gráfico 8 – Linearidade da curva compressão/espessura (Lc), e energia de compressão por unidade de superfície, (Wc) para os spacers analisados

A resiliência a compressão varia entre 62,416% para o material LMA e 78,584% para o N-02593-A01, mostrando que não existe uma grande diferença relativamente a absorção de energia nestes materiais. Quanto à energia de compressão por unidade de superfície os valores variam entre 1,7418 N.m/m² para o spacer da LMA e 0,4076 N.m/m² para o spacer N-02593-A01, note-se que o spacer LMA se destaca pela sua boa compressão por unidade de superfície



comparado com os restantes. Os valores obtidos nestas análises estão dentro do previsto para esta variável, os valores obtidos são semelhantes aos obtidos por Liu e seus companheiros num estudo deste género. [38]

Os testes referentes às propriedades térmicas dos spacers bem como à espessura foram efectuados recorrendo ao alambeta. O Gráfico 9 e o Gráfico 10 correspondem à espessura e à resistência térmica dos spacers analisados. A informação referente ao equipamento utilizado encontra-se no anexo A.

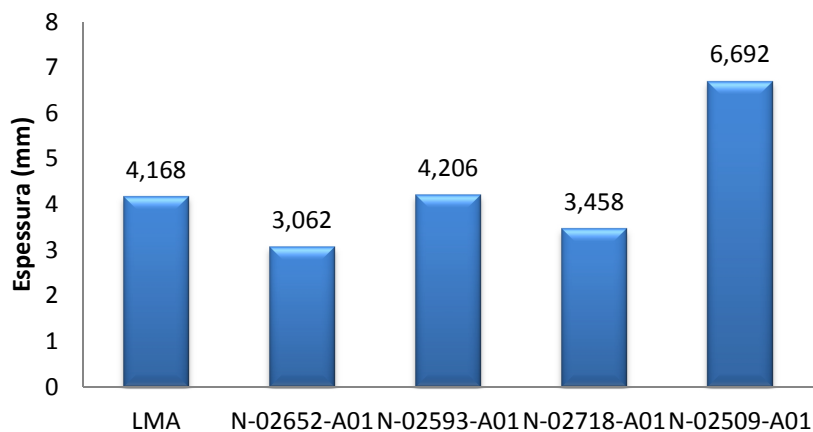


Gráfico 9 – Espessura dos spacers analisados

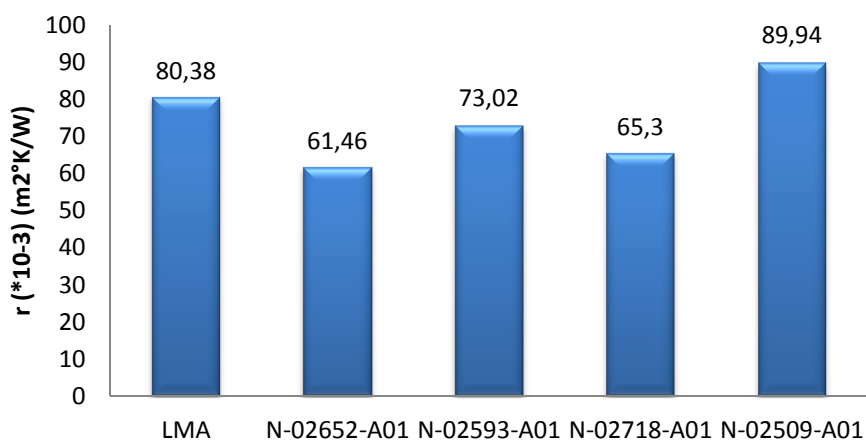


Gráfico 10 – Resistência térmica dos spacers analisados

A espessura dos spacers varia entre 3,062 mm para o N-02652-A01 e 6,692 mm para o N-02509-A01. A espessura é uma variável importante nesta aplicação, pelo que quanto menor a espessura do spacer melhor, pois menor será a espessura da inserção anti penetração. Pela



comparação do Gráfico 9 com o Gráfico 7 pode concluir-se que a espessura não tem uma influência directa na resiliência do material, uma vez que o spacer com menor espessura (N-02652-A01) é o que apresenta o segundo maior valor de resiliência. Quanto à resistência térmica pode verificar-se uma variação conforme a espessura do spacer, excepto no caso do spacer LMA, isto pode estar relacionado com a diferente composição deste material (90% de Poliéster e 10% de X-Static).

A permeabilidade ao ar refere-se à capacidade de um material ser atravessado pelo ar, esta característica tem um papel fundamental na transferência de calor, pois tem um efeito significativo na condutividade térmica do material. Permeabilidade ao vapor de água (WVP) é uma das propriedades mais importantes de uma estrutura fibrosa, consiste na perda de água sob a forma de vapor. Esta propriedade é especialmente importante para o balanço térmico do pé com o ambiente exterior. Um material com boa permeabilidade ao vapor de água permite que a humidade criada no interior da sapato passe para o exterior contribuindo para uma melhor sensação de conforto. O Gráfico 11 apresenta os valores obtidos para a permeabilidade ao ar a duas pressões distintas, enquanto o Gráfico 12 mostra o índice de permeabilidade ao vapor de agora para as inserções testadas.

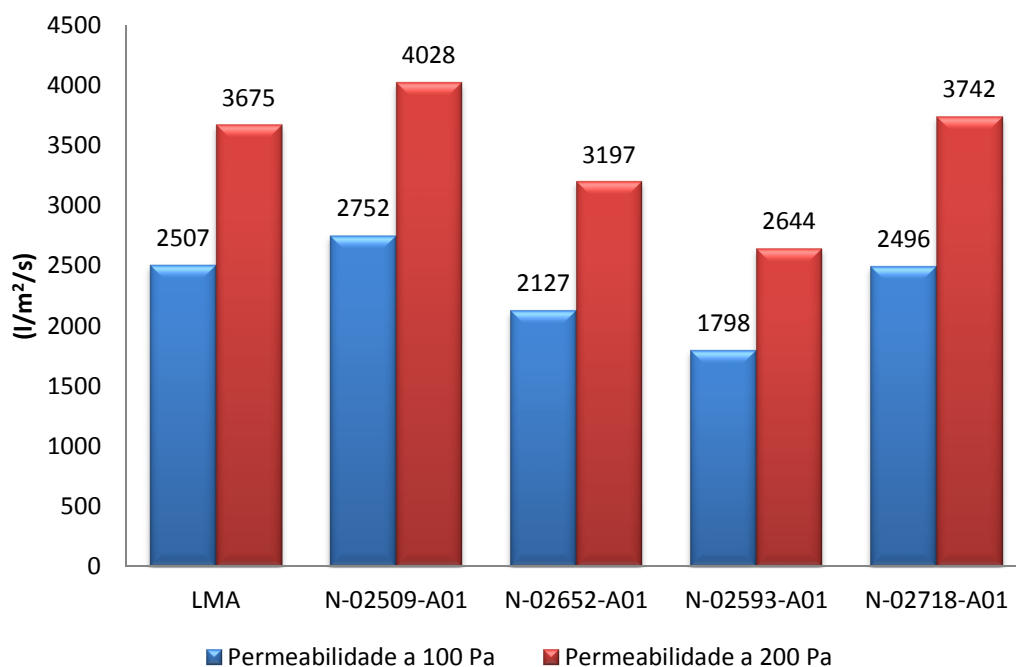


Gráfico 11 – Permeabilidade ao ar para 100 Pa e 200 Pa, nos spacers analisados



Os resultados à permeabilidade para diferentes pressões mostram que a permeabilidade dos materiais ao ar não varia de forma linear com a pressão. O material com maior permeabilidade ao ar é o N-02509-A01 (2752 l/m²/s – 100 Pa; 4028 l/m²/s – 200Pa) e o que apresenta menor é o N-02593-A01 (2644 – 100 Pa; 1798 – 200 Pa).

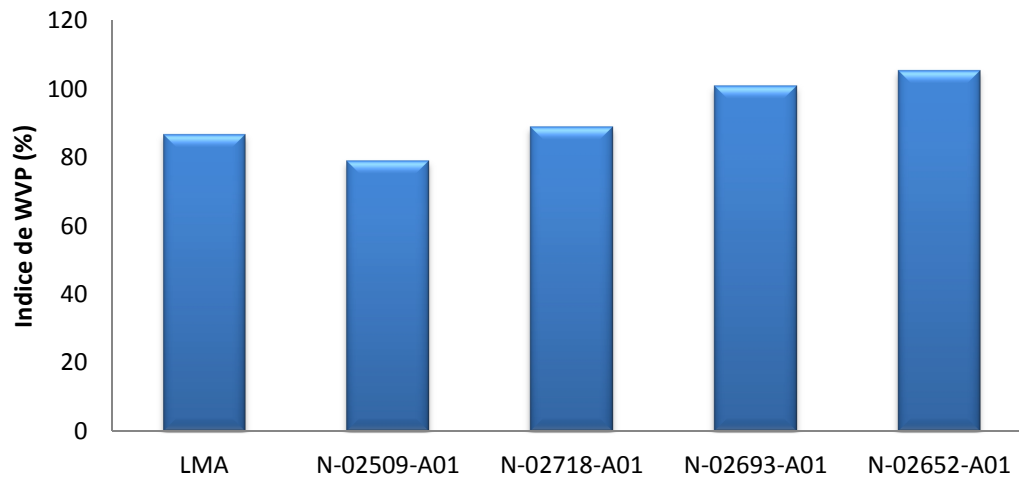


Gráfico 12 – Índice de permeabilidade ao vapor de água, nos spacers testados

Por fim, quanto aos valores do índice de permeabilidade ao vapor de água, nota-se que não existe uma variação significativa entre os valores obtidos.





5 UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO PROJECTO DE UMA INSERÇÃO ANTI PENETRAÇÃO



5.1 Generalidades

Ao longo deste projecto foi efectuado varias análises e testes com o objectivo de, com base nos valores obtidos, desenvolver uma nova inserção anti penetração para calçado de segurança. Em capítulos anteriores foram mostrados valores de testes realizados a diferentes amostras de inserções anti penetração existentes na indústria (Secção 4.1). Sendo a espessura da inserção anti penetração um factor de relevo, foi efectuada uma análise computacional com o intuito de analisar a influência da espessura da chapa metálica no alongamento e na resistência da inserção.

Para uma análise à espessura das inserções anti penetração optou-se por recorrer à utilização de uma ferramenta CAE capaz de efectuar uma abordagem a deformação não linear no domínio plástico. Uma vez que as inserções anti penetração foram modeladas recorrendo a um suplemento para engenharia inversa do software SolidWorks, a simulação foi efectuada recorrendo a um suplemento especializado para este propósito contido neste mesmo software. Além deste suplemento ser uma ferramenta poderosa e acessível, permite uma clara compatibilidade com os modelos criados, o que a nível industria permitiria reduzir e facilitar o desenvolvimento de um novo produto. O modelo tridimensional usado é baseado numa inserção anti penetração existente e foi obtido recorrendo a técnicas de engenharia inversa, mais informações sobre o modelo tridimensional podem ser encontradas no Capítulo 3.3.

A simulação computacional foi efectuada em duas fases, inicialmente foram simulados os ensaios experimentais efectuados, comparando as deformações obtidas, com o objectivo de validar a simulação computacional para o material em causa. Depois da primeira fase foram efectuadas outras simulações alterando o parâmetro da espessura, com o objectivo de aferir a variação que esta causa na deformação e na carga suportada.

Nesta simulação computacional pretende-se simular os testes à penetração efectuados, respeitando as imposições da normalização associada, para isto optou-se por uma análise não linear onde a intensidade da força aplicada aumenta de forma linear num intervalo de tempo de 5 segundos. Uma vez que na descrição de um comportamento plástico num software de simulação é necessário considerar-se um critério de plasticidade, nesta simulação optou-se por o critério de Von Mises, por ser o que melhor se adapta a este caso. As condições de fronteira



foram também cuidadosamente seleccionadas de modo a representar da forma mais parecida possível os testes práticos efectuados. De seguida será explicado de uma forma mais sucinta, todas estas variáveis fundamentais nesta simulação

5.2 Condições de Fronteira

As condições de fronteiras aplicadas nas simulações numéricas realizadas podem ser divididas em dois grupos distintos, restrições aplicadas na inserção e esforços solicitados por cargas exteriores.

A Figura 46 mostra as condições de fronteiras aplicadas na inserção em análise. Para a fixação foi seleccionada uma área semelhante à dos testes físicos deixando uma área circular de 25 mm onde é aplicada a força de penetração. A carga aplicada e a posição onde esta é aplicada foi naturalmente escolhida de acordo com a normalização em vigor, de forma a traduzir o esforço desenvolvido pela agulha de teste, sendo assim apresenta uma intensidade de 1100 N, uniformemente distribuída por uma área circular de 1 mm de diâmetro.

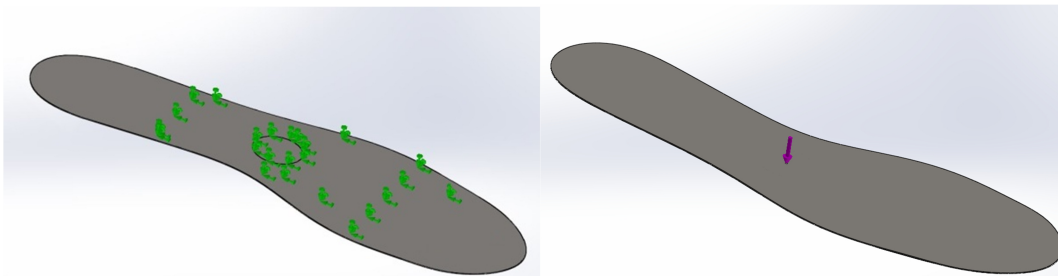


Figura 46 – Condições de fronteira da simulação efectuada

5.3 Discretização

O software no qual é feita esta simulação recorre ao método dos elementos finitos para determinar as tensões, e deformação induzidas na inserção pela carga aplicada. Este método consiste na divisão do problema em questão (modelo virtual da inserção), numa estrutura



discreta constituída por vários elementos finitos, conectados em pontos comuns. Neste tipo de análises o programa olha para o modelo virtual como uma rede de pequenos elementos conectados entre eles, onde são formuladas as equações do problema

Tendo isto em consideração torna-se obvio que a qualidade da discretização é uma variável de grande importância para o rigor e exactidão dos resultados obtidos, assim é necessário o desenvolvimento de uma malha que adequadamente descreva o domínio computacional em estudo. Apesar de algumas limitações este software permite alterar variáveis relacionadas com o tamanho e o tipo de elemento finito.

Existem dois tipos de elementos finitos, elementos tipo solido (elementos 3D) e elementos tipo casca (elementos 2D), a escolha entre eles deve estabelecer um equilíbrio de tempo de computação e exactidão pretendida para os resultados. Para o caso em estudo optou-se por elementos sólidos tridimensionais, estes elementos devido a um maior número de graus de liberdade permitem uma melhor qualidade de análise. O software permite ainda optar entre dois tipos de malha, composta por elementos sólidos, com diferente nível de qualidade. A malha de menor qualidade é constituída por elementos sólidos tetraédricos lineares, enquanto a malha de maior qualidade é constituída por elementos sólidos tetraédricos parabólicos (Figura 47). Visando uma boa exactidão dos resultados obtidos a escolha recaiu na malha com maior qualidade.

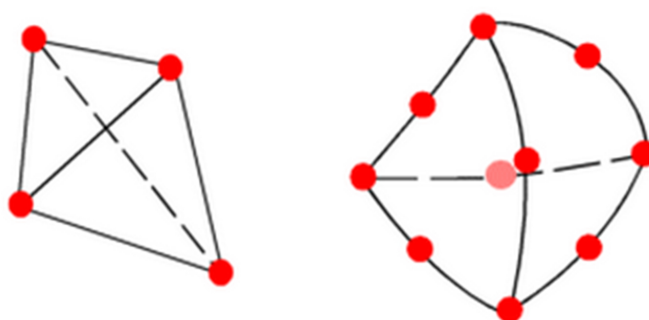


Figura 47 – **A**:Elemento sólido tetraédrico linear; **B**:Elementos sólidos tetraédricos parabólicos [39]

Por fim foi efectuado um estudo de refinamento da malha, com o objectivo de seleccionar o tamanho dos elementos finitos usados. Neste estudo foi efectuado varias simulações variando as dimensões do elemento finito da malha. Uma vez que as solicitações são localizadas numa zona



específica do modelo virtual, foi também estudado a aplicabilidade de elementos com tamanhos diferentes nas diferentes zonas do modelo virtual, em que a zona A corresponderia a área onde ocorrem mais solicitações. A Tabela 12 e o Gráfico 13 mostram os resultados obtidos.

Tabela 12 – Resultados do estudo de refinamento da malha para o modelo da inserção anti penetração

Ensaio	Tamanho do elemento (mm)	Deformação máxima (mm)
	Tolerância (mm)	
1	6,16 0,31	0,136
2	5,54 0,28	0,133
3	4,43 0,22	0,301
4	3,10 0,16	0,681
5	2,17 0,11	0,780
6	1,52 0,08	0,837
7	1,21 0,06	0,854
8 (diferencial)	Zona A: 1,21 Zona B: 2,15	0.830
9(diferencial)	Zona A: 0,98 Zona B: 2,15	0.833
10(diferencial)	Zona A: 0,68 Zona B: 2,15	0.837
11(diferencial)	Zona A: 0,68 Zona B: 1.53	0.858
12(diferencial)	Zona A: 0,20 Zona B: 1,53	0.860

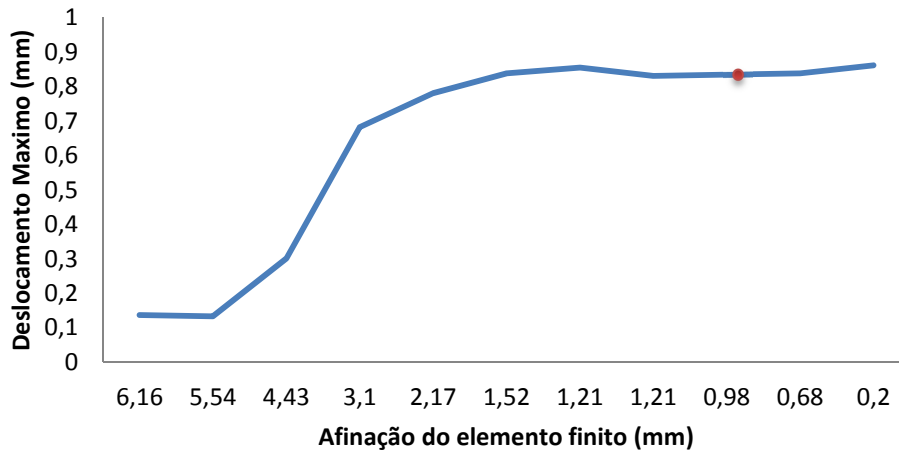


Gráfico 13 – Gráfico dos resultados do estudo de refinamento da malha para o modelo da inserção anti penetração

Os resultados obtidos no estudo mostram que a deformação máxima aumenta com a diminuição do tamanho dos elementos, o aumento deixa de ser significativo nos valores mais baixos dos elementos de malha analisados. Pela análise dos valores obtidos foram seleccionados os valores do ensaio 9. A Figura 48 mostra a malha aplicada, como já foi referido foram aplicados elementos de tamanhos diferentes ao longo da área da inserção.

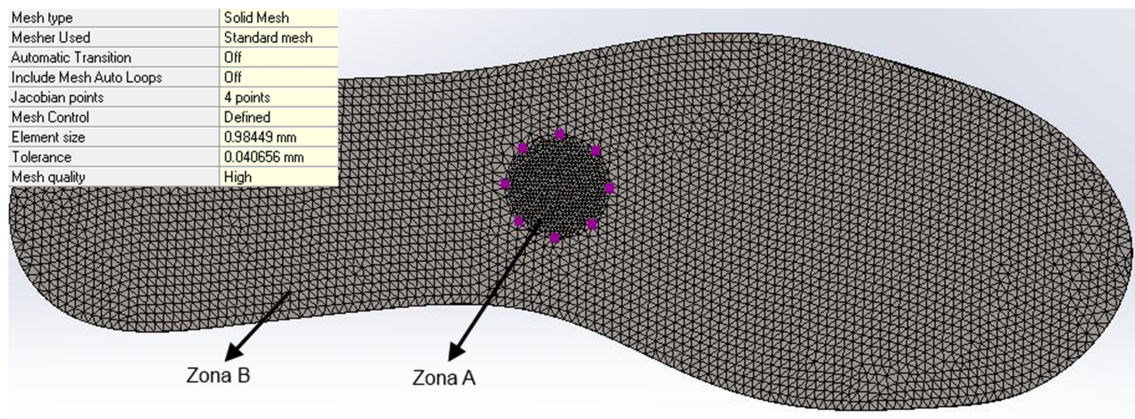


Figura 48 – Representação da malha aplicada.

5.4 Simulação

Depois de definidas as condições de fronteira e o tipo de malha a utilizar, neste subcapítulo são mostrados os resultados obtidos nas simulações efectuadas. Como já referido, o objectivo desta simulação numérica é o estudo da variação da espessura na deformação máxima obtida, para



tal foram efectuadas varias simulações não lineares para modelos de inserções com espessuras diferentes.

O material usado nas simulações foi o mesmo que segundo a caracterização química efectuada (secção 4.1.3) constitui este tipo de inserção. Deste modo foi utilizado um aço inoxidável AISI 301 nos ensaios realizados. Uma vez que foram realizadas simulações não lineares no domínio plástico foi necessário inserir no software a curva tensão-deformação real deste material. A Figura 49 mostra a curva tensão-deformação real usada.

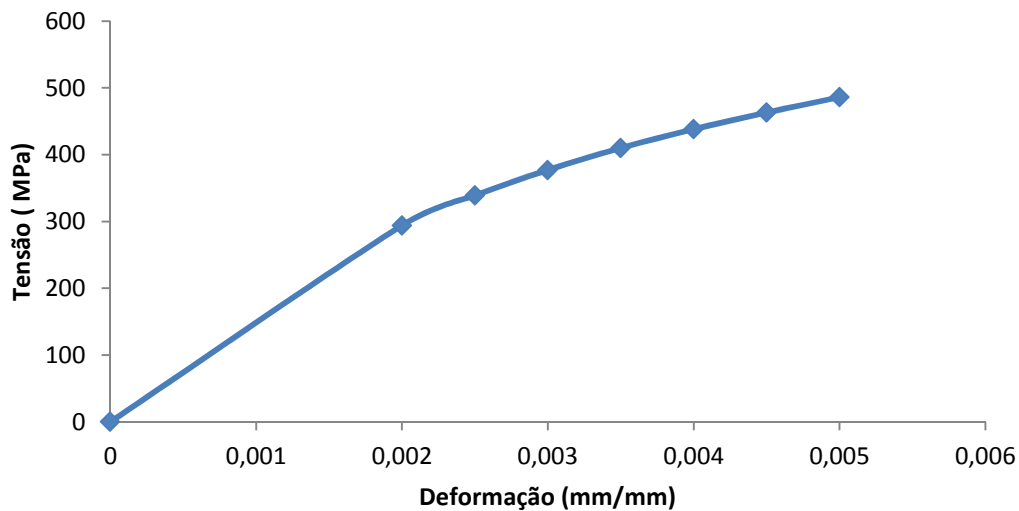


Figura 49 – Representação da curva tensão-deformação real do aço AISI 301 [40]

A Tabela 13 mostra os resultados obtidos nas diferentes simulações para espessuras diferentes, enquanto o Gráfico 14 mostra a curva resultante dessas mesmas simulações. A deformação máxima obtida ocorreu como seria de esperar para um modelo de espessura 0,45 mm (Figura 50). Em seguida é feita uma análise dos resultados.



Tabela 13 – Tabela da deformação máxima obtida em função da espessura

Espessura da Inserção (mm)	Deslocamento Máximo (mm)
0,45	0,669
0,55	0,633
0,65	0,573
0,75	0,5
0,85	0,353
0,95	0,298
1,05	0,282
1,25	0,164
1,35	0,129

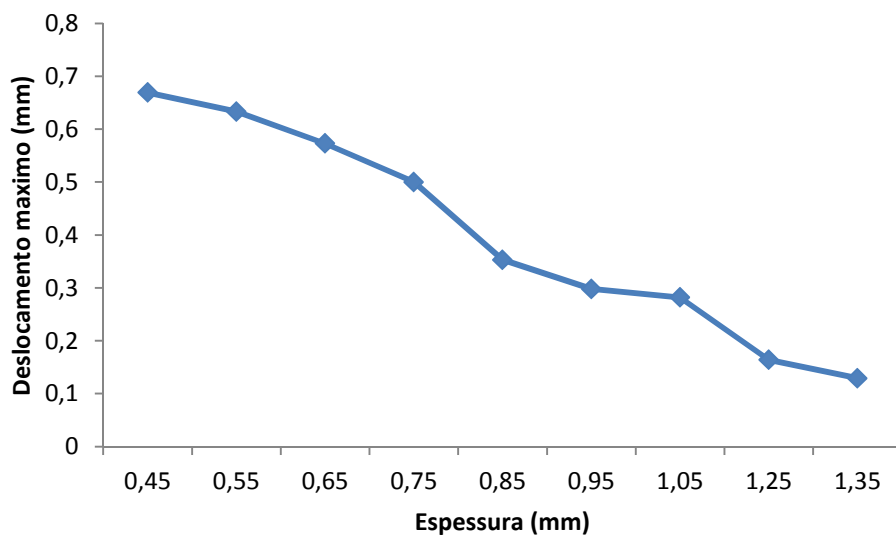


Gráfico 14 – Deformação máxima obtida em função da espessura

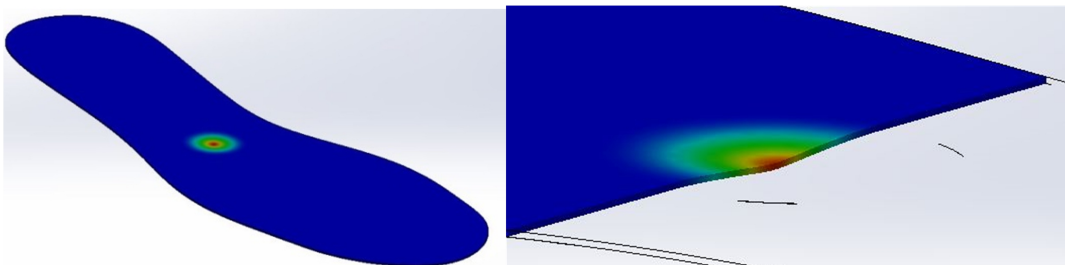


Figura 50 – Representação da deformação máxima obtida para o aço AISI 301 e 0.45 mm de espessura



5.5 Análise de Resultados

Os resultados obtidos na simulação numérica, quando comparados com os resultados obtidos nos ensaios experimentais (secção 4.1.1), apresentam valores bastante mais reduzidos. Enquanto na simulação numérica a deformação máxima obtida, para uma espessura de 0,45 mm, é de aproximadamente 0,7 mm, nos ensaios experimentais os valores obtidos são de cerca de 2 mm. Esta disparidade de valores pode estar relacionada com a curva tensão-deformação usada na simulação. A curva utilizada foi obtida num outro estudo por outros autores, logo não corresponde exactamente, à curva tensão-deformação do material testado experimentalmente. Seria interessante, como trabalho futuro, obter a curva tensão-deformação do material testado para voltar a efectuar uma simulação do mesmo género. Foi também impossível garantir uma simulação não linear rigorosamente equivalente aos ensaios experimentais o que pode também ter influência nos valores obtidos.

Uma vez que os resultados da simulação computacional, para 0,45 mm de espessura, não correspondem aos obtidos nos ensaios experimentais, não foi possível compreender a variação na deformação máxima causada pelas diferentes espessuras.





6 PROPOSTA DE INSERÇÃO ANTI PENETRAÇÃO DESENVOLVIDA



Neste capítulo finalizadas as análises às inserções existentes, aos novos materiais com aplicabilidade neste produto, e obtidos os modelos tridimensionais de inserções existentes, são mostradas as possíveis soluções para uma nova inserção anti penetração. A solução proposta foi concebida de forma a solucionar as lacunas e falhas das soluções existentes, visando a otimizar a protecção e o conforto conferido ao utilizador sem um aumento elevado dos custos de fabrico.

Estas soluções foram obtidas de acordo com os resultados dos diversos testes efectuados. A forma da inserção foi modelada a partir dos modelos tridimensionais de inserções anti penetração existentes, relativamente aos materiais escolhidos para cada zona da inserção, estes foram seleccionados de acordo com as funções que esta deve conter e de acordo com as análises realizadas.

A escolha da solução final foi efectuada por um processo iterativo. As primeiras soluções foram sendo consecutivamente melhoradas de forma a respeitar todas as restrições e funções que se pretende conferir a este novo produto.

6.1 Soluções Preliminares

Nesta secção serão mostradas e descritas as principais soluções que conduziram à solução final. A primeira solução a ser considerada encontra-se ilustrada na Figura 51.

Esta solução é composta na zona frontal por fibra de aramida e na zona traseira por uma sanduiche de aço e cortiça. A zona frontal composta por fibra de aramida permite que esta inserção anti penetração proporcione um bom nível de conforto e flexibilidade ao utilizador. Por outro lado a sanduiche metálica usada na zona do calcanhar confere rigidez impedindo lesões no calcanhar e funcionando como reforço estrutural do sapato. A cortiça é caracterizada pelas sua boa capacidade de absorção e distribuição de energia aliada a estas qualidades encontra-se ainda o facto ser barata leve e biodegradável.

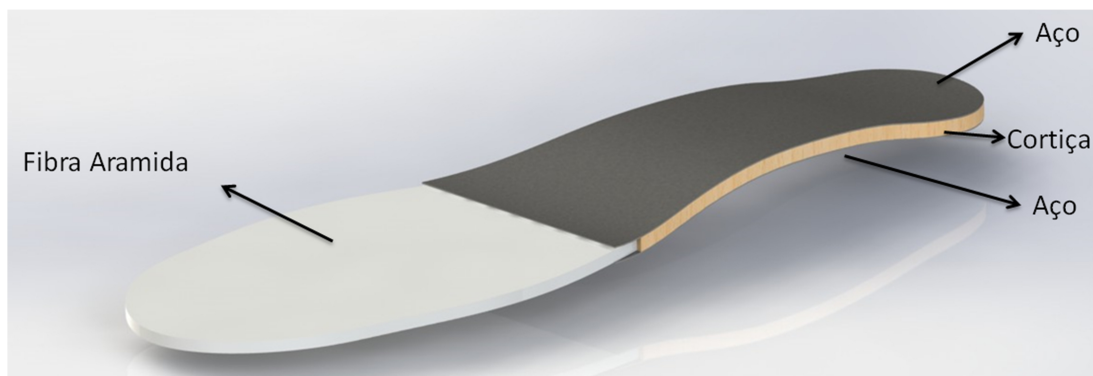


Figura 51 – Ilustração do modelo tridimensional da primeira solução preliminar

Tendo em conta os resultados dos testes efectuados a uma amostra de sanduiche aço cortiça (secção 4.3.1), na qual se verificou que estas estruturas não apresentam um bom comportamento mecânico à penetração esta solução foi posta de parte.

Devido aos resultados desfavoráveis apresentados pela sanduiche de cortiça, chegou-se a uma nova solução para a zona traseira do calcanhar. Esta solução apresenta uma zona traseira composta por varias camadas de materiais diferentes enquanto a parte da frente é composta pela membrana de polietileno descrita na secção 4.3.2. Os materiais constituintes da zona traseira representada na Figura 52 são os seguintes:

- A – Camada adesiva
- B – Compósito Poron®
- C – Cortiça
- D – Compósito Pure®

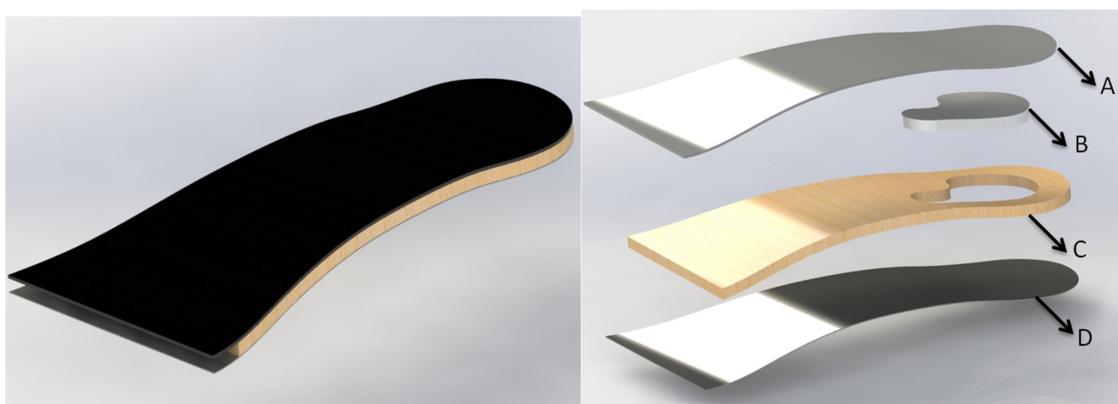


Figura 52 – Ilustração do modelo tridimensional da zona traseira da segunda solução preliminar



Nesta solução cada camada é constituída por materiais diferentes e desempenha um papel diferente na inserção. A primeira camada tem como função tornar o processo de montagem da inserção no sapato de segurança mais fácil. A segunda camada composta pelo material compósito Poron e a terceira composta por cortiça tem como função adsorver os impactos e potenciar o conforto da inserção. Por último o compósito Pure proporciona protecção anti penetração.

Com o objectivo de proporcionar uma maior protecção contra lesões do calcanhar, bem como aumentar o conforto nesta zona do pé, foi seleccionado um material diferente para o calcanhar. O compósito Poron é um material flexível com uma elevada taxa de absorção de energia, uma vez que o calcanhar é responsável por suportar metade do peso corporal este material ajuda a evitar lesões provenientes de quedas e minimiza a fadiga corporal.

Os resultados dos testes efectuados a membrana de polietileno e ao compósito Pure impossibilitam a utilização destes materiais, por esse motivo esta solução foi também posta de parte.

6.2 Solução Final

A solução final foi projectada tendo em conta os resultados obtidos nos testes a novos materiais que comprometeram as primeiras soluções criadas. Pretende-se assim que esta nova inserção seja capaz de conferir um bom nível de conforto ao utilizador sem que o nível de protecção diminua. Esta inserção prevê o uso de vários materiais, dispostos por camadas, que juntos aliam conforto e protecção, tornando esta solução completamente inovadora ao nível dos materiais usados. A Figura 53 mostra uma a solução final e em seguida são descritos os materiais utilizados.

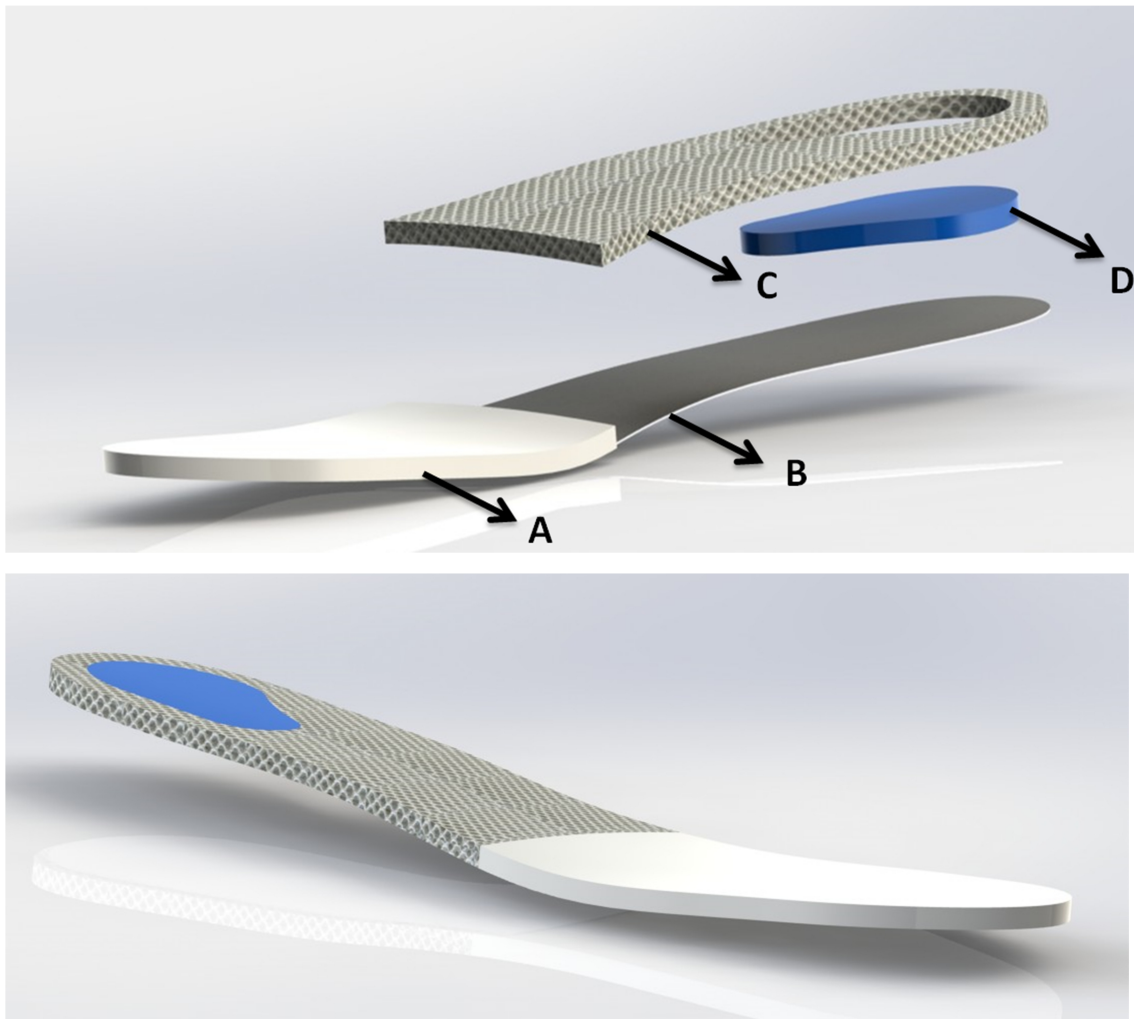


Figura 53 – Solução final de uma nova inserção anti penetração

- **A - Fibra de aramida:** Este material é já utilizado em algumas inserções anti penetração (secção 2.4.1), a sua principal vantagem é ser flexível, e ter uma boa absorção de energia. Devido a estas qualidades este material é usado na parte frontal da inserção onde se pretende conferir flexibilidade para que o pé se possa movimentar sem restrições.
- **B – Aço:** A protecção na zona traseira da inserção é conferida recorrendo uma camada de aço inoxidável AISI 301 com 0.45 mm de espessura. Foi escolhido este aço devido os bons resultados apresentados nos testes à penetração a inserções já existentes (secção 4.1.1). Este material apresenta também características que permitem a sua estampagem de acordo com a forma do pé. Por ser um material rígido o aço impede a torção desta zona da inserção funcionando como reforço estrutural e impedindo lesões



musculares nesta zona do pé. Será também conferida uma pintura especial ao aço para facilitar o processo de adesão a sola do sapato.

- **C – 3D spacers:** Pelas análises efectuadas a diferentes tipos de spacers provou-se que estes apresentam excelentes propriedades para ser aplicados na nova inserção anti penetração. Estes materiais já confirmaram melhores propriedades ao nível do conforto comparados com os materiais mais usados actualmente. [37] Pelas análises efectuadas às diferentes amostras foi possível seleccionar um tipo de spacers em detrimento dos restantes. Apesar do conforto térmico ser importante, as principais variáveis tidas em consideração foram a espessura e a energia de compressão por unidade de superfície: Tendo isso em consideração o spacer que melhor se adapta a esta aplicação, dos analisados, é o spacer LMA como comprova a informação contida na secção 4.3.4.
- **D – PORON® Performance Cushioning:** Esta membrana desenvolvida pela empresa PORON, é actualmente usada entre outras aplicações no calçado militar. Este material apresenta excelentes propriedades de absorção de energia mesmo com espessuras reduzidas. O calcanhar é responsável por suportar metade do peso corporal, devido a isto é necessário prestar especial atenção a esta zona do pé. A membrana PORON® Performance Cushioning, além de otimizar o conforto nesta zona importante do pé, permite evitar lesões derivadas de quedas em altura. Para mais informações sobre as características mecânicas deste material consultar Anexo C.

A solução apresentada permite pela combinação de materiais, ser uma alternativa inovadora as inserções existentes actualmente no mercado. Esta inserção está principalmente focada no conforto, com o objectivo de tornar o calçado de segurança mais confortável.

6.2.1 Processo de Montagem no Calçado de Segurança

O processo de montagem da inserção anti penetração é um factor que tem uma grande importância na aceitação da inserção por parte dos fabricantes de calçado de segurança. Depois de ter sido analisados os diferentes processos usados nos vários fabricantes (secção 2.5.1), essa

informação foi usada de modo a projectar uma inserção compatível com todos eles. O processo de montagem mais vantajoso é o processo de strobagem, uma vez que além de evitar o uso da palmilha de montagem reduz as etapas no fabrico do sapato, strobagem até ao momento apenas é possível em inserções de fibras de aramida. A inserção proposta é a primeira inserção composta por diferentes materiais a possibilitar o processo de strobagem. Este processo é possível uma vez que foi concebida uma margem extra ao longo da inserção anti penetração como se pode verificar na Figura 54. No entanto esta inserção permite ser montada no sapato de segurança pelos restantes métodos usados na indústria.

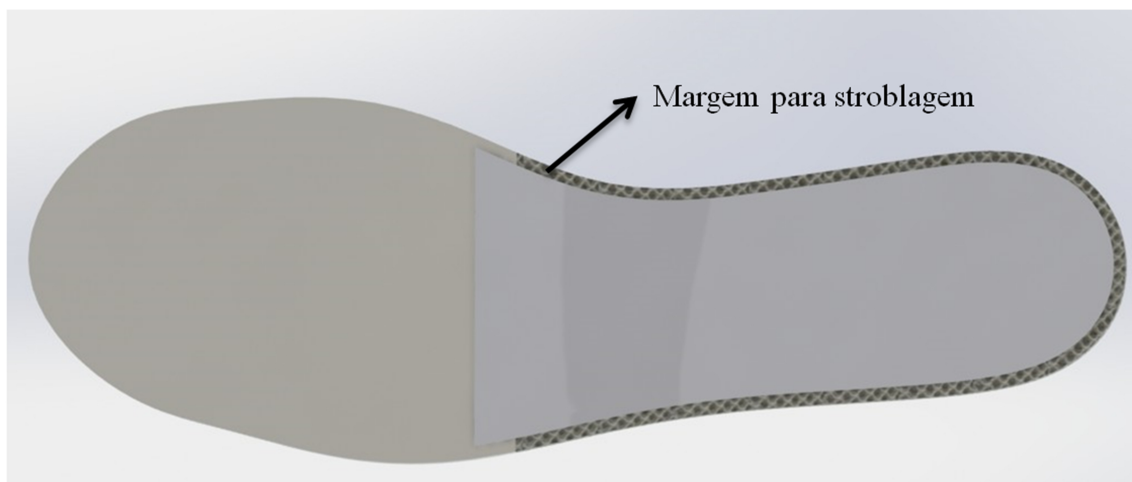


Figura 54 – Margem para processo de strobagem na inserção anti penetração proposta

6.2.2 Junção das Camadas

A junção das várias camadas constituintes da inserção é também importante para o seu comportamento e tempo de vida. O adesivo seleccionado para unir as várias camadas de materiais diferentes foi uma resina de epoxy, este material é obtido através de uma mistura entre vários componentes que após uma reacção química exotérmica dão origem a um material sólido. Devidas as boas propriedades conferidas, este tem uma grande aplicabilidade em várias áreas da engenharia, de entre as características das resinas de epoxy que possibilitam e aconselham a sua aplicabilidade nesta inserção destacam-se as seguintes: [41] [42]

- Forte adesão a praticamente todos os materiais;
- Boa estabilidade dimensional depois do endurecimento;
- Excelentes propriedades mecânicas (corte, tracção, compressão, choque, abrasão);



- Boa resistência a produtos químicos;
- Impermeabilidade;
- Bom Isolamento térmico.

O ponto crítico da união entre diferentes materiais é a união entre o aço (B - Figura 53) e a fibra de aramida (A - Figura 53). Sendo estes os materiais que conferem protecção é necessário garantir uma correcta união, para isso foram previstas duas soluções distintas:

- Resina de epoxy – A união entre estes dois materiais pode ser efectuada de forma análoga as restantes camadas, recorrendo a uma resina de epoxy (Figura 55);

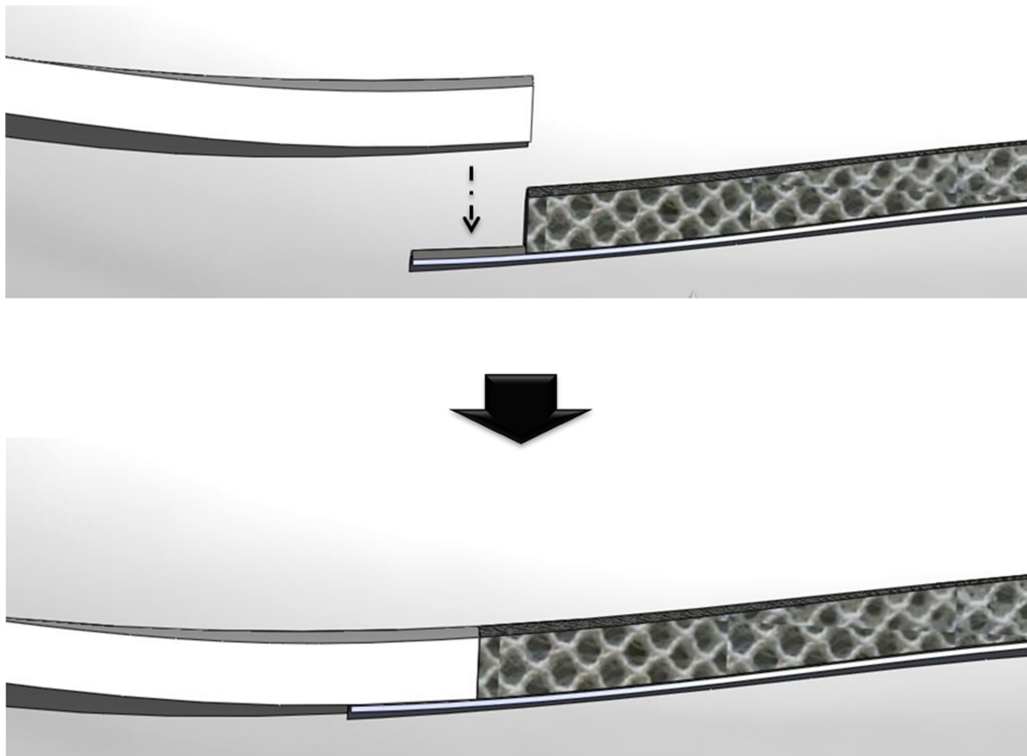


Figura 55 – União das camadas de fibra de aramida e aço com resina de epoxy

- Cravamento mecânico – Para garantir uma melhor fixação podem ser usado rebites como mostra a Figura 56, esta forma de fixar os materiais garante uma melhor adesão entre as camadas, mas torna o fabrico da inserção mais complexo.

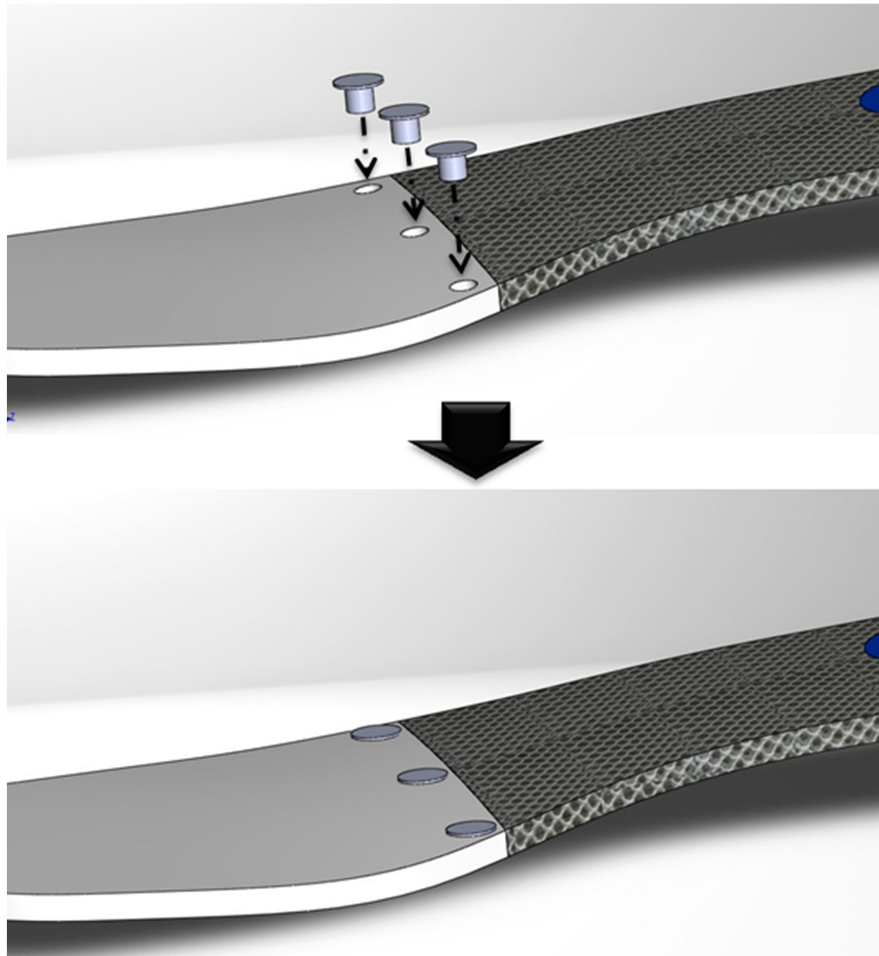


Figura 56 - União das camadas de fibra de aramida e aço por acravamento mecânico





7 CONSIDERAÇÕES FINAIS



7.1 Conclusão

O sector do calçado é visto no contexto empresarial nacional como um exemplo de exploração, este bom momento é o reflexo de uma busca continua por inovação e reformulação dos processos produtivos que catapultou o calçado português para o topo do calçado mundial. Esta área continua a dar provas do seu valor, tornando-se numa das indústrias mais promissoras a nível nacional. O subsector do calçado de segurança tem de certa forma seguido esta evolução, assumindo um compromisso dinâmico na procura por novas soluções que visem aumentar o valor dos produtos criados.

De uma outra perspectiva, o calçado de segurança como um EPI fundamental na segurança dos operários nos locais de trabalho carece de algumas melhorias para uma completa aceitação. Os componentes que requerem especial atenção, neste tipo de calçado são a inserção anti penetração e a biqueira de protecção. Esta dissertação focou-se no estudo de todas as variáveis e conceitos relacionados com a inserção anti penetração. Foram efectuados vários testes e análises aos principais tipos de inserções anti penetração existentes no mercado com o objectivo de reportar toda a informação imprescindível para o desenvolvimento de uma nova inserção

As análises efectuadas mostraram que existem dois grandes tipos de inserções usadas actualmente, inserções metálicas e inserções em fibra de aramida. As inserções metálicas são relativamente similares na espessura, material constituinte e comportamento mecânico. Comparadas com as inserções em fibra de aramida, as metálicas apresentam uma menor deformação quando sujeitas solicitações, e menor flexibilidade.

Visando a aplicabilidade de novos materiais inovadores, foram efectuados testes a materiais poliméricos e estruturas metálicas. Os materiais testados revelaram resultados desfavoráveis quando sujeitos aos testes normativos, o que reprovou a sua aplicabilidade. Neste contexto recorreu-se a uma combinação de vários materiais já validados a nível industrial que juntos perfazem uma nova abordagem a este problema.

Para a criação de modelos computacionais que auxiliaram a criação de uma nova inserção, e permitiram simulações computacionais, foram utilizadas técnicas de engenharia inversa. Nesta fase este projecto seguiu uma vertente didáctica onde foram analisadas várias metodologias de Engenharia Inversa com o objectivo de seleccionar a que melhor se adapta a este caso. Este



estudo resultou também na criação de uma nova metodologia sustentável, validada pela comunidade científica, numa conferência internacional.

Por fim é proposta uma nova inserção anti penetração para calçado de segurança que confere uma clara melhoria ao nível do conforto e protecção. Esta nova inserção, composta por um conjunto de diferentes materiais dispostos por camadas, alia uma boa flexibilidade na parte frontal, amortecimento de quedas e impactos, rigidez estrutural na zona traseira, boa resiliência à compressão e uma baixa espessura. Apesar de todas as características e melhorias esta nova inserção é possível de ser fabricada sem recorrer a processos complexos. Em suma é proposto uma nova inserção completamente inovadora ao nível da combinação de materiais usados e processos, que se adapta aos métodos de fabrico usados actualmente na indústria. A sua aplicação a nível industrial tornaria o calçado de segurança mais confortável o que se pode traduzir num aumento do uso e consequentemente da produção.

7.2 Trabalhos Futuros

Com o objectivo de encontrar materiais inovadores aplicáveis neste componente foram efectuados testes a materiais distintos, os quais se revelaram incapazes de cumprir as especificações requeridas pela normalização associada a este tipo de componentes. Neste sentido, como trabalho futuro seria compensador testar novos materiais ou variações diferentes dos materiais já testados de forma a validar a sua utilização neste componente.

Outra variável desta dissertação que deve ser explorada no futuro é a aplicabilidade da inserção desenvolvida, na indústria. Para tal seria necessário a criação de um protótipo físico para que fosse possível efectuar todos os testes contemplados pelas normas em vigor. Seria também importante testar o método de junção das várias camadas constituintes da inserção anti penetração e principalmente o método proposto para a montagem no sapato de segurança. Após isto, esta inserção poderia ser aplicada num sapato de segurança de modo a validar as melhorias associadas e a sua utilização na produção em série de calçado de segurança.

Esta dissertação serve de início a um estudo continuo na busca de soluções e materiais inovadores, para um produto inserido num sector promissor e com uma necessidade crescente de inovação.





REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Indústria Portuguesa de Calçado e Artigos de Pele, *Report Portugal*, 2003.
- [2] APICCAPS, 2012.
- [3] E. Communities, *Statistical analysis of socio-economic costs of accidents at work in the European Union*, Luxembourg, 2004.
- [4] EUROSTAT, "eurostat," [Online]. Available: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>. [Acedido em 2013].
- [5] A. Goldcher e D. A. b, "Chaussures de sécurité, de protection et de travail," *EMC-Podologie*, pp. 12-23, 2005.
- [6] C. S. Ferreira, M. J. Abreu, J. V. Silva e J. P. Mendonça, "Safety footwear and its protective components, a way to promote health and safety at work," em *SHO2014*, 2014.
- [7] "Kings," [Online]. Available: <http://www.kingsafetywear.com/>. [Acedido em 2013].
- [8] K. Okayasu, "Shoe Insole". Estados Unidos Patente 5001848, 26 Março 1991.
- [9] Aleven e A. A. W., "Puncture Resistant Insole for Safety Footwear". Canada Patente 5285583, 15 Fevereiro 1994.
- [10] F. A. Harrison, "Puncture-Resistant and Impact Resistant Safety Shoe Insert". Canada Patente 5996257, 7 Dezembro 1999.
- [11] G. Karall, "Material Consisting of Several Layers for a Protecting Parts of the Body". Estados Unidos Patente 0180517 A1, 25 Setembro 2003.
- [12] G. Ventura, "Puncture Resistant Insole". Estados Unidos Patente 5996255, 24 Agosto 1998.
- [13] L. Battaglia, "Metalic Insert for Working and Safety Shoes". Italia Patente 1 354526 A1, 22 Outubro 2003.
- [14] R. L. Blackburn e C. H. Dennis, "Protective, Orthotic Insert for Footwear". Estados Unidos Patente 6871422 B2, 29 Março 2005.



- [15] "steelflex.com," [Online].
- [16] L. Sartor, M. Callegari e A. Montemurro, "Insole Having Puncture-resistant Properties for Safety Footwear". Estados Unidos Patente 8082685 B2, 27 Dezembro 2011.
- [17] S. L. Costa, J. V. Silva, N. Peixinho e J. P. Mendonça, "Advanced Metallic Solution for Toe Cap Component," *ASME*, Novembro 2013.
- [18] Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, *Guia Técnico - Sector do Calçado*, Lisboa, Novembro 2000.
- [19] G. J. e N. R., *Konstruieren von PKW-Karosserien*, Munique: Springer, 2006.
- [20] R. R. Martin e D. T. Várady, "Report on data acquisition, preprocessing and other tasks," pp. 7-30, 1996.
- [21] M. Chang e S. C. Park, "Reverse engineering of a symmetric object," *Computers & Industrial Engineering*, pp. 311-320, 14 Dezembro 2007.
- [22] V. Raja e K. J. Fernandes, em *Reverse Engineering - An industrial Perspective*, Springer Science, 2007.
- [23] Q. Peng e H. Sanchez, "3D Digitizing Technology in Product Reverse Design".
- [24] H. Woo, E. Kang e W. S., "A new segmentation method for point cloud data.," *Int J Adv Manuf Techno*, pp. 167-217, 2002.
- [25] "Point Cloud Library," [Online]. Available: <http://pointclouds.org/>. [Acedido em 14 Setembro 2013].
- [26] A. Courtial e E. Vezzetti, "New 3d segmentation approach for reverse engineering," *Int J Adv Manuf Techno*, pp. 900-907, 2008.
- [27] Roland, *LPX-600 User's Manual*, 2001.
- [28] J. V. Silva, S. L. Costa, H. Puga, N. Peixinho e J. P. Mendonça, "Sustainable Reverse Engineering Methodology Assisting 3D Modeling of Footwear Safety Metallic Components," *ASME*, Novembro 2013.
- [29] European Committee for Standardization, *EN 12468 - Foot and leg protectors - Requirements and test methods for toecaps and penetration resistant inserts*, Bruxelas, Maio 2010.
- [30] P. Tasch e F. Damiani, *X-Rays Fluorescence Spectroscopy*, Técnicas de Análise e Caracterização de materiais, 2000.



- [31] "aalco," [Online]. Available: <http://www.aalco.co.uk/>. [Acedido em 9 Junho 2013].
- [32] J. Sousa-Martins, D. Kakogiannis, F. Coghe, B. Reymen e F. Teixeira-Dias, "Behaviour of sandwich structures with cork compound cores subjected to blast waves," *Engineering Structures*, pp. 140-146, 2013.
- [33] S. Sanchez-Saez, E. Barbero e J. Cirne, "Experimental study of agglomerated-cork-cored structures subjected to ballistic impacts," *Materials Letters*, pp. 2152-2154, 2011.
- [34] C. P. Gameiro, J. Cirne e G. Gary, "Experimental study of the quasi-static and dynamic behaviour of cork under compressive loading," *J Mater Sci*, p. 4316–4324, 2007.
- [35] K. Karthikeyana, B. Russell, N. Fleck, H. Wadley e V. Deshpande, "The effect of shear strength on the ballistic response of laminated composite plates," *European Journal of Mechanics A/Solids*, pp. 35-53, 2013.
- [36] A. Luximon, Handbook of footwear design and manufacture, Hong Kong: Woodhead Publishing, 2013.
- [37] X. Ye, H. Hu e X. Feng, "Development of the Warp Knitted Spacer Fabrics for Cushion Applications," *Journal of Industrial Textiles*, 2008.
- [38] L. Yanping e H. H, "Compression property and air permeability of weft-knitted spacer fabrics," *Journal of Textile Institute*, pp. 366-372, 2011.
- [39] "SolidWorks Help," 2012. [Online]. Available: <http://help.solidworks.com/>. [Acedido em 2013].
- [40] D. E. Miller, "Determinating Physical Properties of Ferrous and Non-Ferrous Structural Sheet Materials at Elevated Temperatures," *Armour Research Foundation*, pp. 115-120, 1953.
- [41] S. Tognanab, W. Salgueiroa, A. Somozaa e A. Marzocc, "Measurement of the Young's modulus in particulate epoxy composites using the impulse excitation technique," *Materials Science and Engineering A*, pp. 4619-5623, 2010.
- [42] S. Lima, K. Zenga e C. Heb, "Morphology, tensile and fracture characteristics of epoxy-alumina nanocomposites," *Materials Science and Engineering A*, p. 5670–5676, 2010.





ANEXO A

Equipamentos e métodos utilizados nos diferentes testes e análises

A.1 Caracterização Química

Para efectuar a caracterização química dos materiais foi utilizado o espectrómetro Philips X'Unique II X-Ray existente no departamento de engenharia mecânica (Figura 57) Este equipamento recorre à fluorescência de raios X para determinar os elementos e a respectiva percentagem presentes numa determinada amostra.

Numa primeira etapa procedeu-se à preparação das amostras das várias inserções. A preparação consistiu no corte de pequenas fracções de cada inserção, seguido de um desbaste superficial de modo a permitir uma correcta análise.

A análise à percentagem de carbono foi efectuada noutra equipamento especializado neste tipo de análise mais específica.



Figura 57 – Espectrómetro Philips X'Unique II X-Ray

A.2 Análise Metrológica

Tendo em consideração a espessura reduzida de todas as inserções, foi usado um micrómetro analógico para a medição. O equipamento utilizado (Figura 58) apresenta as seguintes características:

Tabela 14 – Características do micrómetro Mitutoyo utilizado



Micrómetro Mitutoyo

Gama de medição	0-25 mm
Resolução	0.01 mm
Exactidão (DIN 863-1)	4 μm
Escalas	Tambor e veio graduado
Fuso de medição	Passo 0,5 mm com bloqueador
Força de medição	5-10 N

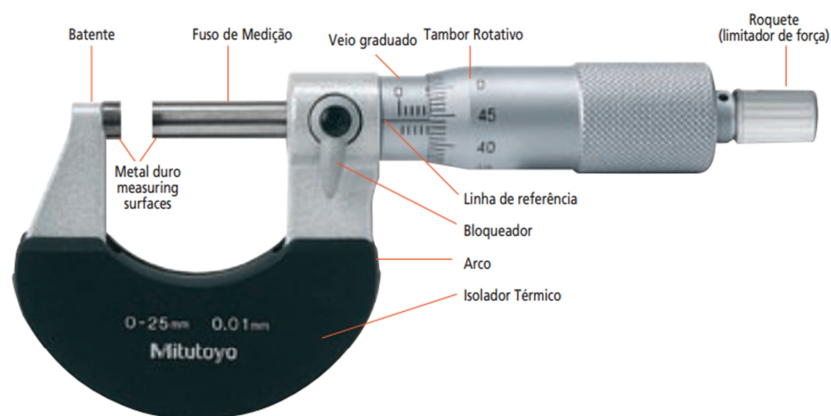


Figura 58 – Micrómetro Mitutoyo utilizado

Para facilitar o processo de medição foi usado um suporte tal como mostra a Figura 59

Estas medições foram efectuadas no laboratório de metrologia do departamento de engenharia mecânica, respeitando todas as condições e normas previstas num laboratório metrológico.



Figura 59 – Suporte utilizado na medição

A.3 Análise dos Spacers

A.3.1 Permeabilidade ao ar

A permeabilidade ao ar é determinada através da medição da velocidade de um fluxo de ar que passa perpendicularmente, através de um provete. A permeabilidade ao ar é uma propriedade do material que permite o ar passar através dos seus poros, desta forma a velocidade de passagem do ar, depende essencialmente do tamanho e distribuição dos poros ou interstícios.

Para determinar os valores desta propriedade nos spacers foram efectuados testes com duas pressões diferentes, 100 e 200 Pa, utilizando o aparelho Voronoi-Delaunay meshing scheme (Figura 60).



Figura 60 – Equipamento Voronoi-Delaunay meshing scheme usado para a medição da permeabilidade ao ar dos spacers.

A.3.2 Permeabilidade ao vapor de água

A permeabilidade ao vapor de água é uma variável muito importante para o balanço térmico e conforto. Para a análise a esta variável foi usado o equipamento retratados na Figura 61.



Figura 61 – Equipamento usado para a medição da permeabilidade ao vapor de água dos spacers

A.3.3 Espessura e propriedades térmicas

Para efectuar uma análise da espessura e propriedades térmicas dos spacers foi usado o alambeta (Figura 62). Este equipamento, existente no departamento de engenharia têxtil da universidade do Minho, faz uma avaliação objectiva da sensação quente/frio. Esta sensação é importante para o conforto térmico de um sapato. Embora a inserção anti penetração não tenha como principal objectivo potenciar o conforto térmico, esta variável não deixa de ser importante na escolha de um material para esta aplicação.



Figura 62 – Alambeta usado para a medição da espessura e propriedades térmicas dos spacers



O Alambeta mede a absorptividade térmica, isto é, o toque térmico, detectando qualquer processamento de superfície. O aparelho simula o fluxo de calor entre a pele humana com a temperatura e o tecido com temperatura durante o contacto inicial. O Alambeta avalia, simultaneamente, as propriedades térmicas estacionárias, como a resistência e a condutividade e as propriedades dinâmicas, como a absorptividade térmica e a difusividade térmica. Para além das propriedades térmicas, ele mede também as espessuras das amostras, submetidas a ensaios.

Este aparelho avalia os seguintes parâmetros:

- h - espessura do tecido (mm);
- b - absorptividade térmica (prop. transitória – $Ws_{1/2}/m^{\circ}K$);
- (10^{-3}) - condutividade térmica (propriedade estacionária ou dinâmica – $W/m^{\circ}K$)
- r (10^{-3}) - resistência térmica (prop. estacionária – $m^2^{\circ}K/W$);
- ou a (10^{-6}) - difusão térmica (m^2/s). Descreve a velocidade de propagação da temperatura (calor) no material: impulso térmico;
- $Q_{max} = q$ (W/m^2) – fluxo térmico ou toque térmico.

A.3.4 Propriedades de compressão

Para efectuar os testes as diferentes propriedades de compressão dos spacers recorreu-se ao *Kawabata Evaluation System for Fabrics* (KES). O KES consiste numa serie de instrumentos utilizados para medir as propriedades de materiais têxteis, este equipamento fornece uma capacidade única, não só para prever a resposta humana, mas também para fornecer uma compreensão de como diferentes materiais contribuem para a percepção de conforto.

Existem vários tipos de equipamentos KES que avaliam propriedades diferentes, neste caso foi usado um especializado em testes de compressão semelhante ao da Figura 63.



Figura 63 – KES usado para analisar os spacers a compressão





ANEXO B

Resultados das análises efectuadas aos vários tipos de spacers



B.1 Permeabilidade ao Ar

O ensaio de permeabilidade ao ar foi efectuado a para duas pressões, distintas 100 e 200 Pa.

Tabela 1. Valores de permeabilidade ao ar a 100 Pa para os spacers.

100 Pa					
Spacer	LMA	N-02509-A01	N-02652-A01	N-02593-A01	N-02718-A01
N	10	10	10	10	10
Média	2507	2752	2127	1798	2496
Desvio padrão	176,197	31,198	27,908	43,410	36,270
Coef. de variação	7,028%	1,134%	1,312%	2,414%	1,453%

Tabela 2. Valores de permeabilidade ao ar a 200 Pa para os spacers.

200 Pa					
Spacer	LMA	N-02509-A01	N-02652-A01	N-02593-A01	N-02718-A01
N	10	10	10	10	10
Média	3675	4028	3197	2644	3742
Desvio padrão	254,656	28,205	44,981	59,851	64,944
Coef. de variação	6,929%	0,700%	1,407%	2,264%	1,736%

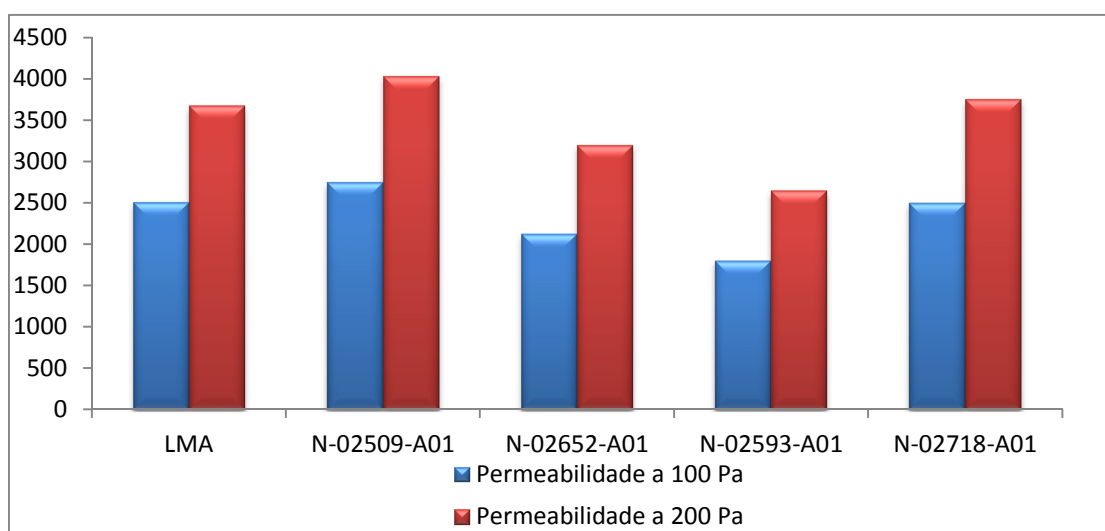


Gráfico 15 – Permeabilidade ao ar para para 100 e 200 Pa



B.2 Massa por Unidade de Superfície

Tabela 3. Valores de massa por unidade de superfície para os spacers.

Massa por unidade de superfície (M_{us})					
Spacer	LMA	N-02509-A01	N-02652-A01	N-02593-A01	N-02718-A01
N	3	3	3	3	3
Média	265,46667	538,7933704	468,7574232	420,2666667	308,125
Desvio padrão	0,8326664	0,464477216	2,282234475	1,222020185	1,653594569
Coef. de variação	0,314%	0,086%	0,487%	0,291%	0,537%

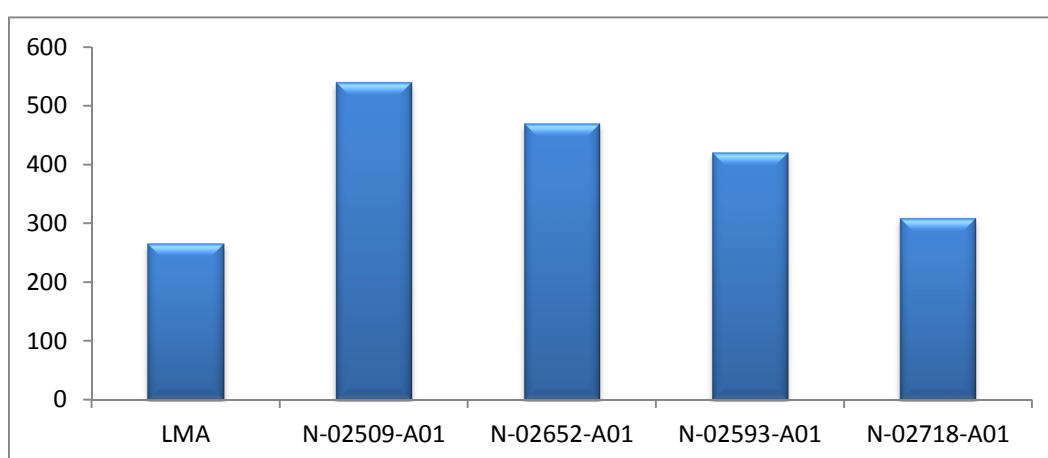


Gráfico 16 – Massa por unidade de superfície dos spacers

B.3 Espessura

A espessura dos spacers foi medida pelo Alambeta.

Tabela 4. Espessura dos spacers.

Espessura (mm)			
	Média	Desvio padrão	Coef. variação
LMA	4,168	0,100598	2,414%
N-02652-A01	3,062	0,014832	0,484%
N-02593-A01	4,206	0,023022	0,547%
N-02718-A01	3,458	0,010954	0,317%
N-02509-A0	6,692	0,010954	0,164%

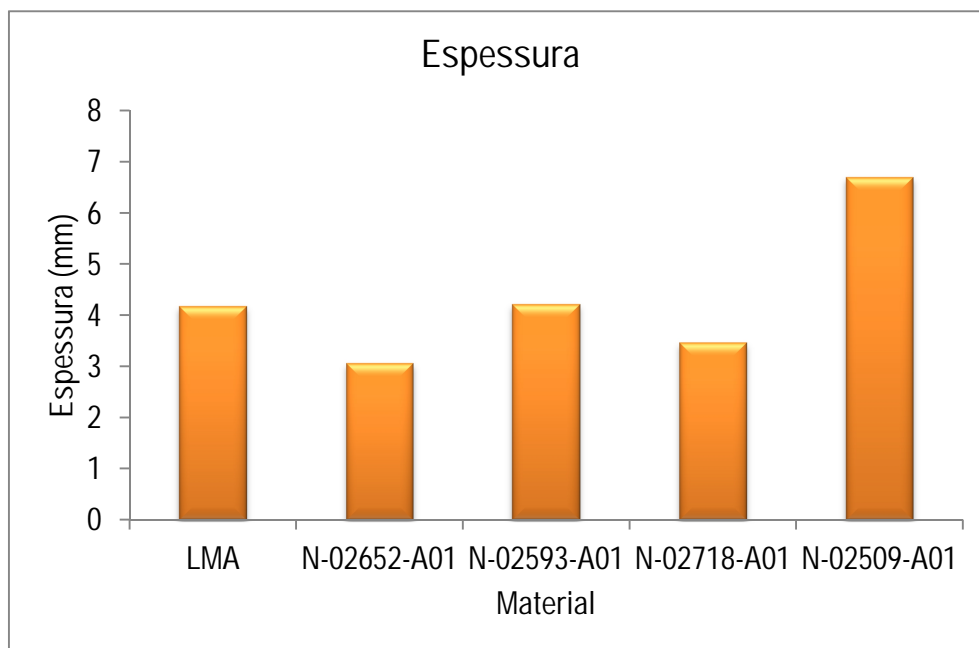


Gráfico 17 – Espessura dos spacers analisados

B.4 Propriedades Térmicas

Os valores relativos as propriedades termicas foram também obtidos pelo Alambeta.

Tabela 5. Valores das características térmicas para o spacer da LMA.

N	Característica	Média	Desvio Padrão	Coef. de variação
5	($\cdot 10^{-3}$) (W/m $^{\circ}$ K)	51,88	1,80610077	3,481%
5	a ($\cdot 10^6$) (m 2 /s)	0,8844	0,108933	12,317%
5	b (Ws $^{1/2}$ /m $^{\circ}$ K)	55,44	1,6772	3,025%
5	r ($\cdot 10^{-3}$) (m 2 $^{\circ}$ K/W)	80,38	1,279453	1,592%
5	h (mm)	4,168	0,100598	2,414%
5	q (W/m 2)	0,5474	0,053276	9,732%



Tabela 6. Valores das características térmicas para o spacer N-02652-A01.

N	Característica	Média	Desvio Padrão	Coef. de variação
5	(*10 ⁻³) (W/m ^o K)	49,74	0,36469165	0,733%
5	a (*10 ⁶) (m ² /s)	0,6338	0,117576	18,551%
5	b (Ws ^{1/2} /m ^o K)	63,22	5,586323	8,836%
5	r (*10 ⁻³) (m ² °K/W)	61,46	0,167332	0,272%
5	h (mm)	3,062	0,014832	0,484%
5	q (W/m ²)	0,6506	0,038266	5,882%

Tabela 7. Valores das características térmicas para o spacer N-02593-A01.

N	Característica	Média	Desvio Padrão	Coef. de variação
5	(*10 ⁻³) (W/m ^o K)	57,6	0,80311892	1,394%
5	a (*10 ⁶) (m ² /s)	0,782	0,221053	28,268%
5	b (Ws ^{1/2} /m ^o K)	67,3	12,44046	18,485%
5	r (*10 ⁻³) (m ² °K/W)	73,02	1,003494	1,374%
5	h (mm)	4,206	0,023022	0,547%
5	q (W/m ²)	0,5822	0,130256	22,373%

Tabela 8. Valores das características térmicas para o spacer N-02718-A01.

N	Característica	Média	Desvio Padrão	Coef. de variação
5	(*10 ⁻³) (W/m ^o K)	52,94	0,32093613	0,606%
5	a (*10 ⁶) (m ² /s)	0,704	0,074806	10,626%
5	b (Ws ^{1/2} /m ^o K)	63,3	3,422718	5,407%
5	r (*10 ⁻³) (m ² °K/W)	65,3	0,463681	0,710%
5	h (mm)	3,458	0,010954	0,317%
5	q (W/m ²)	0,6012	0,031987	5,321%



Tabela 9. Valores das características térmicas para o spacer N-02509-A01.

N	Característica	Média	Desvio Padrão	Coef. de variação
5	($\cdot 10^{-3}$) (W/m $^{\circ}$ K)	74,46	0,98893883	1,328%
5	a ($\cdot 10^6$) (m 2 /s)	0,5596	0,0878	15,690%
5	b (Ws $^{1/2}$ /m $^{\circ}$ K)	100,32	8,554063	8,527%
5	r ($\cdot 10^{-3}$) (m 2 $^{\circ}$ K/W)	89,94	1,228007	1,365%
5	h (mm)	6,692	0,010954	0,164%
5	q (W/m 2)	0,7256	0,076833	10,589%

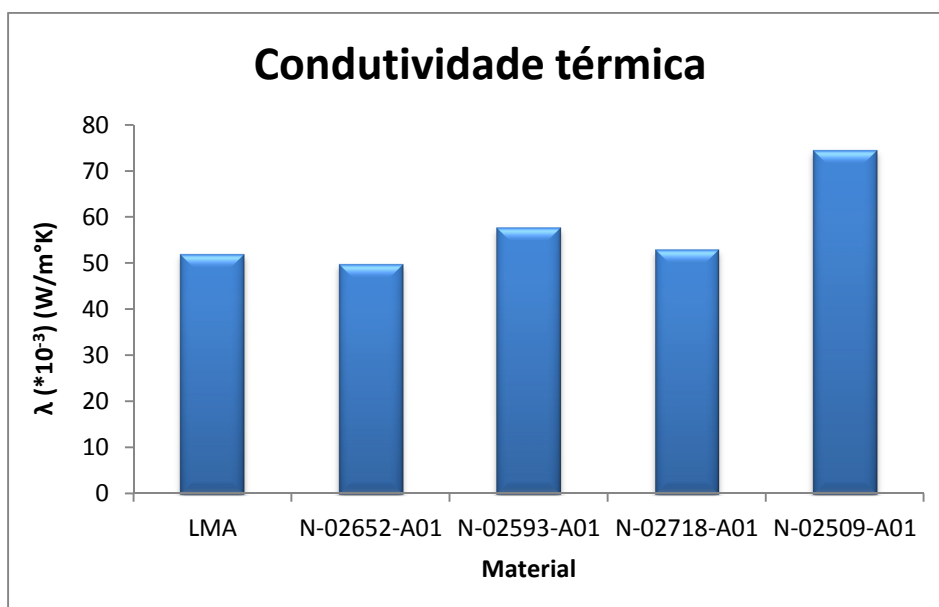


Gráfico 18 – Condutividade térmica dos spacers analisados

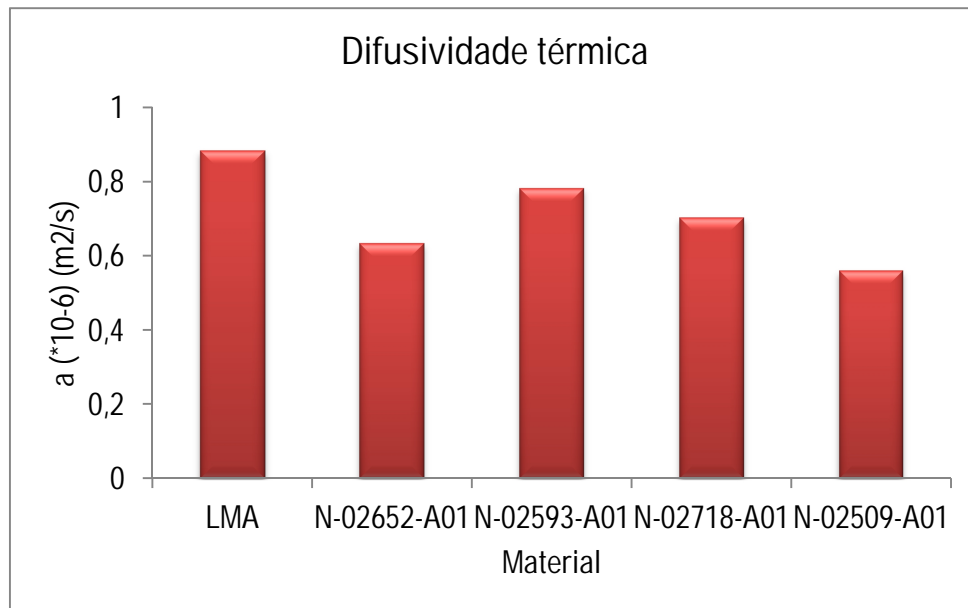


Gráfico 19 – Difusividade térmica dos spacers analisados

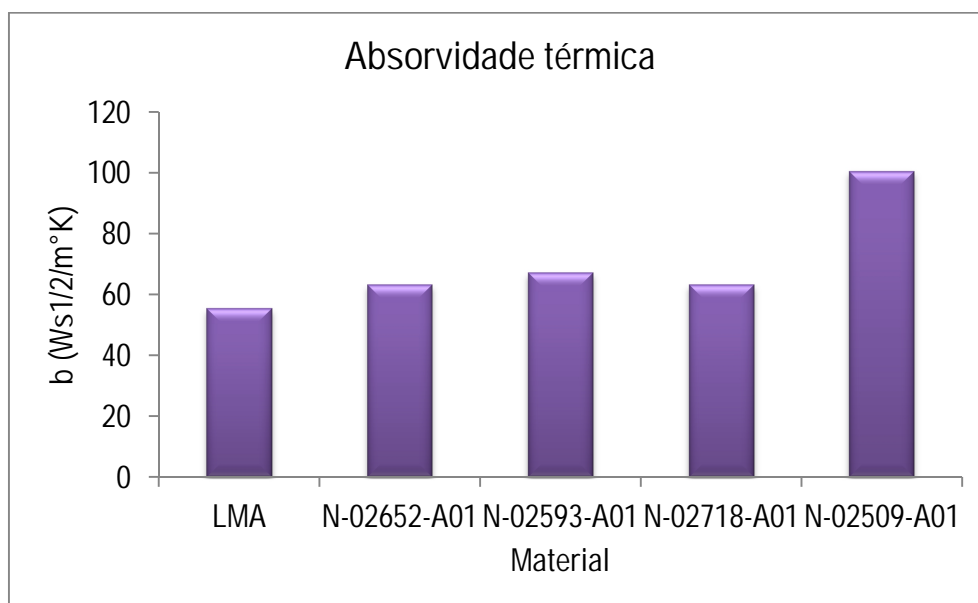


Gráfico 20 – Absorvidade térmica dos spacers

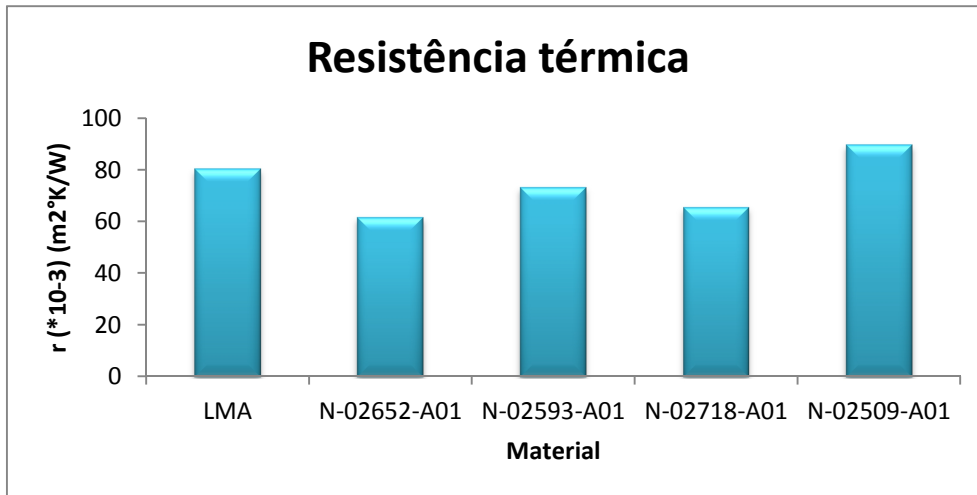


Gráfico 21 – Resistência térmica dos spacers analisados

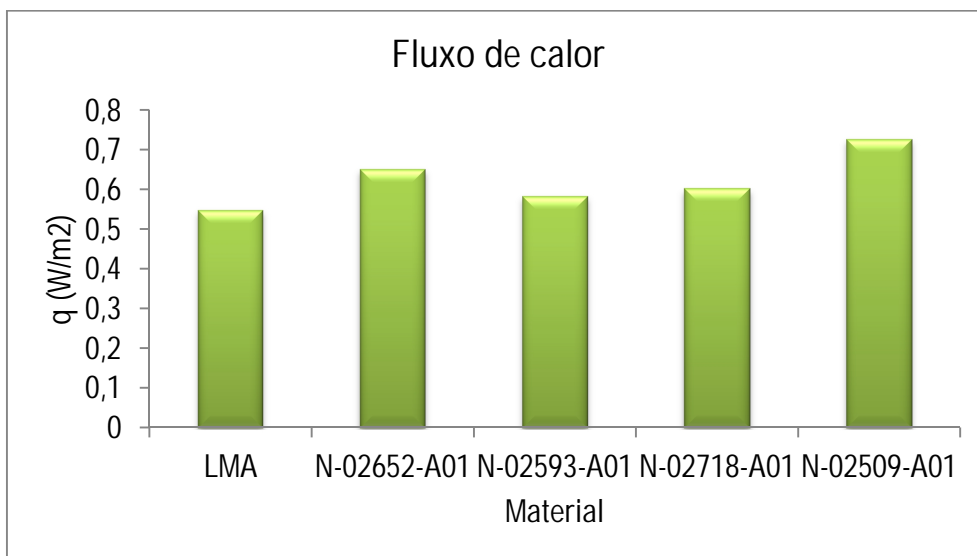


Gráfico 22 – Fluxo de calor dos spacers analisados

B.5 Propriedades de Compressão

As tabelas e as figuras abaixo apresentam os valores dos ensaios efectuados no *Kawabata Evaluation System for Fabrics* (KES) para os spacers ensaiados.



Tabela 10. Valores do ensaio do KES para o spacer da LMA.

N	Característica	Média	Desvio Padrão	Coef de variação
5	Lc	0,6996	0,042659114	6,098%
5	Wc (N.m/m ²)	1,7418	0,159695648	9,168%
5	Rc (%)	62,416	2,19348581	3,514%
5	T0 (mm)	2,8018	0,070524464	2,517%
5	Tm (mm)	1,687	0,090139891	5,343%
5	EMC (%)	35,628	3,476596036	9,758%

Tabela 11. Valores do ensaio do KES para o spacer da N-02652-A01.

N	Característica	Média	Desvio Padrão	Coef de variação
5	Lc	0,693	0,026990739	3,895%
5	Wc (N.m/m ²)	0,4216	0,019982492	4,740%
5	Rc (%)	74,392	2,386235529	3,208%
5	T0 (mm)	3,1384	0,005504544	0,175%
5	Tm (mm)	2,8948	0,012696456	0,439%
5	EMC (%)	7,754	0,391573748	5,050%

Tabela 12. Valores do ensaio do KES para o spacer N-02718-A01.

N	Característica	Média	Desvio Padrão	Coef de variação
5	Lc	0,6742	0,054393933	8,068%
5	Wc (N.m/m ²)	0,5268	0,024437676	4,639%
5	Rc (%)	73,826	7,207782599	9,763%
5	T0 (mm)	3,4942	0,007328028	0,210%
5	Tm (mm)	3,1804	0,024815318	0,780%
5	EMC (%)	8,978	0,712685064	7,938%



Tabela 13. Valores do ensaio do KES para o spacer N-02593-A01.

N	Característica	Média	Desvio Padrão	Coef de variação
5	Lc	0,8594	0,068762635	8,001%
5	Wc (N.m/m ²)	0,4076	0,051100881	12,537%
5	Rc (%)	78,584	12,55989371	15,983%
5	T0 (mm)	4,0512	0,001643168	0,041%
5	Tm (mm)	3,8614	0,023060789	0,597%
5	EMC (%)	4,688	0,539091829	11,499%

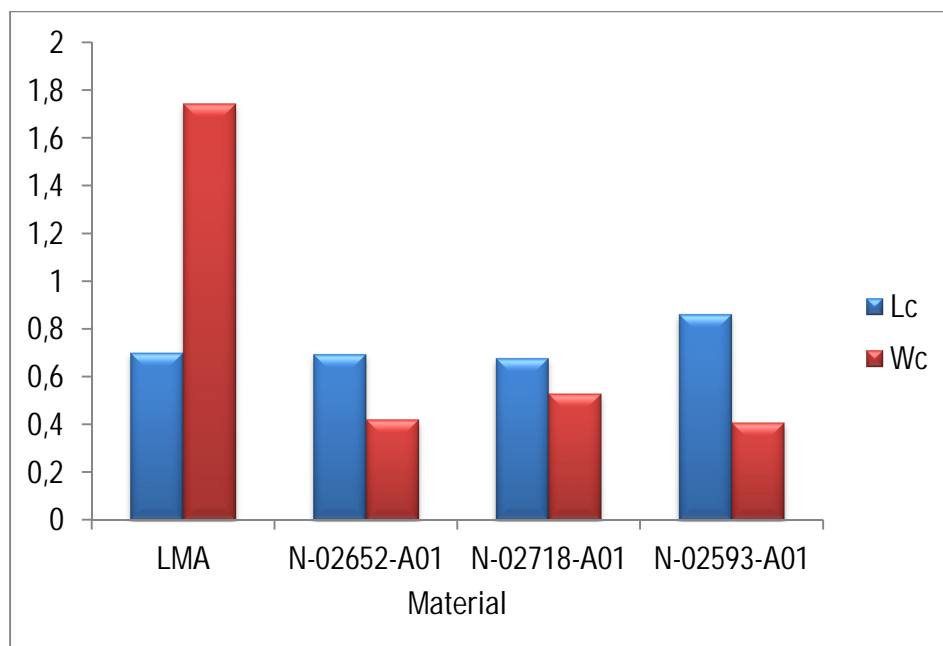


Gráfico 23 – Linearidade da curva compressão/espessura, Lc, e energia de compressão por unidade de superfície, Wc para os spacers

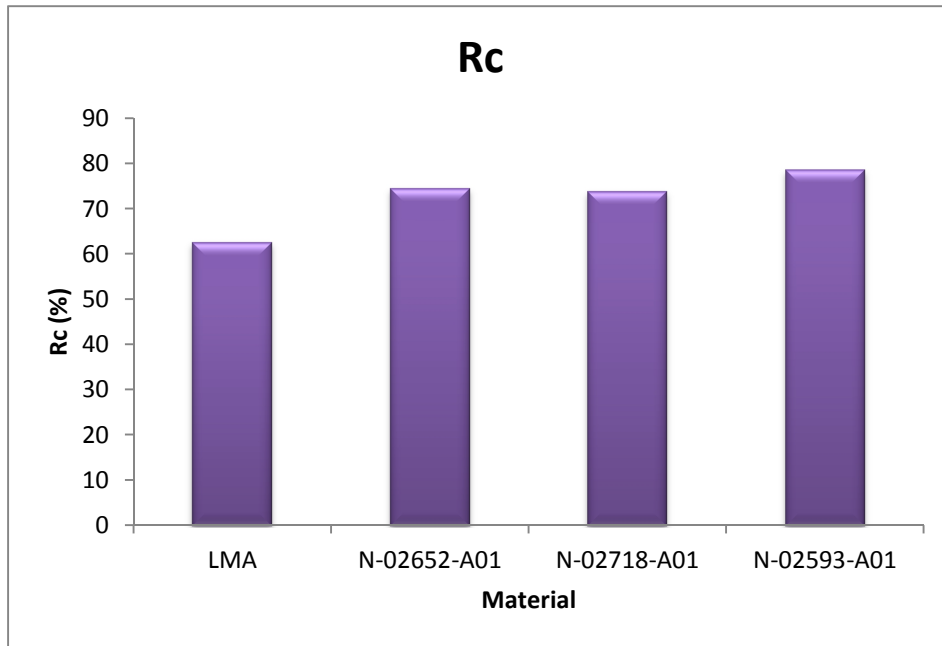


Gráfico 24 – Resiliência á compressão, Rc, para os spacers analisados

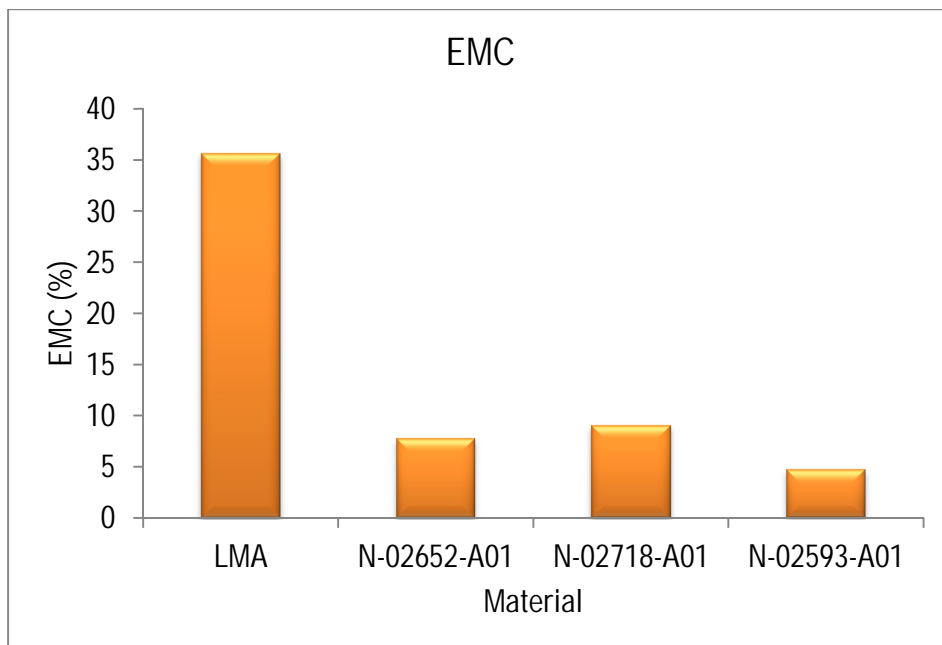


Gráfico 25 – Compressão a 10 cN/m², EMC, para os spacers analisados



B.6 Ensaios de Atrito

Os ensaios de atrito foram efectuados no frictorq.

Tabela 14. Valores do ensaio de atrito no frictorq para o spacer da LMA.

N	Característica	Média	Desvio Padrão	Coef de variação
5	$\mu_{\text{máx}}$	0,35644	0,031082439	8,720%
5	$\mu_{\text{cinético}}$	0,279	0,023521756	8,431%
5	MáxTorque	0,358	0,035101681	9,805%
5	MeanTorque	0,3302	0,026841386	8,129%

Tabela 15. Valores do ensaio de atrito no frictorq para o spacer N-02593-A01.

N	Característica	Média	Desvio Padrão	Coef de variação
5	$\mu_{\text{máx}}$	0,26116	0,0241265	9,238%
5	$\mu_{\text{cinético}}$	0,20628	0,016188329	7,848%
5	MáxTorque	0,29494	0,027276968	9,248%
5	MeanTorque	0,23132	0,017015346	7,356%

Tabela 16. Valores do ensaio de atrito no frictorq para o N-02718-A01

N	Característica	Média	Desvio Padrão	Coef de variação
5	$\mu_{\text{máx}}$	0,28398	0,021302042	7,501%
5	$\mu_{\text{cinético}}$	0,24196	0,008252151	3,411%
5	MáxTorque	0,3205	0,023868703	7,447%
5	MeanTorque	0,27324	0,009313592	3,409%



Tabela 17. Valores do ensaio de atrito no frictorq para o N-02652-A01.

N	Característica	Média	Desvio Padrão	Coef de variação
5	$\mu_{\text{máx}}$	0,1959	0,008962422	4,575%
5	$\mu_{\text{cinético}}$	0,1645	0,005519511	3,355%
5	MáxTorque	0,22126	0,010112517	4,570%
5	MeanTorque	0,18578	0,006231132	3,354%

Tabela 18. Valores do ensaio de atrito no frictorq para o

N	Característica	Média	Desvio Padrão	Coef de variação
5	$\mu_{\text{máx}}$	0,25608	0,033841277	13,215%
5	$\mu_{\text{cinético}}$	0,21512	0,035897451	16,687%
5	MáxTorque	0,28918	0,038216711	13,216%
5	MeanTorque	0,24294	0,040560671	16,696%

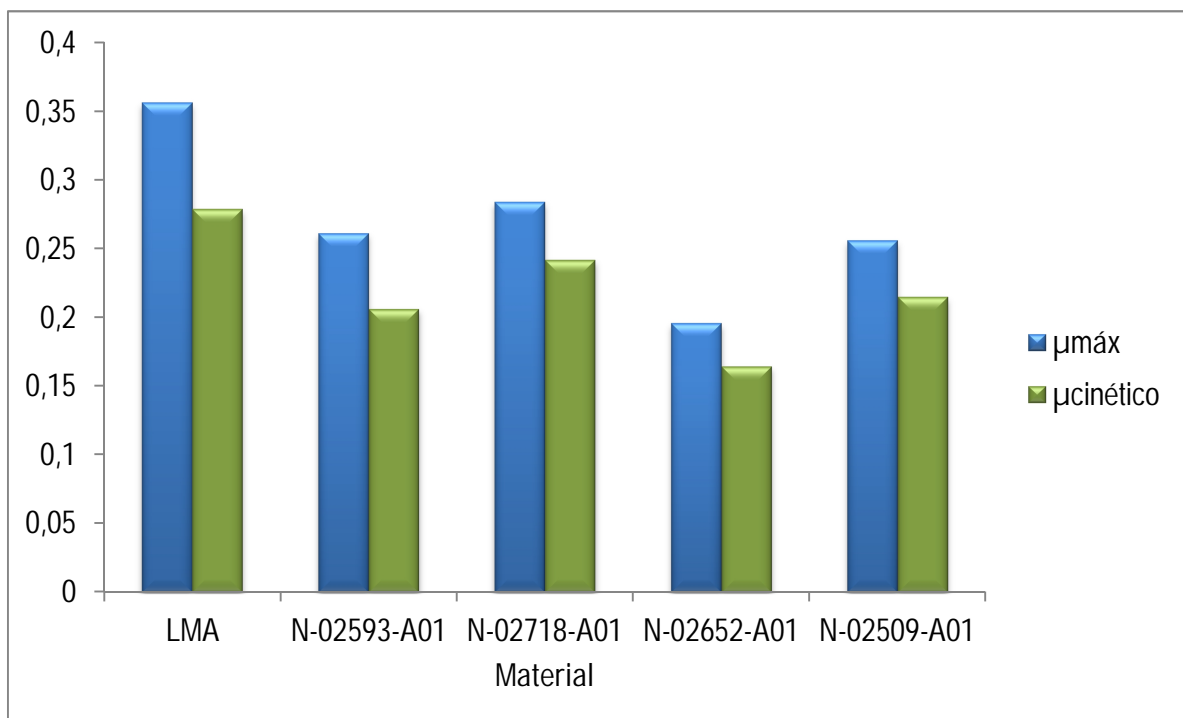


Gráfico 26 – Atrito máximo e atrito cinético dos spacers analisados

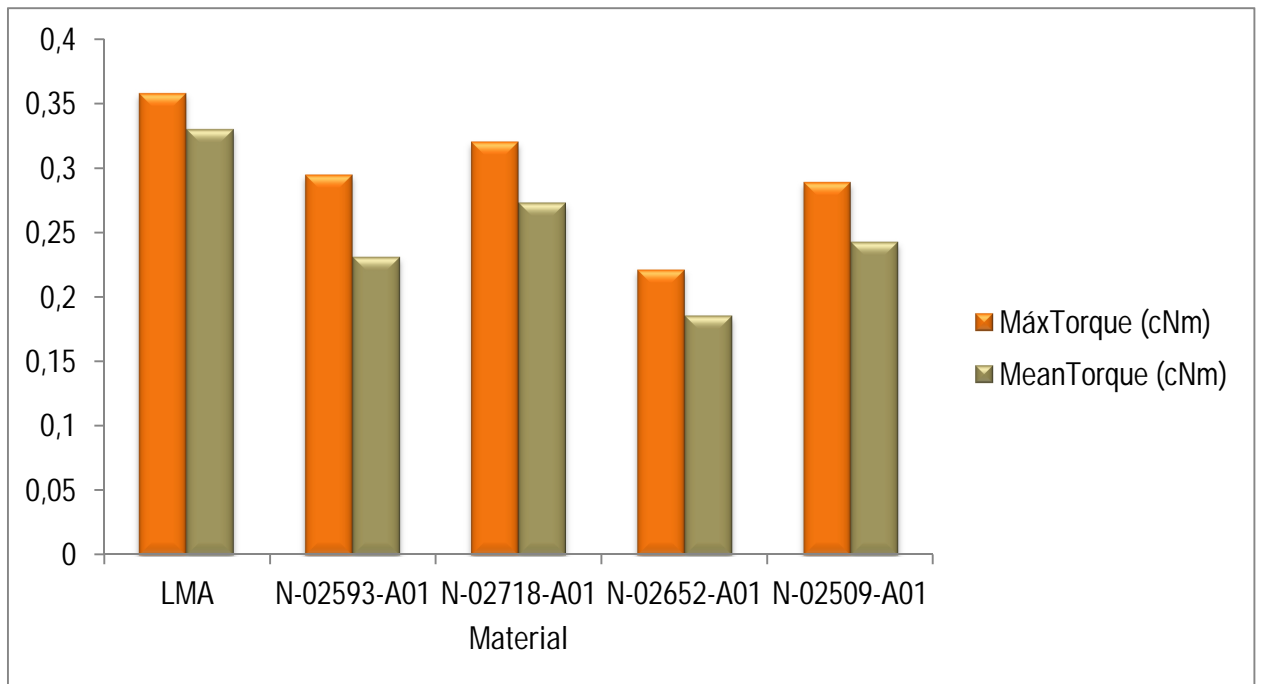


Gráfico 27 – MaxTorque e Mean Torque dos spacers analisados

B.7 Permeabilidade ao Vapor de Água

Tabela 19. Valores do ensaio de permeabilidade ao vapor de água para os spacers.

Material	N	WVP=24M/At			índice de WVP (%)		
		Média	Desvio padrão	Coef de variação	Média	Desvio padrão	Coef de variação
Referência		818,252					
LMA	2	709,227	11,113	1,567%	86,675	1,3582	1,567%
N-02509-A01	2	646,0798	43,409	6,719%	78,958	5,3051	6,719%
N-02718-A01	2	727,255	189,851	26,105%	88,879	23,202	26,105%
N-02693-A01	2	825,258	4,1840	0,507%	100,856	0,511	0,507%
N-02652-A01	2	861,501	6,27609	0,729%	105,285	0,767	0,729%

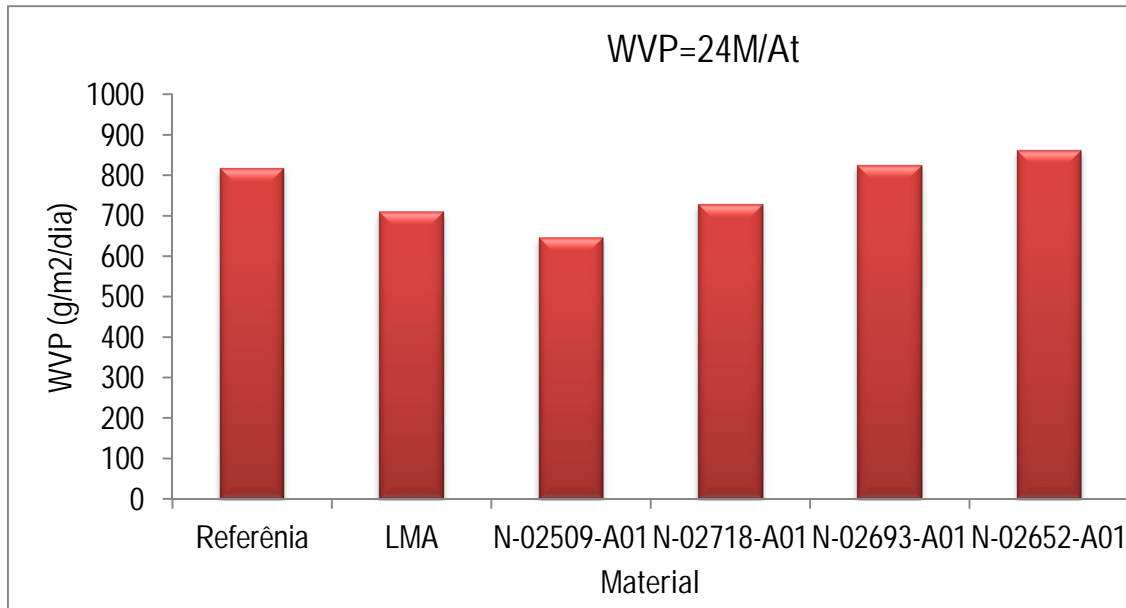


Gráfico 28 – Permeabilidade ao vapor de água dos spacers analisados

Os valores de Permeabilidade ao vapor de água dos spacers variam entre ≈ 646 para o N-02509-A01 e ≈ 861 para o N-02652-A01. Estes valores são muito superiores aos valores encontrados por Bagherzadeth e os colegas [1], que quando testaram spacers de 100% PES obtiveram um valor de $1320 \text{ g/m}^2/\text{dia}$.

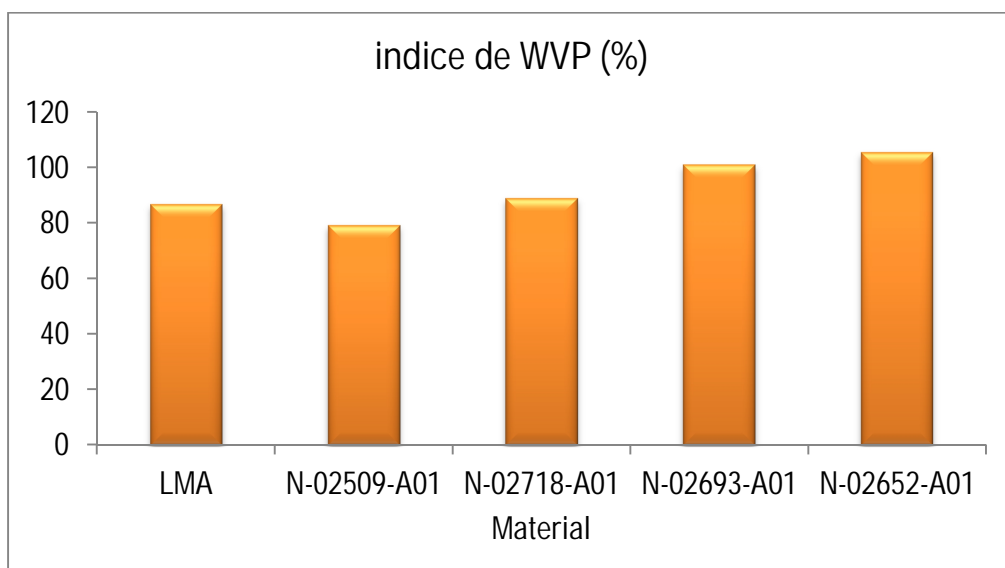


Gráfico 29 – Índice de permeabilidade ao vapor de água dos spacers analisados





ANEXO C

Propriedades físicas da membrana Poron® Performance Cushioning



PORON® Performance Cushioning - Typical Physical Properties

PROPERTY	TEST METHOD	PRODUCT			
FORMULATION		PORON Performance Shock Absorbing (F-Firm)			
*DENSITY, lb. / ft ³	ASTM D3574-95 Test A	15	17	20	25
Specific Gravity		0.24	0.27	0.32	0.40
Tolerance, %		± 10			
*STANDARD THICKNESS		See Product Availability			
Tolerance, %		± 10		± 15	
STANDARD COLOR		Royal Blue (63), Black (04), Light Grey (60), Dark Green (85)			
AIR PERMEABILITY	Gurley Densometer	Open Cell - Breathable			
CUSHION FACTOR, Grade Thickness	SATRA TM159:1992	-	-	-	-
*COMPRESSION SET, % max.	ASTM D3574 Test D @ 158°F (70°C)	10			
*COMPRESSION FORCE DEFLECTION, psi kPa	0.2"/min. Strain Rate Force Measured @ 25% Deflection	6 - 16 41 - 111	8 - 20 55 - 138	10 - 25 69 - 172	15 - 45 103 - 310
HARDNESS, Durometer	Shore "O"	18	20	24	36
HYDROLYSIS RESISTANCE	ASTM D3574 Test J / Test D after autoclaved 5 hrs @ 250°F (121°C)	Good Resistance			
Compression Set, % Max		5			
RESILIENCE, Shore Instrument Resiliometer, avg (Ball Rebound Tester)	ASTM D 2632-96, Vertical Rebound	14	15	16	21
WATER VAPOR TRANSFER, Typical g/ft ² /24hrs (g/m ² /24hrs)	Based on ASTM E96-00	>19 (200)			
WATER ABSORPTION, % Wt Gain	Based on ASTM D570	< 20			
SKIN CONTACT	Primary Skin Irritation - FHSA	Pass			
TEAR STRENGTH, pli, min. kN/m	ASTM D624 Die C	6 11	10 18	10 19	12 21
*TENSILE ELONGATION, % min.	ASTM D3574 Test E	100			
*TENSILE STRENGTH, psi, min. kPa	ASTM D3574 Test E	70 483	90 621	120 827	140 965
TEMPERATURE RESISTANCE, max					
Recommended Constant Use	ASTM D746-98	90°C (194°F)			
Recommended Intermittent Use		121°C (250°F)			
STAINING	ASTM D925-88	No Stain			
CHEMICAL RESISTANCE		PORON Urethanes are unaffected by mild organic acids and bases. They show modest swelling with oils and greases and other linear hydrocarbons. Strong polar solvents will greatly swell PORON Urethanes. In most cases, physical properties recover to a great extent as the solvents evaporate.			
ADDITIONAL SOLVENT RESISTANCE	Soap and Water 50/50	No tackiness or surface deterioration			
ANTIMICROBIAL PROTECTION	AATCC TM90 JIS Z 2801 AATCC TM30(ii)	PASS			

Notes: 1. All metric conversions are approximate. 2. Additional technical services are available. 3. Information listed based on typical physical properties. 4. *Standard testing property; Certificate of Compliance available per lot.



ROGERS CORPORATION-HIGH PERFORMANCE FOAMS DIVISION US 607.786.8112 | Europe +32.9.235.36.11 | Asia +86.512.6258.2700