



DESENVOLVIMENTO DE CALÇADO ADAPTÁVEL A VÁRIOS NÍVEIS DE CONFORTO

**Aplicação de tecnologias de fabrico aditivo para
produção de componentes de calçado**

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto

Célia Rosa Marques Silva

Leiria, 30 de março de 2022

Esta página foi deixada em branco intencionalmente.



DESENVOLVIMENTO DE CALÇADO ADAPTÁVEL A VÁRIOS NÍVEIS DE CONFORTO

Aplicação de tecnologias de fabrico aditivo para produção de componentes de calçado

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto

Célia Rosa Marques Silva

Dissertação realizada sob a orientação do Professor Doutor Joel Oliveira Correia Vasco
e do Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, professores na ESTG

Leiria, 30 de março de 2022

Esta página foi deixada em branco intencionalmente.

Originalidade e Direitos de Autor

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionada a Autora e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizado, a saber, Curso de Mestrado de Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto, no ano letivo 2021/2022, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Esta página foi deixada em branco intencionalmente.

Dedicatória

Ao Marcos, Rosa e José. Obrigada por tornarem o nosso lar o sítio mais desejado.

Esta página foi deixada em branco intencionalmente.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Joel Vasco, orientador, pela disponibilidade, orientação, ajuda na parte científica e prática, a qual foi fundamental para a progressão e concretização deste projeto;

Ao Professor Doutor Carlos Capela pela coorientação.

À empresa Jomarpi, Lda, onde exerço a minha atividade profissional, e particularmente a Amilcar Pimenta e José Pimenta pelo apoio, *Know-How* e colaboração em várias etapas do processo.

À empresa CadFlow, particularmente a António Tomás e Nuno Duarte pela cedência do software Siemens NX e pela participação na execução dos modelos em *lattice*.

À empresa 3D Ever na pessoa de Carina Ramos pela participação na impressão dos corpos de prova pela tecnologia SLA da Formlabs

À empresa Codi, na pessoa de Carlos Matos pela participação na impressão dos corpos de prova pela tecnologia Polyjet® da Stratasys.

À empresa EMETRÊS - Soc. Dist. de Equip. Gráficos, Lda em particular ao Rafael Mateus pelo empenho, partilha de conhecimento e participação na produção das peças pela tecnologia LSPc da Nexa 3D.

Ao CTCP- Centro Tecnológico da Indústria do Calçado de Portugal, nomeadamente a Maria José Ferreira pela disponibilidade com que nos recebeu e a José Luis Rodrigues pela ajuda na realização dos testes experimentais.

Esta página foi deixada em branco intencionalmente.

Resumo

No final do século passado, no setor do calçado, o paradigma da produção em massa foi alterado para um caminho de customização em massa em que o consumidor final tem um papel ativo no design. Neste século XXI as tecnologias inerentes à 4ª revolução industrial assim o permitem e potenciam esta dinâmica. Conscientes desta realidade as indústrias de calçado traçam uma estratégia de desenvolvimento de produtos dirigidos ao indivíduo com vista à realização dos seus desejos, sendo que o conforto do calçado é um dos mais prementes. Neste trabalho é realizado um estudo de um dos aspetos mais importantes do conforto do pé no sapato: o conforto da planta do pé, o que remete para os componentes palmilha e entressola do sapato. A biodinâmica e fisiologia do pé são estudadas e as zonas da planta do pé que são críticas em termos de necessidade de conforto são definidas. É desenvolvida uma geometria de uma entressola a caber dentro de uma sola pré-existente devidamente escolhida e modificada para o efeito. São seleccionadas diversas estruturas *lattice* que darão origem a corpos de prova que serão fabricados por tecnologias SLA, Polyjet® e LSPc. A tecnologia LSPc é seleccionada, bem como 3 tipologias de estruturas *lattice* que são impressas e sujeitas a testes mecânicos realizados no Centro Tecnológico do Calçado de Portugal (CTCP) para aferir as propriedades de amortecimento. Tendo como base os resultados dos testes a entressola é preenchida com as 3 tipologias de lattices devidamente distribuídas pelas zonas pré-definidas. A entressola é fabricada por tecnologia LSPc e são aferidos os custos. São retiradas conclusões acerca da viabilidade técnica e financeira do projeto.

Palavras-chave: Calçado, Conforto, Fabrico Aditivo, Entressola, Palmilha, Customização

Esta página foi deixada em branco intencionalmente.

Abstract

At the end of the last century, in the footwear sector, the paradigm of mass production was changed to a path of mass customization in which the final consumer plays an active role in the design. In this 21st century, the technologies inherent to the 4th industrial revolution thus allow and enhance this dynamic. Aware of this reality, the footwear industries outline a product development strategy aimed at the individual with a view to fulfilling their desires, with the comfort of footwear being one of the most important one. In this work, a study is carried out on one of the most important aspects of foot comfort in the shoe: the comfort of the sole of the foot, which refers to the insole and midsole components of the shoe. The biodynamics and physiology of the foot are studied and the areas of the sole of the foot that are critical in terms of comfort needs are defined. A midsole geometry is developed to fit inside a pre-existing sole, properly chosen and modified for this purpose. Several lattice structures are selected and will give rise to specimens that will be manufactured using SLA, Polyjet® and LSPc technologies. LSPc technology is selected as well as 3 typologies of lattice structures, these are printed and subjected to mechanical tests carried out in the Footwear Technological Center of Portugal (CTCP), to assess the damping properties. Based on the results of the tests, the midsole is filled with the 3 types of lattices properly distributed by the pre-defined zones. The midsole is manufactured using LSPc technology and costs are calculated. Conclusions are drawn about the technical and financial feasibility of the project.

Keywords: Footwear, Comfort, Additive Manufacturing, Midsole, Insole, Customization

Esta página foi deixada em branco intencionalmente.

Índice

Dedicatória	vii
Agradecimentos	ix
Resumo	xi
Abstract.....	xiii
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xxi
Lista de siglas e acrónimos.....	xxiii
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação e enquadramento do projeto.....	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Estrutura do trabalho.....	2
2. Estado da Arte	5
2.1. Indústria do calçado	5
2.1.1. Caracterização da indústria do calçado	5
2.1.2. O sapato e a sua construção.....	7
2.1.3. A customização em massa no setor do calçado.....	11
2.2. Tecnologias de fabrico aditivo.....	14
2.2.1. Tecnologias fabrico aditivo e a indústria do calçado	14
2.2.2. Tecnologias de fabrico aditivo: visão geral.....	16
2.2.3. Tecnologias fabrico aditivo para polímeros passíveis para produção de entressolas e palmilhas	19
2.3. As estruturas celulares no fabrico aditivo.....	30
2.4. Calçado produzido por tecnologias de fabrico aditivo	36
2.5. O pé e a pressão plantar	42
2.5.1. O pé	42
2.5.2. A pressão plantar e as vantagens do seu conhecimento	43
2.5.3. Sistemas de medição plantar.....	44
2.5.4. Identificação e distribuição da pressão plantar.....	45
2.5.5. Influência dos diferentes tipos de pé segundo o Arco Longitudinal Medial (ALM) – pé normal, pé plano e pé cavo na distribuição da pressão plantar	47
2.5.6. Influência do IMC na distribuição da pressão plantar.....	50

3.	Conceção e desenvolvimento do projeto.....	53
3.1.	A ideia e o seu desenvolvimento	53
3.2.	Conceito de fabricação do tipo de calçado	59
3.3.	Seleção da sola e desenho do volume da entressola	61
4.	Procedimentos experimentais.....	67
4.1.	Seleção e desenho das estruturas <i>lattice</i> . Desenho dos corpos de prova.	67
4.2.	Produção dos corpos de prova por fabrico aditivo	70
4.2.1.	Processo SLA da Formlabs	70
4.2.2.	Processo Polyjet® da Stratasys	72
4.2.3.	Processo LSPc da Nexa3D	74
4.3.	Testes Experimentais	82
5.	Análise e discussão dos resultados.....	85
5.1.	Viabilidade técnica	85
5.2.	Viabilidade económica	91
6.	Conclusões e trabalho futuro.....	97
	Bibliografia.....	101
	Anexos.....	111

Lista de Figuras

Figura 1 - Preço médio de exportação do par de sapatos entre os 20 maiores produtores (2020) [1].....	6
Figura 2 - O sapato e as suas peças constituintes, adaptado de [6].	8
Figura 3 - Processo tradicional de fabricação de calçado à medida [10].	12
Figura 4 - Esquema do processo de customização em massa e respetivas tecnologias a ele afetas [10].....	12
Figura 5 - Proposta de processo de produção em massa de calçado à medida [10].	13
Figura 6 - Receitas de hardware AM em calçados vs. todos os produtos de consumo, adaptado [12].	15
Figura 7 - Processos de fabrico aditivo, adaptado [15][16].....	18
Figura 8 - Esquema do processo de estereolitografia, adaptado [21].	20
Figura 9 - Esquema de aparatos e processo DLP, adaptado [22].	21
Figura 10 - Comparação SLA vs DLP, adaptado [23].	21
Figura 11 Esquema do processo CLIP, adaptado de [27].....	22
Figura 12 - Esquema do processo LSPc, adaptado de [31][29].	24
Figura 13 - Esquema do processo <i>Material Jetting</i> , adaptado [34].	25
Figura 14 - Esquema de máquina e processo FDM, adaptado de [38].	26
Figura 15 - Aparato e processo MJF [40].	27
Figura 16 - Processo e aparatos do processo SLS, adaptado [42].	28
Figura 17 – Espuma [46].	31
Figura 18 - Favos de abelha [46].	31
Figura 19 - Exemplo de treliças [46]	31
Figura 20 - Unidade celular - <i>lattice</i> ; a) perspetiva; b) vista frontal, adaptado de [49].	32
Figura 21 - Estrutura celular composta pelo arranjo espacial uniforme da mesma <i>lattice</i> , a) perspetiva, b) vista frontal, adaptado de [49].	33
Figura 22 - Gráfico tensão-deformação representativo do comportamento de estruturas sob cargas de compressão [47].	35
Figura 23 - Sapatos "Treeshoes" [55].	37
Figura 24 - Sapatos "Crystal" [56].	37
Figura 25 - Sapatos "Coral" [57].	37
Figura 26 - Sapatos "Float" [59].	37
Figura 27 - Fábrica Feetz [40].	38
Figura 28 - Sapato Feetz [60].	38
Figura 29 - Impressão da entressola 3D.	38
Figura 30 - Assemblagem do sapato [61].	38
Figura 31 - Sabrinas de Liquid Printed Natives [63].	38
Figura 32 - Estrutura <i>lattice</i> da sola[64].	39
Figura 33 - Alphaedge 4D [65].	39
Figura 34 - Sapatilha 4DFWD [63].	39
Figura 35 - Impressão 3D de cortes Nike Flyprint [49].	39

Figura 36 - Nike Vaporfly Elite Flyprint [66].	39
Figura 37 - 990 Sport Triple Cell [67].	40
Figura 38 - Architect [69].	40
Figura 39 - ArchiTech Futurist 3D [69].	40
Figura 40 - Liquid Speed shoes	40
Figura 41 - Liquid Floatride Run [70].	40
Figura 42 - Palmilhas Wiiv [71].	41
Figura 43 - Sandálias Wiiv [71].	41
Figura 44 - Palmilhas Phits [72].	41
Figura 45 - Estrutura lattice Phits [72].	41
Figura 46 - Scientifit insoles [73].	41
Figura 47 - Os ossos do pé, vista dorsal (A) e vista plantar (B), adaptado [74].	42
Figura 48 - Regiões do pé [75].	43
Figura 49 - Plataforma RSscan e leitura de dados [79].	44
Figura 50 - Sistema embutido no calçado F-Scan®, da Tekscan, adaptado de [80].	45
Figura 51 - Zonas da sola do pé onde devem ser colocados sensores [76].	45
Figura 52 - Fases do ciclo de marcha, adaptado [81].	46
Figura 53 - Representação da distribuição plantar em 2D e 3D na fase de apoio do ciclo de marcha em indivíduos sem patologias, adaptada [78].	46
Figura 54 - Representação dos 3 tipos de pés: plano, normal e cavo [83].	47
Figura 55 - Picos de pressão nos três diferentes tipos de pés para o caminhar normal [83].	48
Figura 56 - Distribuição dos valores médios de força em relação à metade do peso corporal nas três regiões de cada tipo de pé. Barras de erro representam SD [84].	49
Figura 57 - Picos médios de pressão nos diferentes tipos de pés. Barras de erro representam SD [84].	49
Figura 58 - Análise estática da pressão plantar, cortesia de Gameiros, Material clínico, Lda.	51
Figura 59 - Localização das zonas de maior pressão plantar, cortesia Gameiros, material clínico, Lda.	51
Figura 60 - Análise dinâmica da força por impressão de sonda, cortesia Gameiros material clínico, Lda.	51
Figura 61 - Gráficos de valores obtidos da análise dinâmica da força por impressão de sonda, cortesia Gameiros material clínico, Lda.	52
Figura 62 - Análise dinâmica da pressão conforme impressão de sonda, cortesia Gameiros, material clínico, Lda.	52
Figura 63 - Fluxograma do processo de desenvolvimento do projeto.	54
Figura 64 - Forma: molde em plástico representativo dos volumes do pé.	55
Figura 65 - Forma e sola, as bases estruturais do sapato.	55
Figura 66 - Exemplo sola de caixa.	56
Figura 67 - Sola de caixa comum e possibilidade de lhe retirar estrutura interior.	56
Figura 68 - Desenho ilustrativo das possibilidades de entressola como preenchimento do interior da sola.	56
Figura 69 - Ilustração das etapas de produção calçado por montagem strobel.	60

Figura 70 - Sola e entressola em corte.....	60
Figura 71 - Variedade de solas para seleção.....	61
Figura 72 - Sola <i>Korea</i> original.....	62
Figura 73 - Sola <i>Korea</i> com representação de alterações a efetuar.....	62
Figura 74 - Desenho da planta da entressola.	62
Figura 75 - Representação da planta do pé na planta da entressola.	62
Figura 76 - Distribuição da pressão plantar do pé esquerdo na planta da entressola.	62
Figura 77 - Distribuição da pressão plantar do pé direito na planta da entressola.	62
Figura 78 - Categorização das zonas da entressola para alívio da pressão plantar.	63
Figura 79 - Corte da sola.	63
Figura 80 - Desenho de corte da sola.	63
Figura 81 - Corte da sola e posição da entressola.....	63
Figura 82 - Corte da sola alterada e entressola definida.....	63
Figura 83 - Desenho 3d da entressola, a) vista de cima com identificação das zonas de alívio da pressão plantar, b) vista de baixo, c) vista lateral, d) vista perspetiva de baixo, e) dimensões principais.	64
Figura 84 - Vistas da palmilha, a) vista de cima com identificação das zonas críticas, b) vista de baixo, c) corte, d) perspetiva.	64
Figura 85 - Esboços para proposta de sapato com sola/entressola a realizar.	65
Figura 86 - Desenhos técnicos do modelo proposto. a) vista do sapato, lado interior, b) vista do lado externo do sapato, c) corte.	66
Figura 87 - Corpos de prova 1 impressos por SLA em material <i>Rebound Resin</i> na impressora Form 3L da Formlabs.....	70
Figura 88 - Corpos prova 1 impressos em material <i>Flexible 80A</i> pelo processo SLA da Formlabs.	71
Figura 89 - Corpos prova 1 impressos em material <i>Flexible 80A</i> pelo processo SLA da Formlabs.	71
Figura 90 - Vários defeitos nas peças impressas.	71
Figura 91 - Impressão dos CP1 em material <i>Rebound Resin</i> pelo processo SLA da Formlabs.	72
Figura 92 - Desenho 3D do corpo prova para usar na tecnologia Polyjet®.....	72
Figura 93 - Peças a, b e c correspondentes aos corpos prova 1, 2 e 3 respetivamente impressos em Polyjet®.....	73
Figura 94 - Corpos prova 1,2, 3 e 4 impressos na tecnologia LSPc em resina <i>xFlex475</i>	76
Figura 95 - Compressão das peças para aferir o tipo de deformação.	76
Figura 96 - Desenho 3D de provete para realização de testes de absorção de impacto.	77
Figura 97 - Máquina de testes de absorção de impacto Zipor model EL-44, Portugal [94].	77
Figura 98 - Peça a ser preparada no <i>slicer</i> para impressão.....	78
Figura 99 - Definições do trabalho de impressão para os corpos de prova.	79
Figura 100 - 2º <i>Slice</i> com alteração do <i>wait time</i> para 4 segundos.....	79
Figura 101 - Imagem dos corpos de prova preparados para impressão	80

Figura 102 - Corpos de prova impressos pela tecnologia LSPc na impressora NXE 400 da Nexa 3D.....	80
Figura 103 - Os 5 exemplares de cada um dos corpos de prova.	81
Figura 104 - <i>Worklow</i> para pós-impressão das peças.....	81
Figura 105 - Ensaio da amostra CP1 – 1b.	83
Figura 106 - Deformação média e recuperação média do 1º salto.	86
Figura 107 - Atribuição do tipo de <i>lattice</i> a cada zona do pé.....	87
Figura 108 - Atribuição do tipo de <i>lattice</i> a cada zona da entressola.....	87
Figura 109 - Desenho 3D da entressola com as <i>lattices</i> , a) vista perpendicular de cima, b) vista perpendicular de baixo.....	87
Figura 110 - imagem do <i>licer</i> da disposição da sola na câmara de construção.	88
Figura 111 - A entressola a ser impressa na máquina NXE 400.	88
Figura 112 - Entressola impressa, a) vista de cima, b) pormenor da parte de baixo zona do calcanhar, c) pormenor <i>lattices</i>	89
Figura 113 - Parte superior do sapato, entressola e sola.....	89
Figura 114 - Corte dos CP2 e CP3.	90
Figura 115 - Disposição de um par nº 42 na câmara de construção.	91
Figura 116 - Simulação <i>build</i> completa para tamanho 37.....	92
Figura 117 - Simulação <i>build</i> completa para tamanho 42.	92
Figura 118 - Representação da percentagem de cada tipo de custo no custo final do par.	94

Lista de Tabelas

Tabela 1 - As diferentes partes do sapato, seus componentes, funções e materiais	9
Tabela 2 - Relação entre o tipo de ligação da parte superior à parte inferior e consequente tipo de montagem.....	10
Tabela 3 - Classificação das estruturas celulares, suas características e aplicações.....	31
Tabela 4 - Exemplos de calçado de moda produzido por FA.....	37
Tabela 5 - Exemplos de calçado casual produzido por FA.	38
Tabela 6 - Exemplos de calçado desportivo produzido por FA.	39
Tabela 7 - Exemplos de palmilhas ortopédicas produzidas por FA.	41
Tabela 8 - Resumo dos resultados do estudo [83].	48
Tabela 9 - Topologias de <i>lattices</i> selecionadas.	67
Tabela 10 - Determinação do tipo de comportamento das estruturas <i>lattice</i> segundo o critério de Maxwell.....	68
Tabela 11 - Desenhos dos corpos de prova.	68
Tabela 12 - Topologia e dimensões das <i>lattices</i> e a sua distribuição nos corpos de prova desenhadas no <i>software</i> Siemens NX.....	69
Tabela 13 - Topologia, dimensões e distribuição das <i>lattices</i> no corpo prova para impressão em Polyjet®.....	73
Tabela 14 - Desenho 3d dos corpos prova para preencher com <i>lattices</i> , 2 e 3 camadas em altura.	75
Tabela - 15 Topologia e dimensão das <i>lattices</i> e a sua distribuição nos corpos prova para imprimir no processo LSPc.	75
Tabela 16 - Topologia e dimensões das <i>lattices</i> e a sua distribuição nos corpos de prova a serem impressos por LSPc para realização de testes.	78
Tabela 17 - Resultados obtidos dos testes experimentais.....	83
Tabela 18 - Deformação média e recuperação média do 1º salto.....	85
Tabela 19 - Construção de custos com base na simulação de uma <i>build</i> com entressolas nº 42.....	93
Tabela 20 - Custo por par de entressolas, tendo por base uma <i>build</i>	93

Esta página foi deixada em branco intencionalmente.

Lista de siglas e acrónimos

2D	Geometria bidimensional
3D	Geometria Tridimensional
ALM	Arco medial do pé
AM	<i>Additive manufacturing</i>
APICCAPS	Associação portuguesa dos industriais de calçado, componentes, artigos de pele e seus sucedâneos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BJ	<i>Binder Jetting</i>
CAD	Computer aided design
CAGR	<i>Compound anual growth rate</i>
CATIM	Centro de apoio tecnológico à indústria metalomecânica
CFPIC	Centro de formação profissional da indústria do calçado
CLIP	<i>Continuous Liquid Interface Production</i>
CTCP	Centro tecnológico da indústria do calçado de Portugal
DLP	<i>Digital light processing</i>
FA	Fabrico aditivo
FDM	<i>Fused deposition modelling</i>
IMC	Indicie de massa corporal
ISO	<i>Internacional Standards Organization</i>
KDB	<i>knowledge database</i>
MJ	<i>Material jetting</i>
MJF	<i>Multi-jet fusion</i>
PDM	<i>Product data management</i>
PLM	<i>Product Lyfecycle</i>
RA	Realidade aumentada
RV	Realidade virtual

SLA	<i>Stereolitography</i>
SLS	<i>Selective laser sintering</i>
STL	<i>Stereolitography format</i>
UV	Ultra-violeta

1. Introdução

Portugal é detentor de uma relevante posição no mundo enquanto produtor de calçado. O país é reconhecido pela qualidade dos produtos que fabrica e o setor tem um peso importante na economia do país. Nas últimas décadas o setor registou um crescimento significativo não só no aumento da produção, mas, e sobretudo, ao nível da qualidade desta, fruto de um esforço de implementação de novas tecnologias, formação profissional, marketing e design, não só por parte das empresas, mas também por parte de entidades nacionais ao setor relacionadas. É neste contexto que se encontra a empresa Jomarpi, Lda.

1.1. Motivação e enquadramento do projeto

A Jomarpi é uma empresa produtora de calçado cujos produtos são reconhecidos pela qualidade por parte dos seus clientes. A empresa é escolhida quando se trata de produzir gamas altas de produtos de várias marcas internacionais. É desígnio da empresa a continuação da aposta na diferenciação ao nível estético e de conforto com vista à obtenção de um produto de valor acrescentado que vá de encontro às expectativas dos seus clientes e às necessidades e satisfação dos consumidores finais. Com as empresas a fazerem o percurso no contexto Indústria 4.0, o setor do calçado não é exceção e a transformação digital vai permitir acrescentar valor ao negócio. A digitalização dos pés de cada indivíduo e a produção por fabrico aditivo do calçado ou componentes deste, feito à medida de cada indivíduo, é algo que já está e vai acontecer cada vez mais. Consciente desta realidade, a Jomarpi pretende tirar partido das novas tecnologias no sentido de acrescentar valor ao seu produto, principalmente no que ao conforto diz respeito, desenvolvendo produtos diferenciados e avançados para responder às necessidades do mercado, no sentido de manter a competitividade. É, no entanto, necessário, que os processos sejam cada vez mais precisos, rápidos e também acessíveis economicamente. Assim, é imperativo estudar e compreender as tecnologias para que seja possível implementá-las no processo criativo, produtivo e comercial associado ao calçado. Por outro lado, é necessário, conjugar esse objetivo com investimentos financeiros sustentáveis por parte da empresa, tendo também presente questões de ordem da sustentabilidade ambiental.

1.2.Objectivos

O projeto tem como objetivo principal o estudo das tecnologias de fabrico aditivo, materiais e geometrias de construção designadas por *lattices* que concomitantemente possam contribuir para a criação de um novo material de estruturas intersticiais produzido por uma tecnologia de fabrico aditivo que seja aplicado na produção de componentes para calçado que têm um papel crucial no conforto e alívio da pressão plantar, a saber, palmilhas e entressolas. No caso de entressolas, estas serão construídas de forma a caber dentro de uma sola previamente selecionada que englobe características estéticas e funcionais adequadas e que será comum a uma linha de modelos de calçado, que se diferenciarão pela parte superior. A entressola será variável e, portanto, conseguirá atingir variados níveis de amortecimento e consequentemente de conforto. O propósito será a obtenção de uma entressola e/ou uma palmilha produzidas por fabrico aditivo que numa primeira fase será generalista podendo evoluir para uma vertente de personalização com base nas características individuais da pressão plantar. Será feito um estudo da viabilidade técnica, das propriedades mecânicas dos materiais produzidos e da viabilidade económica.

1.3. Estrutura do trabalho

O capítulo do Estado da Arte começa com uma observação do atual posicionamento da indústria do calçado em Portugal e no mundo. É realizada uma breve descrição do sapato e da sua construção que culmina numa abordagem às tendências e potencialidades para a customização no setor. O subcapítulo seguinte é dedicado às tecnologias de fabrico aditivo e começa com uma abordagem ao posicionamento do setor do calçado relativamente às mesmas. Sobre estas é feita uma visão geral que culmina com o levantamento e descrição das tecnologias que operam com materiais poliméricos e, portanto, passíveis de serem aplicadas aos componentes que se pretendem desenvolver. Segue-se uma breve revisão da literatura sobre as estruturas celulares nomeadamente a sua classificação, geometrias, vantagens e propriedades. Segue-se um subcapítulo que é dedicado à exposição de casos calçado/marcas que já utilizam as tecnologias de fabricação digital direta e de fabrico aditivo para produção de calçado ou componentes do mesmo. Por último, um subcapítulo que é dedicado ao pé e ao que a este diz respeito em termos de fisiologia, marcha e pressão plantar.

O terceiro capítulo é dedicado à exposição da ideia e do seu desenvolvimento. É realizado um estudo sobre as capacidades da empresa para a concretização do projeto e a forma mais viável de o fazer. É escolhida a sola e definida a sua adaptação para incluir no seu interior a entressola que fica também com a sua geometria definida. Paralelamente é realizada uma possibilidade de desenho para uma hipótese de palmilha. Nos dois desenhos 3D da entressola e palmilha são apontadas a localização das zonas a receber as várias tipologias de *lattice*.

O capítulo dos procedimentos experimentais vai dar espaço à seleção geometrias das estruturas *lattice* bem como do desenho dos corpos de prova com as mesmas. Serão experimentadas várias tecnologias de fotopolimerização em tanque para produção dos corpos de prova por forma a se encontrar a mais adequada. De seguida são produzidos os corpos de prova e estes sujeitos a testes mecânicos no Centro Tecnológico do calçado de Portugal (CTCP). É feita uma análise e discussão dos resultados para aferir quais as tipologias de *lattices* que são adequadas a cada zona da entressola e feita a sua distribuição. A entressola será impressa em 3D e feito um levantamento dos custos de produção da mesma.

No último capítulo serão apontadas as principais conclusões do trabalho realizado, nomeadamente acerca da viabilidade técnica e financeira do projeto de desenvolvimento de entressolas/palmilhas para calçado de conforto. Serão referidos os trabalhos futuros importantes para continuação e aperfeiçoamento do projeto.

2. Estado da Arte

Neste capítulo, primeiramente, será feito um breve enquadramento da indústria do calçado no mundo, em Portugal e a sua caracterização. Far-se-á uma breve descrição do “sapato” enquanto objeto e os vários tipos de construção do mesmo. Será feita uma abordagem às tendências e potencialidades para customização do calçado. Seguidamente será abordada a atual posição do setor do calçado no panorama das tecnologias de fabrico aditivo, partindo-se depois para uma visão geral sobre as mesmas, que desembocará numa apreciação dos processos de Fabrico Aditivo (FA) que operam com polímeros. Segue-se um subcapítulo dedicado a uma revisão da literatura sobre as estruturas celulares no FA. Haverá um subcapítulo dedicado ao levantamento de algumas marcas/empresas representativas de calçado e de componentes para o mesmo que já usam tecnologias de FA na sua produção e estão presentes no mercado. Por último será feita uma revisão da literatura sobre o pé, as suas características, a pressão plantar e sua medição, com vista a determinar as zonas do pé que reclamam por maior urgência de conforto e onde existe necessidade de intervir ao nível das entressolas e palmilhas.

2.1. Indústria do calçado

2.1.1. Caracterização da indústria do calçado

Segundo dados da Associação Portuguesa dos Industriais de Calçado, Componentes, Artigos de Pele e seus Sucedâneos (APPICAPS), Portugal é o 20º maior produtor de calçado do mundo, mas é o 8º maior exportador de calçado em couro, (70% do calçado produzido). Na Europa, Portugal é o terceiro maior produtor de calçado, seguido da Itália e de Espanha. Em termos de preço médio de exportação, Portugal ocupa o 2º lugar com o preço mais elevado por par, apenas ultrapassado pela Itália que consegue ter o preço mais alto de exportação, devido ao facto de ter uma grande quota de mercado no calçado de luxo[1], Figura 1. Estes dados refletem a importância do país enquanto produtor e exportador de calçado de qualidade.

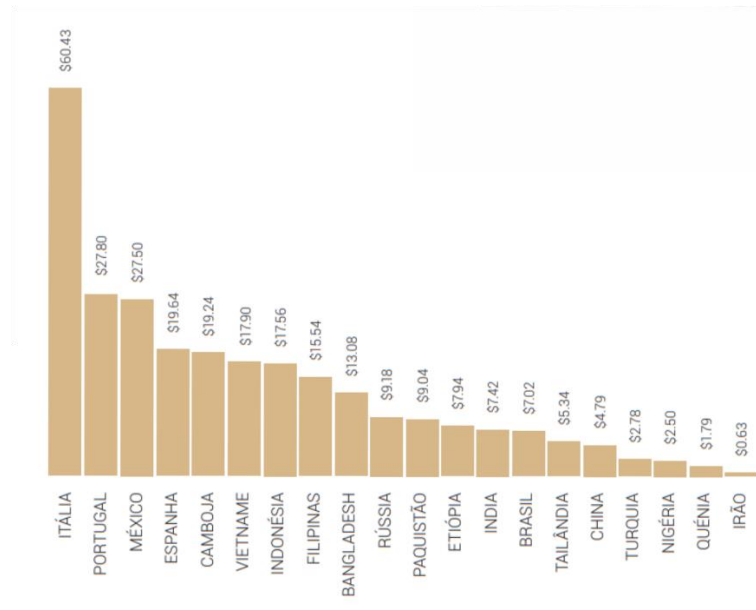


Figura 1 - Preço médio de exportação do par de sapatos entre os 20 maiores produtores (2020) [1].

O país exporta cerca de 95% do que produz (em 2019) [2], em 2020 as exportações baixaram para 93,2 [1] devido à pandemia.

O cluster do calçado tem um peso significativo na economia nacional. A indústria do calçado emprega cerca de 40 000 pessoas em 1 500 empresas e as indústrias de componentes para calçado empregam cerca de 7 000 pessoas em cerca de 400 empresas. O setor contribui com 3,4% das exportações totais do país. Exporta para 163 países nos 5 continentes. Os principais mercados são a França, a Alemanha, os Países Baixos, a Espanha e o Reino Unido. Em 2018 foram exportados cerca de 80 milhões de sapatos perfazendo 2 mil milhões de euros [2].

Portugal produz variadas categorias de calçado, de couro, plástico e borracha, têxtil e outros, no entanto 70% da produção é de calçado em couro que é considerado o mais prestigiado e valioso. Esta é uma das características que torna o país forte a responder à concorrência internacional, nomeadamente da Ásia (o maior produtor mundial), as outras são: a capacidade de produção de pequenas séries, a resposta rápida, a qualidade, o design, inovação e por último o facto de a indústria de calçado portuguesa ser líder mundial em tecnologia [2]. As principais associações ligadas ao setor, a APICCAPS, o CTCP, a Academia de Design e Calçado, e o Centro de Formação Profissional da Industria do Calçado (CFPIC), contribuem para a dinamização e evolução do setor fazendo uma forte

promoção no mercado internacional e contribuindo para a inovação de produto e das empresas [3].

Atualmente o setor tem traçado um plano estratégico de integração na Indústria 4.0 – FOOTure 4.0. com investimentos previstos na ordem de 49 milhões de euros. Pretende-se com este investimento dotar as empresas de habilidade para aproveitamento das tecnologias de informação e comunicação para a inovação na experiência do cliente, produção inteligente e formação de recursos humanos [2]. O CTCP e o CATIM criaram o projeto MetalShoe FabLab que pretende dar apoio às empresas do cluster do calçado e metalomecânica na área da manufatura aditiva [4] [5].

2.1.2. O sapato e a sua construção

O calçado é a parte da indumentária que reveste os pés. Existem várias tipologias de calçado: sapatos, sandálias, chinelos botas e botins. Neste documento adota-se o termo sapato como definição dos vários tipos de calçado.

Os sapatos são o artefacto que protege os pés e faz a ligação entre o pé e o solo. A sua função é proteger o pé, ajudá-lo a ele e ao corpo nas suas atividades físicas diárias contribuindo na medida do possível para facilidade de execução destas e conforto. O sapato é também um importante elemento estético na construção da imagem de cada indivíduo. O sapato é um objeto que apesar de pequeno é composto por muitos componentes de variados materiais e assemblados por diversos modos.

A Figura 2 apresenta um exemplo de um sapato genérico com a terminologia usada para definir as suas várias peças. Este é basicamente constituído por uma parte superior também designado por Corte que cobre a zona superior do pé e uma parte inferior que compreende o solado que protege a planta do pé e fica em contacto com o solo.

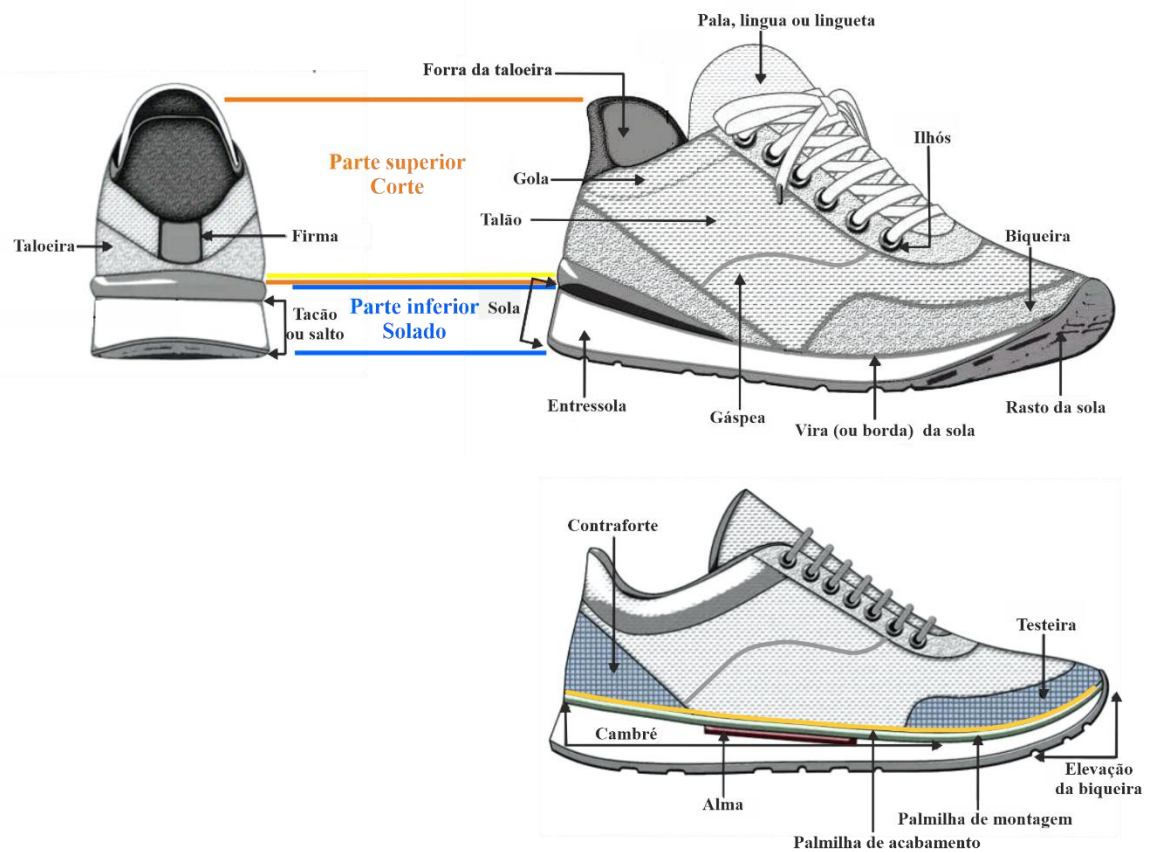


Figura 2 - O sapato e as suas peças constituintes, adaptado de [6].

Cada componente tem uma função específica e por esse motivo é feito de variados materiais. A Tabela 1 descreve os vários componentes do sapato, a sua função e os materiais de que são feitos.

Tabela 1 - As diferentes partes do sapato, seus componentes, funções e materiais

Parte do sapato	Principais funções	Componentes	Materiais
Parte Superior - Corte	Parte exterior: - Proteção - Em conjunto com o solado define a estética do sapato, pelas suas linhas de desenho, materiais, cores, texturas e adornos como fivelas, perfurações, gravados, etc	- Taloeira (parte de trás) - Talões (partes laterais traseiras) - Gáspea (parte mediana e/ou frontal) - Biqueira (parte da frente, quando existe) - Pala (parte debaixo dos atacadores, quando tem)	- Couros: bovinos, caprinos, reptil - Têxtil - Materiais compósitos - Materiais poliméricos
	Reforços interiores: - Ficam entre o material exterior e o forro. - Reforçam determinadas partes do sapato para melhor acomodar o pé, as principais são a zona do calcanhar a zona dos dedos	- Contraforte: reforço da parte onde assenta o calcanhar - Testeira: reforço na frente do sapato onde estão os dedos - Espumas: para almofadar determinadas partes como a gola e dar conforto	- Materiais compósitos - Couro - Materiais poliméricos
	Forro: - Melhorar o conforto - Proteger o pé de espessuras provocadas pelas uniões das peças da parte superior - Respirabilidade - Aumentar a vida útil do sapato.	- Forro taloeira - Forro talões - Forro gáspea - Forro pala	- Couro: Bovino, suíno, caprino - Têxtil - Materiais compósitos - Materiais poliméricos
Palmilha de acabamento ou plantar	- Parte em contacto com a planta do pé. - Grande importância para o conforto - Amortecimento	- Peça única ou - Peça em espumas variadas e forradas com material geralmente igual ao forro	- Espuma variadas - Material do forro
Parte inferior - Solado	- Confere a forma da curva do salto (cambré) - Parte que fica em contacto com o solo - Proteção do pé - Amortecimento - Antiderrapante	- Palmilha de construção: serve de sustentação do corte e faz a união com o solado	- Cartão - Materiais compósitos
		- Alma: de material rígido para dar forma à zona de curvatura do sapato (cambré)	- Metal, madeira ou plástico
		- Sola única ou constituída por: - Vira, Entressola, Tacão, Rasto	- Couro - Borracha natural ou sintética - PU - Poliuretano - EVA - Acetato de etileno vinil - TPU - Poliuretano termoplástico - TPR – borracha termoplástica - Materiais <i>Bio- Based</i>

A construção de um sapato é constituída por um conjunto de fases divididas por vários setores, cujos principais processos são:

- Corte: corte das várias peças e preparação destas para a costura;
- Costura: união das várias peças que constituem a parte superior do sapato;
- Preparação para montagem: estágio onde são colocados e conformados os reforços interiores como o contraforte;
- Montagem: colocação da parte superior na forma (enformação) e união desta à parte inferior do sapato. Existem 3 tipos de união: por colagem, por costura e por vulcanização;
- Acabamento: limpeza, colocação de acessórios como atacadores e outros componentes estéticos, tratamento das peles, verificação de qualidade e embalamento.

A parte montagem é muito importante porque está relacionada com a forma como é feita a ligação da parte superior (corte) à parte inferior (solado) e define o tipo de fabricação de calçado. A Tabela 2 apresenta os 3 tipos de ligação corte-solado que por sua vez definem os tipos de montagem [7].

Tabela 2 - Relação entre o tipo de ligação da parte superior à parte inferior e consequente tipo de montagem

Tipos de ligação da parte superior com a parte inferior	Tipo de montagem
Ligação por colagem	- Montagem Plana - Montagem Califórnia
Ligação por costura	- Montagem <i>Pratik</i> ; - Montagem Tubular; - Montagem <i>Strobel</i> ; - Montagem <i>Mocassin</i> ; - Montagem <i>String</i> ; - Montagem <i>GoodYear</i>
Ligação por vulcanização/injeção	- Montagem por Vulcanização; - Montagem por Injeção

2.1.3. A customização em massa no setor do calçado

O paradigma da produção em massa verificado no século XX foi alterado. O modelo de negócio para o século XXI está a mudar de produção em massa para customização em massa [8]. Em Portugal a indústria do calçado há muito que evoluiu da produção em massa para a produção de pequenas séries com tempos de resposta rápidos, consequência de uma estratégia para enfrentar a forte concorrência vinda da Ásia [2]. Apesar deste modelo de produção ter as suas dificuldades e desvantagens no que concerne a aspetos relacionados com *lay-out* de produção, logística, gestão entre outros, constitui-se também como uma enorme vantagem não só em termos de capacidade de enfrentar a concorrência, mas também como uma preparação para a customização em massa. Este sistema de produção de pequenas séries, resposta rápida, qualidade, design, inovação e a capacidade das empresas para se munirem das mais recentes novidades tecnológicas, criam um terreno perfeito para a implementação da customização em massa, modelo também permitido pelas tecnologias da 4ª revolução industrial. Assim, consideram-se 3 fatores cruciais para o crescimento deste modelo de customização a partir dos anos 90 do século XX:

- O colapso de muitas indústrias de produção em massa e conseqüente mudança de paradigma;
- O desenvolvimento de tecnologias avançadas de produção;
- O aumento de procura por parte dos consumidores de maior diversidade dentro das gamas de produtos [9].

Além destes fatores, é sabido que o calçado feito à medida aumenta o conforto do pé e isso é um fator determinante para a satisfação do cliente [10].

A customização em massa tem por base a produção de produtos feitos à medida de cada indivíduo mas com custos similares ao dos produtos produzidos em massa [9]. A produção é focada no indivíduo atendendo às suas necessidades, isso implica a existência de uma fase de design que permita a combinação da customização com a produção em massa [8].

Para o setor do calçado foi realizado um estudo para a implementação da customização em massa na fabricação do calçado [10]. No processo tradicional de manufatura de

calçado à medida, basicamente os sapatos são feitos de forma quase artesanal em que são tiradas manualmente as medidas básicas dos pés do cliente transpondo-as depois para a fabricação da forma, solado, palmilhas e restantes componentes, o esquema representativo deste processo está na Figura 3.

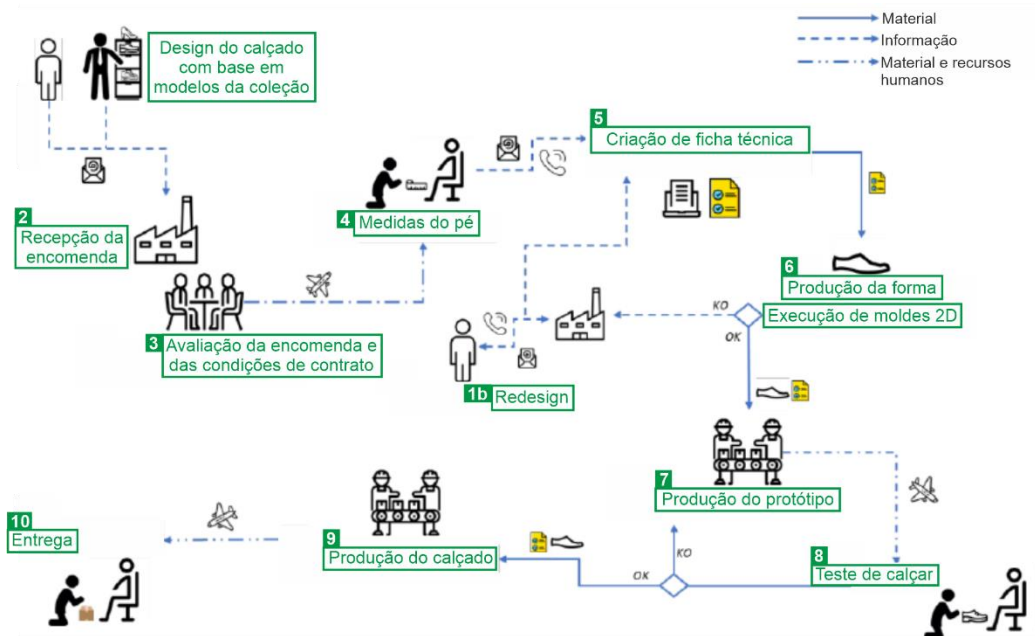


Figura 3 - Processo tradicional de fabricação de calçado à medida [10].

Para o processo de customização em massa são usadas as novas ferramentas e tecnologias de informação, digitalização, design e gestão de dados que são inerentes à construção das várias fases do processo cujo esquema é apresentado Figura 4.

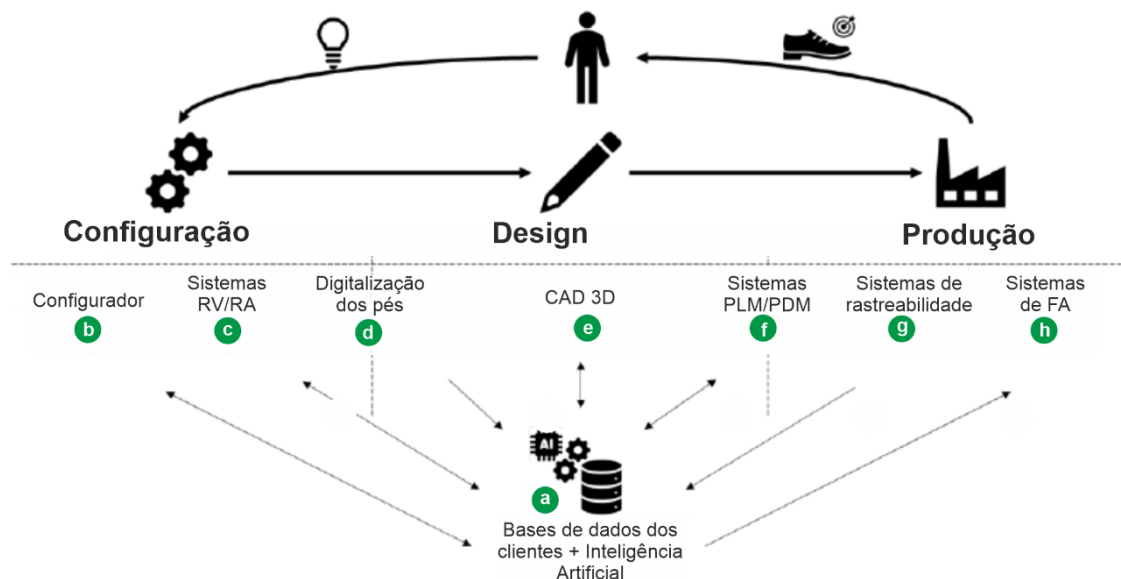


Figura 4 - Esquema do processo de customização em massa e respetivas tecnologias a ele afetas [10].

O modelo de processo para a customização em massa que é proposto está representado na Figura 5.

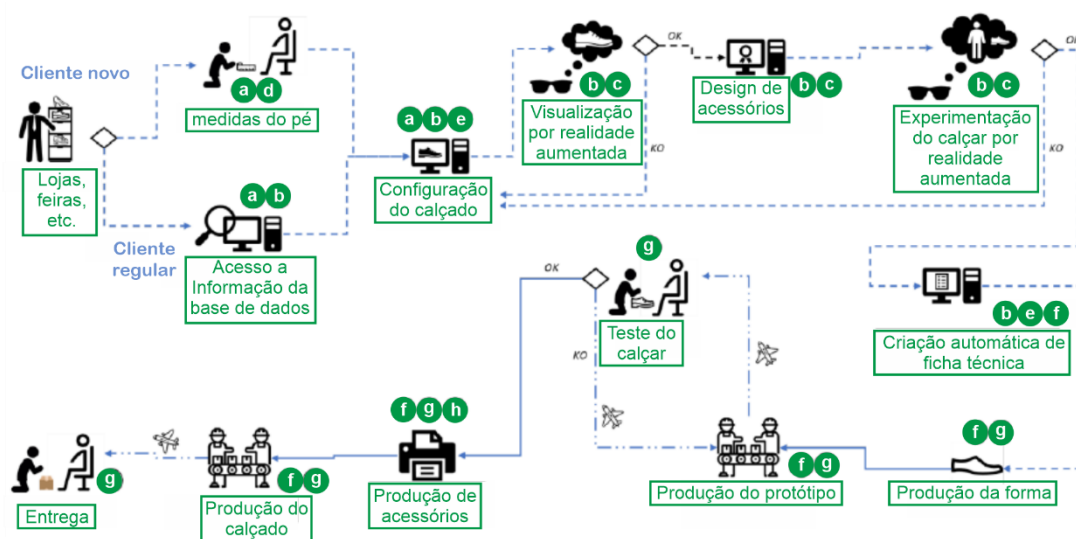


Figura 5 - Proposta de processo de produção em massa de calçado à medida [10].

Sumariamente, este processo contempla as seguintes fases que funcionam com o apoio de tecnologias:

- O processo tem início nas lojas de marca da empresa, onde o cliente se dirige e tem participação ativa no processo.
- As medidas e dados biométricos do pé são adquiridos usando tecnologias de digitalização, no caso de se tratar de um novo cliente e/ou usando bases de dados no caso de se tratar de clientes regulares;
- É realizado um modelo em software CAD 3D com base na informação recolhida dos dados biométricos e das escolhas estéticas do cliente com o apoio de um configurador de produtos baseado em CAD que gere de forma inteligente os dados do produto, modelos 3D e conhecimento da empresa de modo que seja possível a relacionar os desejos e criatividade do cliente e as possibilidades reais de concretização física do produto.
- São usadas ferramentas de realidade virtual para que o cliente possa ter uma percepção visual da estética do futuro par de sapatos;
- Caso seja aprovado pelo cliente segue-se para a fase seguinte, se não for aprovado retorna-se à fase de conceção e modelação 3D.

- Tendo sido aprovado, são novamente usadas ferramentas e realidade aumentada que possibilitem a aprovação do *fitting* do sapato;
- Aprovado o modelo, segue-se a criação de fichas técnicas e de produção baseadas em sistemas de PLM/PDM (*Product Lifecycle Management/Product Data Management*) para que seja criada a forma (modelo geralmente em plástico que traduz o volume do pé) e protótipo.
- É feito um teste de *fitting*;
- E por fim é realizada a produção do modelo onde podem entrar as tecnologias de fabrico aditivo em todo ou partes do processo e do produto [10].

Com esta breve abordagem sobre o setor do calçado, sobre a descrição e produção do mesmo, e das possibilidades de customização em massa, passa-se agora ao subcapítulo dedicado ao posicionamento desta indústria face ao fabrico aditivo.

2.2. Tecnologias de fabrico aditivo

2.2.1. Tecnologias fabrico aditivo e a indústria do calçado

As tecnologias de fabrico aditivo, têm vindo a ser aplicadas na indústria do calçado principalmente a partir de 2010, a partir desta data começam a ser feitas as primeiras experiências e hoje as tecnologias são usadas nesta indústria para produzir partes de uso final, protótipos e ferramentas como moldes e formas. No que diz respeito ao uso destas tecnologias para a produção de calçado propriamente dito, observam-se três situações. A execução de sapatos altamente experimentais, artísticos e de luxo por artistas e designers para um mercado de alta moda e exclusivo, a produção de séries limitadas de calçado totalmente produzido por estas tecnologias ou apenas algum dos seus componentes e, numa outra vertente, há a situação de produção em massa, esta verifica-se principalmente para a produção de palmilhas customizadas, entressolas e cortes (parte superior do sapato) [11] .

A produção de calçado ou seus componentes por meio de tecnologias de FA tem vindo a crescer enormemente. No que respeita a bens de consumo, o sector do calçado é mesmo o que regista um maior crescimento e é expectável que assim continue. Um relatório da *SmartTech Analylis* publicado em abril de 2019, intitulado “*Additive Manufacturing in the Footwear Industry*” constata essa tendência, tal como pode ser observado na Figura 6

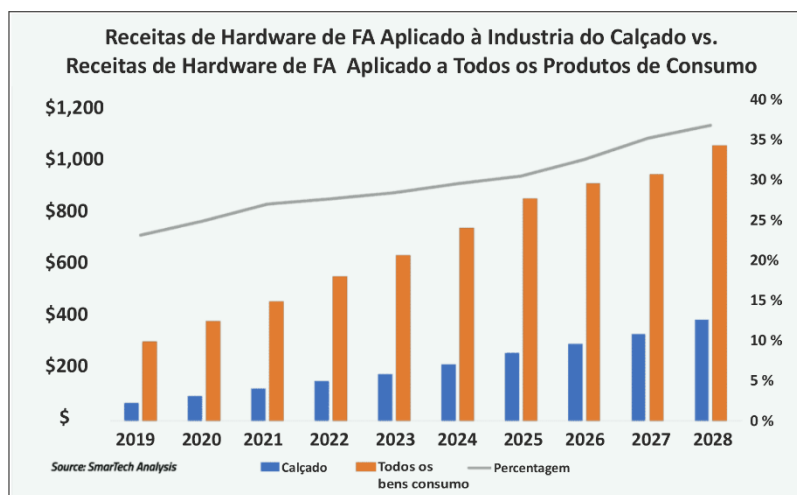


Figura 6 - Receitas de hardware AM em calçados vs. todos os produtos de consumo, adaptado [12].

O relatório constata que as receitas globais anuais da aplicação de tecnologias FA para calçados impressos em 3D são de US \$ 6,5 bilhões em 2019, crescendo a um CAGR (*Compound Annual Growth Rate*) de 19,5%. Além disso, o relatório prevê que até 2023 as receitas de peças impressas em 3D de calçados, como palmilhas, entressolas e partes superiores dos sapatos fabricadas por adição de material, sejam superiores a US \$ 1 bilhão [12].

Este sucesso é justificado pelo facto de o sector do calçado ser altamente beneficiado pelo uso destas tecnologias e outras, como sejam as tecnologias de digitalização 3D, visto que estas permitem a produção de calçado personalizado e à medida, facto que assume grande importância para setores de calçado desportivo, profissional e terapêutico. Assim, por estes motivos espera-se que, relativamente aos sectores dos bens de consumo, que o sector do calçado seja o que registre um maior crescimento e seja mesmo o que utilize mais as tecnologias de fabrico aditivo. Para este facto contribui também a tendência que existe para baixar o custo dos materiais e a tendência para aumentar a velocidade e produtividade das tecnologias. Atualmente já existe produção em massa de componentes para calçado como palmilhas, entressolas e partes superiores do sapato (cortes) onde se verifica custo-benefício, tornando-os portanto viáveis e comerciáveis [12].

As principais tecnologias usadas para a fabricação por adição de material de componentes do calçado são a fotopolimerização que inclui a estereolitografia (SLA), processamento digital de luz (DLP) e CLIP (síntese de luz digital da Carbon), fusão em cama de pó (PBF) que inclui Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e Fusão Multi Jato (MJF), além destes é esperado que Sinterização de Alta Velocidade (HSS) da Volxeljet venha a ter bastante relevância na produção em massa de peças customizadas num futuro próximo [12]. A tecnologia MJF da empresa HP desempenhará com certeza um papel importante visto que em 2017 a empresa lançou a *Fitstation* uma plataforma de digitalização 3D vocacionada para obter as características únicas de cada pé. A plataforma utiliza *software* e *hardware* especializados com o objetivo de produzir palmilhas e calçados personalizados usando a digitalização 3D e a tecnologia de impressão 3D (MJF) da empresa [13]. Atualmente, a HP possui diversas parcerias com empresas que atuam nas áreas de desenvolvimento, design e fabricação de calçado. Algumas delas são: *Superfeet*, fabricante de palmilhas e calçados, *Brooks Running Company*, empresa de design de calçados e roupas desportivos, *Steitz Secura* fabricantes de calçados de segurança, *SIGG Outdoors*, *Go 4-D*, *Volumental* e com a *American National Football League (NFL)*) [13] .

Depois deste breve olhar sobre a panorâmica atual entre as tecnologias de fabrico aditivo e a sua aplicação na produção de calçado, segue-se a revisão literária do estado da arte das mesmas. Primeiramente, serão referidos sucintamente os atuais processos tecnológicos, ao que se seguirá a revisão dos processos adequados e passíveis de serem usados para fabricação de partes do calçado. Na segunda parte é abordado o tema das estruturas celulares e o fabrico destas por processos de fabrico aditivo. Por último é apresentada uma seleção de empresas, marcas, calçado e componentes deste que já utilizam estes processos na produção.

2.2.2. Tecnologias de fabrico aditivo: visão geral

Fabricação por adição de material também designado como fabrico aditivo (FA), manufatura aditiva ou comumente impressão 3D são termos para classificar as tecnologias que permitem a criação de um objeto físico pela adição sucessiva de material, geralmente camada sobre camada, tomando como base dados de um modelo de geometria 3D concebido via CAD. Esta forma específica de fabricação por união de materiais é a especificidade que os processos de fabrico aditivo têm e que diferem das metodologias

convencionais de fabricação por subtração e conformação de material [14]. Estas tecnologias podem produzir protótipos, peças de uso final, assemblagens e ferramentas para produção indireta.

Atualmente e de acordo com a ISO 52900:2015 (*International Organization for Standardization*), a classificação dos processos assenta em sete tecnologias de fabrico aditivo [14]:

1. *VAT Photopolimerization* (Fotopolimerização em tanque)
2. *Material Jetting* (Impressão 3D de Material)
3. *Binder Jetting* (Impressão 3D de Aglomerante)
4. *Material Extrusion* (Extrusão de Material)
5. *Powder Bed Fusion* (Fusão em cama de Pó)
6. *Sheet Lamination* (Laminação de Folhas)
7. *Direct Energy Deposition* (Deposição Direta de Energia)

Uma representação destas tecnologias FA é apresentada na Figura 7, onde a classificação destes processos se encontra estruturada pela tecnologia, pelo processo de ligação utilizado por essa mesma tecnologia, pelos materiais utilizados e por alguns dos fabricantes de equipamentos de FA mais representativos do mercado.

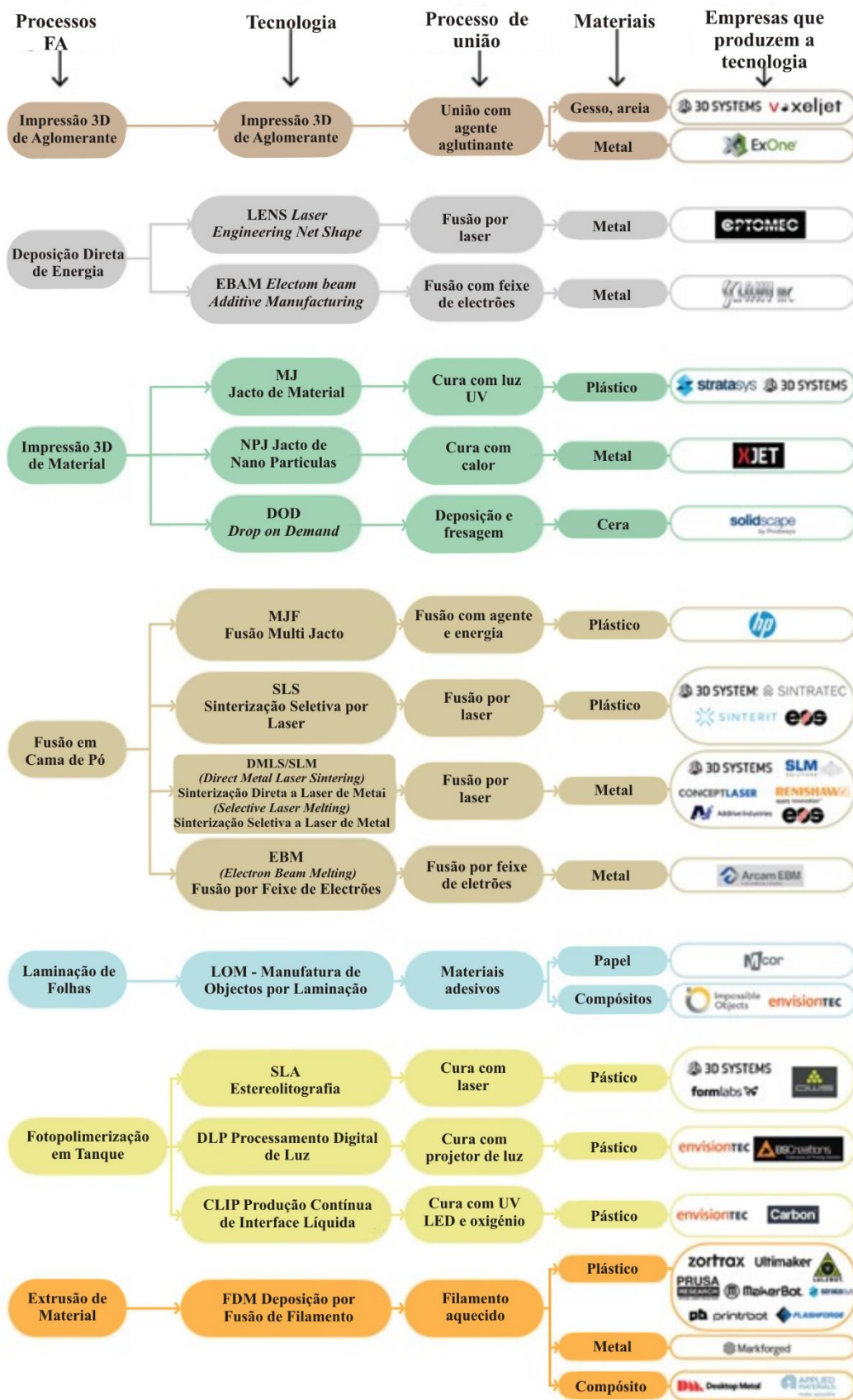


Figura 7 - Processos de fabrico aditivo, adaptado [15][16].

2.2.3. Tecnologias fabrico aditivo para polímeros passíveis para produção de entressolas e palmilhas

Visto que o presente trabalho visa a construção de uma entressola em material polimérico, seguidamente apresentam-se os processos tecnológicos capazes de processar estes materiais, a sendo eles: extrusão de material, a fotopolimerização, impressão 3D por jato de material e fusão em cama de pó.

Fotopolimerização

A fotopolimerização em tanque compreende dois processos principais: a Estereolitografia (SLA), Processamento de Luz Digital (DLP) a Produção Contínua de Interface Líquida (CLIP) [17] e também o LSPc *Lubricant Sublayer Photo-curing (LSPc) Technology*.

Estereolitografia (SLA)

O processo da estereolitografia consiste basicamente em solidificar um padrão 2D de uma resina fotocurável, expondo-a a um comprimento de onda específico de uma luz ultravioleta (UV), ocorrendo portanto a fotopolimerização [18]. Na Figura 8 pode-se observar a representação da máquina e processo de fabrico SLA. Um laser ultravioleta (UV) é direcionado por lentes para um espelho que se move no plano X-Y refletindo-o numa secção transversal 2D exposta do fotopolímero líquido que está num reservatório (tina) onde a plataforma de construção está submersa. A secção transversal 2D é solidificada por fotopolimerização e a plataforma desce (plano Z) de acordo com a altura da camada definida [18]. Um rolo passa sobre a camada solidificada para torná-la mais lisa e prepará-la para construir a próxima camada [19]. Este processo é repetido o número de vezes necessário até a peça estar concluída. Normalmente, a altura da camada varia entre 0,05-0,15 mm [18]. Frequentemente são necessárias estruturas de suporte, bem como um tratamento pós-processamento, como aquecimento ou fotopolimerização. O objetivo do pós-processamento é aumentar as propriedades mecânicas e o desempenho das peças para seu uso final [20].

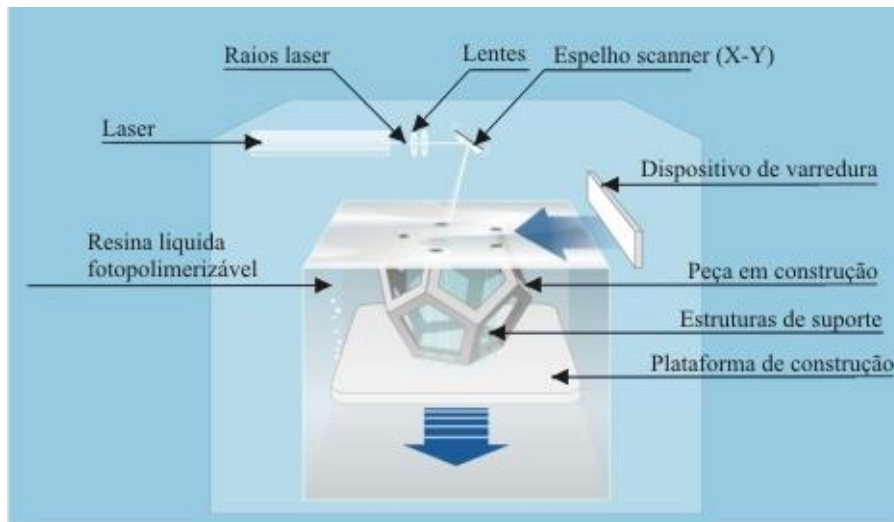


Figura 8 - Esquema do processo de estereolitografia, adaptado [21].

Este processo tem como grande vantagem a elevada resolução, que origina a construção de objetos de elevada qualidade com boas resoluções abaixo de $10\ \mu\text{m}$ [17][20]. A principal desvantagem deste processo é o facto de ser ainda um processo lento e caro quando comparado com outros processos de FA, além disso a gama de materiais que podem ser usados também é limitada, sendo apenas permitidos materiais como resinas com monómeros foto ativos, alguns materiais híbridos como materiais polímeros-cerâmicos também poderão ser usados [20]. Este processo é aplicado para construção de protótipos, em áreas biomédicas nomeadamente em engenharia de tecidos e para produzir objectos 3D com estruturas híbridas orgânicas-inorgânicas [17]. As empresas mais significantes a produzir atualmente tecnologias SLA são a 3D Systems, a Formlabs e a DWS.

Processamento digital de luz (DLP)

Na tecnologia DLP, e como como ser verificado na Figura 9 existe um tanque com resina líquida fotopolimerizável, uma plataforma de construção mergulhada na resina onde é construída a peça e um projetor LED UV cuja luz é refletida desde baixo em direção ao fundo do tanque. Ao iluminar a zona de baixo do tanque uma camada da futura peça é curada por todo e a plataforma sobe permitindo que uma nova camada seja curada novamente e assim sucessivamente até a peça estar construída. Pelo facto de a camada a ser curada não estar em contacto com o ar, torna-a menos suscetível à inibição do oxigénio. Apesar das similaridades com a tecnologia SLA, a tecnologia DLP é mais célere, visto que uma camada é curada de uma só vez, enquanto no SLA é curado ponto por ponto de uma camada. No entanto, e apesar de os tempos de fabricação no DLP serem

mais baixos, este processo consegue alta precisão na fabricação sendo possível a fabricação de peças de grande complexidade [17]. É um processo adequado para imprimir vários objetos compactos grandes simultaneamente com menos detalhes. No entanto, em relação à precisão e ao acabamento da superfície, o SLA alcança melhores resultados, porque, como é curado apenas um ponto de cada vez em uma camada, a resolução é melhor [18].

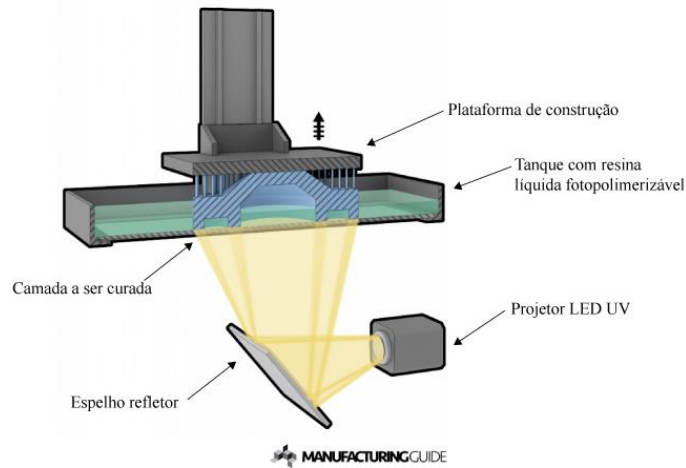


Figura 9 - Esquema de aparatos e processo DLP, adaptado [22].

Os esquemas das máquinas e processos SLA e DLP estão representados na Figura 10, enquanto no SLA o processo é realizado a partir do cima do tanque de resina em que o laser cura ponto por ponto e a plataforma de construção desce, no DLP o processo é realizado desde baixo do tanque de resina com o laser a ser projetado de forma a curar uma camada inteira e de uma só vez.

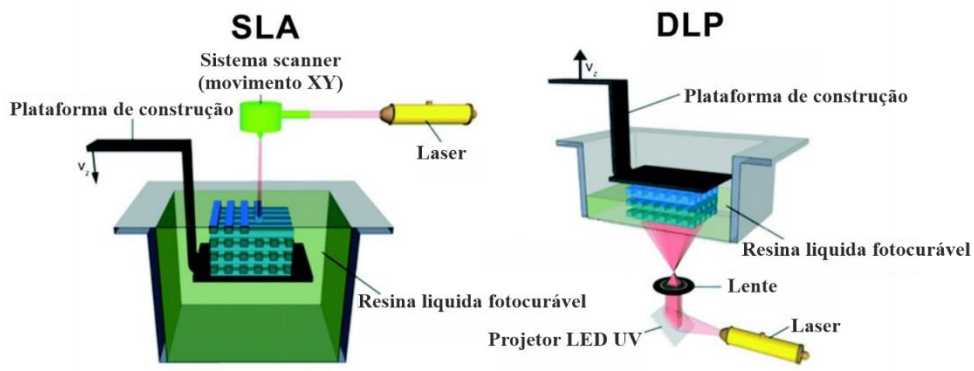


Figura 10 - Comparação SLA vs DLP, adaptado [23].

Produção Contínua de Interface Líquida (CLIP)

Produção Contínua de Interface Líquida (*Continuous Liquid Interface Production*) (CLIP) é um processo recente anunciado em 2015 pela *Carbon*. O processo foi patenteado em 2014 pela *EiPi Systems, Inc.*, sob a forma de duas patentes *Continuous liquid interphase printing* [24] e *Method and apparatus for three-dimensional fabrication with feed through carrier* [25] e os seus inventores são Joseph DeSimone, Alexander Ermoshkin, Nikita Ermoshkin e Edward T. Samulski. O processo é agora desenvolvido pela *Carbon*.

CLIP é considerada uma forma de impressão 3D DLP contínua. Na Figura 11 está representado um esquema de um aparelho e método de processo. Existe uma “piscina” de resina de fotopolímero. Abaixo dela há uma janela transparente e permeável ao LED UV. A informação CAD é projetada por um projetor UV LED e lançada através da janela onde uma membrana permeável com fotopolímero é curada. Em seguida, a peça move-se lentamente para cima o suficiente para permitir que a resina de fotopolímero flua abaixo da peça e mantenha o contato com o fundo dela. Entre a peça e a janela existe uma "zona morta" que é uma membrana permeável ao oxigênio que permite uma "interface líquida contínua" de forma que a fotopolimerização por radicais livres seja inibida e a adesão da resina à janela seja impedida [17][26].

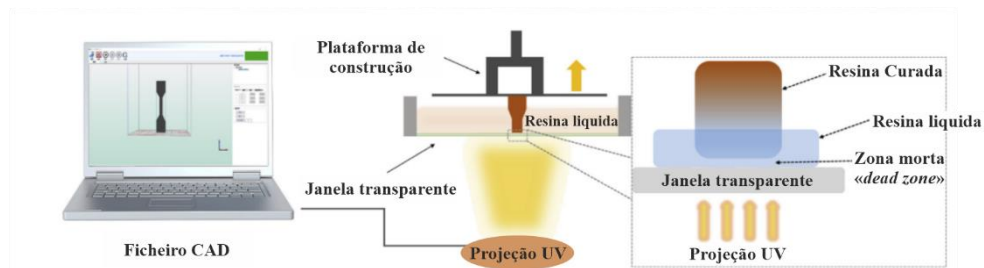


Figura 11 Esquema do processo CLIP, adaptado de [27]

O processo apresenta várias vantagens, sendo que a maior é provavelmente a grande velocidade do processo devido à sua natureza sem camadas, ao contrário do DLP em que o tempo é gasto curando uma camada por vez e separando-as, o CLIP permite um processo contínuo que por sua vez contribui para uma melhor precisão das peças [26]. Este processo permite grande velocidade na impressão de objetos, a taxas de centenas de milímetros por hora com resolução abaixo de 100 μm [17]. A natureza sem camadas afasta o problema de resistência fraca ao longo do eixo Z e resulta em peças isotrópicas,

além disso a Carbon desenvolveu produtos químicos e um tratamento térmico feito num forno de circulação forçada que aplica às peças impressas garantindo-lhes uma resistência de grau de engenharia [26].

Tecnologia LSPc – Tecnologia de Fotopolimerização de Subcamada Lubrificante

A tecnologia LSPc (*Lubricant Sublayer Photo-curing Technology*) é um processo de 2015, patenteado pela empresa *Nexa3D* e os seus inventores são Gianni Zitelli, Avi N. Reichental e Luciano Tringali [28]. O processo é desenvolvido e comercializado pela *Nexa3D*.

LSPc é considerada uma tecnologia de impressão 3D DPL contínua. A tecnologia e processo LSPc tem 3 características particulares que são propriedade e patentes da *Nexa3D*: um Guia de Luz LSPc, uma Máscara de Luz LSPc e a Membrana Autolubrificante LSPc. A Figura 12 representa o esquema do funcionamento da tecnologia. O processo tem início com a projeção de uma matriz de luz UV que ao passar no Guia de Luz LSPc (que é uma combinação de camada ótica UV) é uniformizada. A máscara de alto contraste LSPc é responsável pela projeção do *slice* 3D para o tanque de resina onde está a acontecer a fotopolimerização. A *NEXA3D* afirma que a sua máscara LSPc HC distribui uma imagem uniforme e sem distorção para todas as zonas da plataforma de construção, garantindo uniformidade e precisão das peças, em oposição ao processo típico DLP em que o desempenho de ponta a ponta é comprometido devido a distorções óticas. Finalmente na última etapa do processo a função da Membrana Autolubrificante LSPc é criar uma zona anti-aderente e garantir que a peça não fica colada ao fundo do tanque, não sendo, portanto, necessária a elevação da plataforma. Esta situação faz com que o processo seja contínuo garantindo altas velocidades e a natureza sem camadas do processo, o que por sua vez origina peças de alta precisão ao longo dos eixos XY e Z, e, portanto, peças isotrópicas. Assim, a *Nexa3D* reitera que o processo é adequado não só para produção de protótipos, como também para produção de pequenos volumes de peças de uso final [29][30].

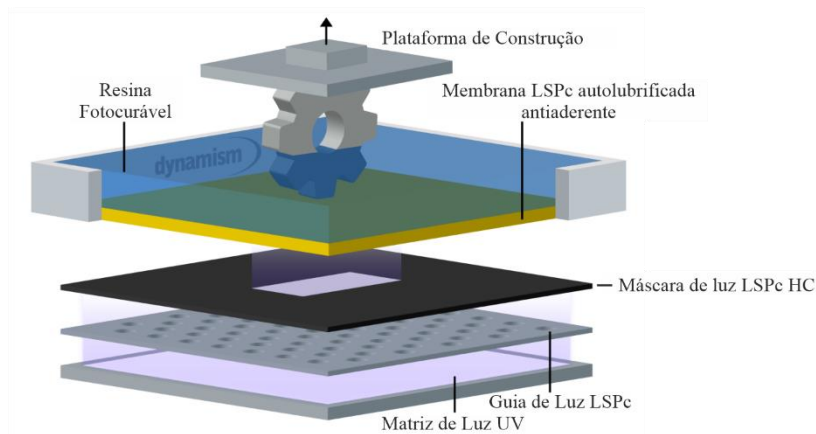


Figura 12 - Esquema do processo LSPc, adaptado de [31][29].

A Nexa3D tem uma parceria com a Henkel para o desenvolvimento de materiais a serem usados na sua tecnologia. Para o pós-processamento a Nexa3D tem as tecnologias *xWash* e *xCure* respectivamente para lavar e curar as peças otimizando a sua cura garantindo precisão dimensional consistente, integridade estrutural robusta e estruturas moleculares mais fortes. A *xCure* opera em três modos de cura: somente UV, somente calor e UV+calor [32].

Impressão 3D por jato de material (*Material Jetting*)

Impressão 3D por jato de material é designada por 2 termos sinónimos, são eles *Multijet* que pertence à 3D Systems e *Polyjet®* que pertence à Stratasys, a tecnologia foi desenvolvida pela Object Geometries em 2000 que depois foi adquirida pela Stratasys em 2012 [33]. É uma tecnologia avançada semelhante à impressão a jato de tinta, mas em vez da tinta é utilizado um fotopolímero líquido que é depositado em gotículas numa plataforma de construção e curado por uma luz UV que permitirá a criação de camadas finas para construir o objeto 3D [18].

O aparelho comum e o método de processo são representados na Figura 13 onde estão representados os depósitos de diferentes materiais de construção, visto que o processo tal permite, e o depósito para produzir estruturas de suporte. Esses materiais irão alimentar a cabeça de impressão por jacto de material, que se move horizontalmente nos eixos X-Y, as suas agulhas irão borrfar pequenas gotículas de fotopolímero líquido na plataforma de construção. A lâmpada de cura UV solidificará as gotículas e, como resultado, uma camada ultrafina é criada [18]. Em seguida, a plataforma de construção move-se para baixo ao longo do plano Z e o processo será repetido até que a peça seja construída. O

pós-processamento é necessário para remover as estruturas de suporte que muitas vezes são necessárias [34].

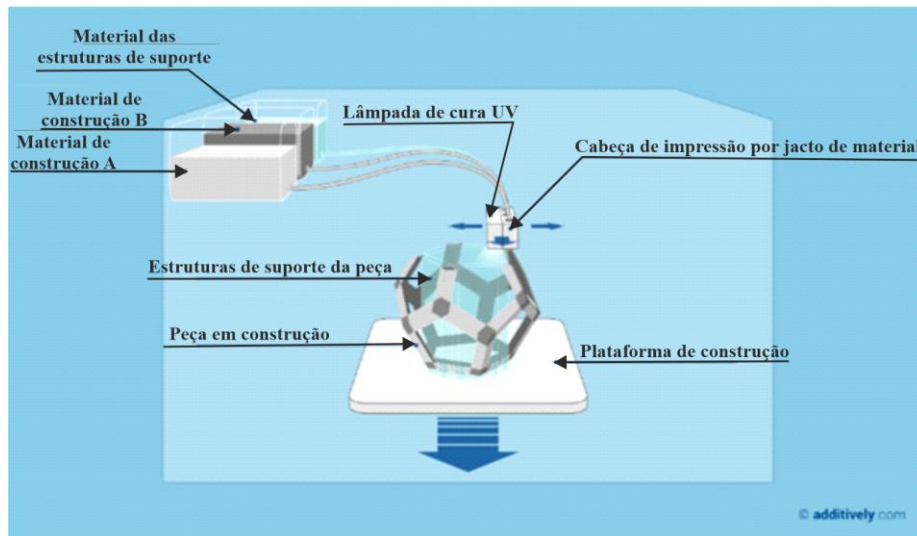


Figura 13 - Esquema do processo *Material Jetting*, adaptado [34].

A principal vantagem deste processo é a sua elevada resolução o que permite a produção de objetos de boa qualidade e com bom acabamento superficial, além disso possibilita o uso em simultâneo de diferentes materiais e cores incluindo a transparência [18]. As principais desvantagens do processo é o elevado custo do equipamento e materiais, bem como a dificuldade em remover as estruturas de suporte o que pode comprometer a fabricação de peças de formas intrincadas e com buracos internos. Os materiais possíveis de usar são polímeros tais como ABS e polipropileno, resinas translúcidas e resinas elásticas [35].

Extrusão de material

Extrusão de material é um processo de fabrico aditivo que também costuma ser designado por Fusão por Deposição de Material (FDM) ou Fabricação por Fusão de Filamento (FFF) [36].

À semelhança de todos os processos de fabrico aditivo, o processo tem início a partir de um ficheiro digital de dados CAD do modelo a ser fabricado, este ficheiro CAD é convertido para um formato de STL (estereolitográfico) que será lido pelo software específico da máquina FA, que o quebrará em fatias individuais e atribuirá a percentagem de preenchimento e espessura da parede. Esta é a representação da seção transversal 2D

da parte projetada que gera um código G que controlará o sistema FDM. O processo de fabricação da peça é feito pela extrusão de um filamento termoplástico fundido que é expelido por uma agulha (bocal) de diâmetro específico e que o vai depositando na plataforma de construção. A agulha move-se horizontalmente nos eixos X e Y enquanto a plataforma de construção de move no eixo Z no sentido descendente assim que uma camada está terminada. Seguidamente uma nova camada é depositada sobre a anterior e o processo é repetido, o número de vezes necessárias até a peça estar concluída [37].

Na Figura 14 está representado o esquema de uma máquina e processo, onde se podem observar os dois dispensadores de material, um para produzir as estruturas de suporte e um outro para fabricar a peça. Estes materiais vão alimentar as cabeças das extrusoras cujos bocais irão extrudir o filamento fundido, estas movem-se nos dois eixos horizontais e assim que uma camada de material está finalizada a plataforma move-se para baixo permitindo que uma nova camada seja sobreposta e fundida com a anterior. Ocorre a repetição do processo até a peça estar concluída. O mesmo ocorre para a produção das estruturas de suporte.

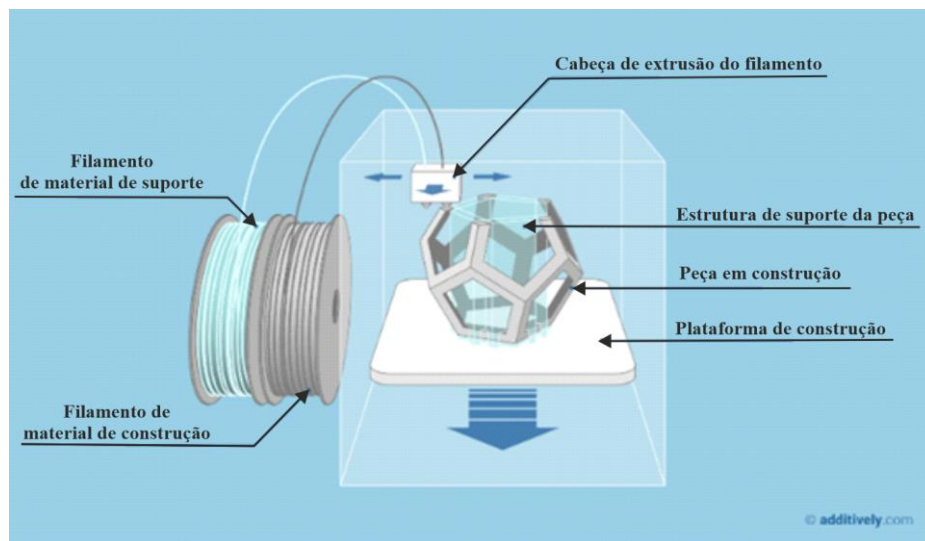


Figura 14 - Esquema de máquina e processo FDM, adaptado de [38].

Normalmente, os materiais de filamento usados para o processo de FDM são os termoplásticos, mas também podem ser filamentos biocompósitos, filamentos de cerâmica, filamentos de materiais compostos e metais. As características das peças, como as propriedades mecânicas, precisão dimensional e rugosidade da superfície, bem como eficiência de produção, estão diretamente relacionadas com os parâmetros do processo FDM tais como parâmetros de fatiamento, orientação na plataforma de construção e

condições de temperatura [39]. O processo é usado para fabricar protótipos e peças finais funcionais. A tecnologia é aplicada em muitos campos diferentes, como a indústria aeroespacial e automotiva, e para muitos outros aparelhos, como eletrônicos, médicos, alimentos, de desporto, moda, etc.

Powder bed fusion (PBF)

As tecnologias de fusão em cama de pó de polímeros incluem fusão multijato (MJF), sinterização seletiva a laser (SLS).

Multi jet fusion (MJF)

A fusão multijato (MJF) é uma tecnologia que usa um agente de fusão e energia para curar os polímeros em pó numa cama de pó que será criada na plataforma de construção. Na Figura 15, está esquematizado uma máquina e processo: vê-se a cama de pó onde o objeto 3D está a ser construído e que está em cima da plataforma de construção (1), na seção (2) está o pó que é aquecido abaixo do seu ponto de fusão, e que será espalhado ao longo da área de trabalho por um rolo espalhador (3), quando uma camada de pó é espalhada, a cabeça de impressão (4) que tem a largura da camada, irá depositar dois agentes líquidos, um agente de fusão para fundir as partículas que é aplicado através de toda a seção transversal e um agente específico que é aplicado apenas no contorno do objeto para suportar o arrefecimento. Em seguida, o calor gerado pelas lâmpadas (5) é aplicado à camada, para que a fusão entre as partículas possa ocorrer, ou seja o pó derrete onde o agente de fusão foi aplicado. O processo é repetido quantas vezes forem necessárias até que a peça seja concluída. Finalmente, toda a cama de pó é arrefecida até à temperatura ambiente e o excesso de pó é aspirado e reutilizado [40].

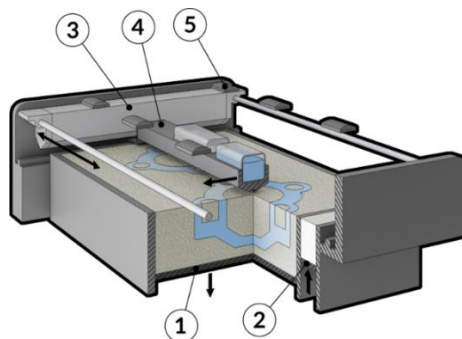


Figura 15 - Aparato e processo MJF [40].

Sinterização seletiva a laser (SLS)

A sinterização seletiva a laser (SLS) é um processo de fusão em cama de pó que consiste na sinterização de uma camada de polímero em pó por meio de um laser de CO₂. Na Figura 16 é representado uma máquina e processo. Existe uma plataforma de construção onde a peça será construída e ao lado dela uma outra plataforma contendo o pó como fonte de alimentação. O rolo nivelador espalha o pó na plataforma de construção e o feixe de laser que é projetado através de um espelho que se move horizontalmente nos eixos X-Y, cura a camada de polímero. A plataforma desce ao longo do eixo Z e o rolo nivelador espalha outra camada de pó muito fino, o feixe de laser atuará novamente fundindo as duas camadas juntas, bem como as subsequentes conforme o processo é repetido até que a peça seja concluída [35]. É necessário um período de arrefecimento para garantir uma fusão de qualidade. Não há necessidade de estruturas de suporte, uma vez que a cama de pó fornece suporte adequado à peça. A plataforma de construção e a câmara são aquecidas a uma temperatura alguns graus abaixo do ponto de fusão do material, para reduzir a dependência do laser que funde as camadas. Normalmente, a câmara é preenchida com nitrogênio para maximizar a oxidação e conseqüente qualidade da peça [41].

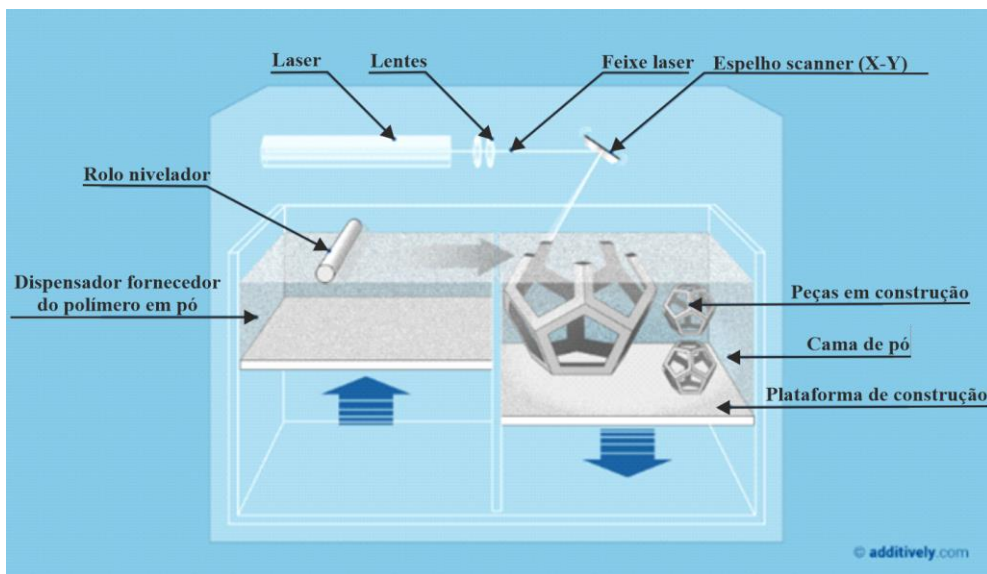


Figura 16 - Processo e aparatos do processo SLS, adaptado [42].

As vantagens deste processo são a sua elevada resolução e qualidade das peças produzidas o que torna o processo adequado para produção de peças complicadas, o facto de não ser necessário estruturas de suporte constitui também uma grande vantagem. A desvantagem deste processo tem que ver com o facto este ser lento e os equipamentos serem de elevado custo [20]. Alguns dos polímeros mais usados neste processo são a polyamida (PA),

poliamida revestida de vidro (PA-GF), (poliamida 2241 *fiber-reinforced*) PA 2241 FR e (Poliuretano Termoplástico 92-1)) TPU 92 – 1 [35].

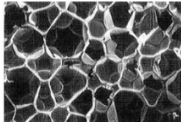

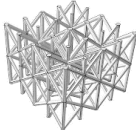
2.3.As estruturas celulares no fabrico aditivo

A natureza cria-se a si própria de forma exemplar. As estruturas celulares de que se compõe têm como objetivo o mínimo gasto de matéria para a obtenção de uma funcionalidade ótima. Desde sempre o Homem procurou imitar a natureza para a produção dos seus artefactos com vista à sua sobrevivência e evolução. Nos tempos correntes, na era da Indústria 4.0 e principalmente com as novas tecnologias de fabrico aditivo, a reprodução e fabrico das estruturas celulares encontradas na natureza tornou-se uma realidade. De facto, tal não era possível pelos métodos tradicionais de fabrico ou era de forma extremamente difícil e onerosa [43] [44]. Neste subcapítulo procura-se, através de uma revisão da literatura e de forma sucinta compreender as estruturas celulares pela sua definição, classificação, aplicações, caracterização e vantagens, terminando com uma abordagem às estruturas que mais se adequam à construção de materiais cuja finalidade é a resistência à compressão e absorção de energia, bem como o seu comportamento quando sujeitas a esforços de compressão.

Definição, classificação e aplicações

As estruturas celulares são uma rede constituída por placas, suportes ou células unitárias interconectadas entre si, a repetição das estruturas pode ser periódica ou não-periódica. A madeira, a cortiça, corais, esponjas e os ossos são exemplos encontrados na natureza. As estruturas celulares podem ser definidas quanto à sua densidade relativa, tamanho da célula unitária, espessura de paredes, regularidade/repetição, ligação entre células unitárias e o material de que são feitas [45]. Os materiais celulares são classificados em espumas de células abertas ou fechadas, favos de mel e treliças (*lattices*) [45][46]. A Tabela 3 apresenta as três classificações, as características das formas das células por que são compostas e o seu arranjo no espaço bem como algumas das aplicações. No entanto, é de referir que para muitos autores e em variados estudos, estruturas celulares equivalem a estruturas *lattice*, não havendo portanto distinção entre espumas, os favos de mel/colmeias e treliças [47]. Neste trabalho optou-se por fazer uma diferenciação das estruturas e tratar as *lattices* como o grupo de estruturas que possui propriedades específicas, especialmente a de poderem ser desenhadas e otimizadas com vista a diferentes propósitos.

Tabela 3 - Classificação das estruturas celulares, suas características e aplicações

Estruturas celulares	Forma e Arranjo	Aplicações
<p data-bbox="363 367 464 394">Espumas</p>  <p data-bbox="280 568 544 595">Figura 17 – Espuma [46].</p>	<p data-bbox="627 412 898 546">A forma das células unitárias é aleatória bem como a sua orientação no espaço [46].</p>	<p data-bbox="946 400 1348 562">Absorventes de energia, filtros, silenciadores, corta-chamas, aquecedores e permutadores de calor, dispositivos eletroquímicos.</p>
<p data-bbox="323 629 499 656">Favos de abelha</p>  <p data-bbox="244 848 584 875">Figura 18 - Favos de abelha [46].</p>	<p data-bbox="624 629 901 902">As células unitárias têm a mesma forma e tamanho e a estrutura tem forma regular. Podem ter várias formas: tetraedro, prisma triangular, prisma quadrado, prisma hexagonal etc [46].</p>	<p data-bbox="946 696 1345 831">Absorventes de energia, implantes biomédicos, filtros, sensores, atuadores, absorvedores de vibração, amortecedores.</p>
<p data-bbox="368 938 456 965">Treliças</p>  <p data-bbox="248 1167 576 1216">Figura 19 - Exemplo de treliças [46].</p>	<p data-bbox="624 972 901 1178">Conjunto de células unitárias periódicas no espaço. Podem ser 2d ou 3d. Muitas vezes estão ligadas a sólidos celulares [46] [48].</p>	<p data-bbox="946 954 1348 1193">Absorventes de energia, aquecedores e permutadores de calor, motores, implantes biomédicos, pás do ventilador do motor de turbina a gás, absorvedora de vibração, sistemas robóticos, indústria automobilística e aeroespacial.</p>

As estruturas treliça (*lattices*): definição e classificação

Como acima referido, neste trabalho as estruturas *lattice* são tratadas como um tipo de estrutura celular. O motivo assenta no facto de, nas *lattices*, cada unidade celular e cada estrutura de suporte (*beam*) desta poder ser concebida e definida como uma variável no design e ser otimizada para satisfazer requisitos pré-determinados e específicos do ponto de vista funcional, por este motivo conseguem ter melhores propriedades mecânicas que as estruturas de favo de mel e espumas [46] [47]. Na revisão da literatura encontram-se variadas definições para estrutura *lattice*, a maioria delas conflui no seu conteúdo semântico variando apenas na forma de definição. Assim, tem-se que uma estrutura *lattice* é uma estrutura porosa tridimensional formada pelo arranjo espacial e combinação de células unitárias, podendo estas ter diferentes geometrias topológicas [47]. Relativamente à uniformidade da distribuição das células, as *lattices* podem ser uniformes ou não uniformes.

- Estruturas uniformes: células unitárias com a mesma forma topológica e tamanho, cujo arranjo espacial consiste na sua repetição de forma uniforme;
- Estruturas não uniformes: células unitárias com diferentes formas topológicas e/ou tamanhos e estas não são arranjadas no espaço de forma repetida [47].

Na Figura 20 está representada uma célula unitária – *lattice* - e as suas estruturas, as *beams* que também podem ser designadas de *struts*, a junção destas origina os nós (*joints*) [49].

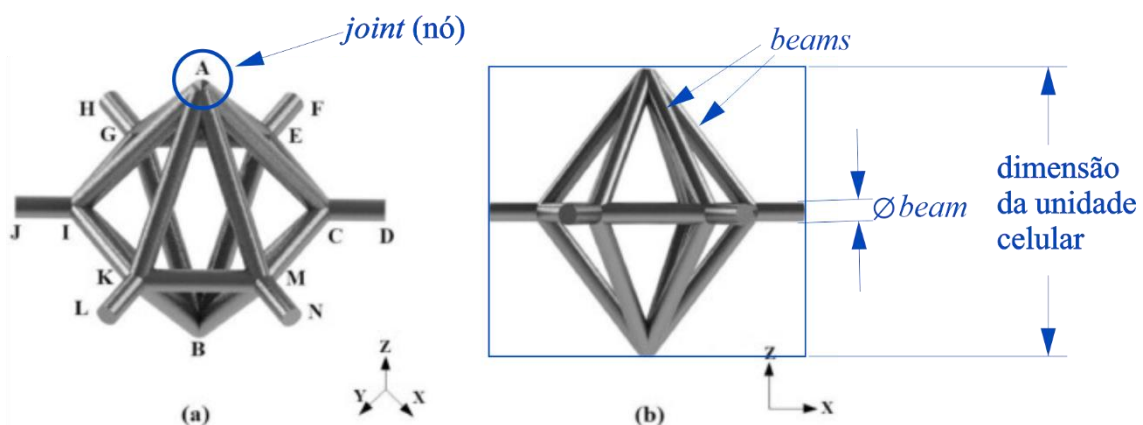


Figura 20 - Unidade celular - *lattice*; a) perspetiva; b) vista frontal, adaptado de [49].

A repetição de várias *lattices* num espaço, seja uniforme ou não uniforme, origina uma composição de material a que se chama estrutura celular. A dimensão da célula unitária relacionada com o diâmetro atribuído às suas *beams* irá definir a densidade e esta a porosidade. Na Figura 21 está representada uma estrutura celular onde a célula unitária é repetida uniformemente, a sua dimensão é sempre a mesma, mas o diâmetro das *beams* vai aumentando de baixo para cima tornando esta parte mais densa e, portanto, menos porosa. Numa estrutura celular quanto menor a porosidade menor a absorção de energia [49].

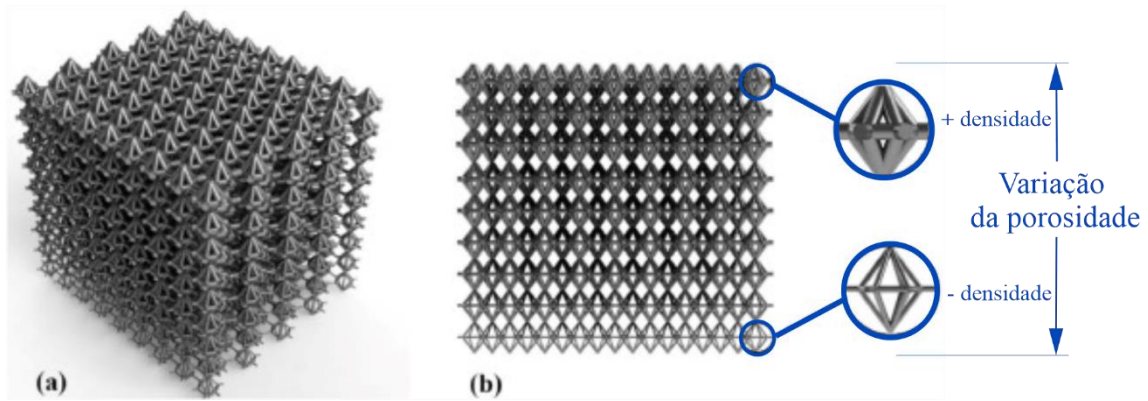


Figura 21 - Estrutura celular composta pelo arranjo espacial uniforme da mesma *lattice*, a) perspectiva, b) vista frontal, adaptado de [49].

Caracterização geral e vantagens

Uma estrutura *lattice*, devido à sua microarquitetura pode ser considerada como material *lattice* e, portanto, um material monolítico com propriedades próprias. O seu comportamento mecânico depende não só do design das estruturas (responsável pela distribuição do material e a sua porosidade) mas também do material de que é construído, aliás, este determina as propriedades mecânicas básicas tais como o Módulo de Young, fragilidade, ductilidade, limite de fadiga e limite de elasticidade [48].

A densidade relativa é a característica mais crítica e importante do material *lattice*, sendo definida como a razão da densidade do material *lattice* para o material sólido do qual o material *lattice* é feito [45]. Assim, as estruturas *lattice* caracterizam-se por possuírem elevada porosidade, alta resistência e rigidez específicas, grande área de superfície e grande capacidade de absorção de energia [48]. Por outro lado, a grande flexibilidade que é oferecida quanto às possibilidades de design, tornam possível a construção de materiais *lattice* direcionados ao cumprimento de funções específicas, sendo possível usar apenas o material necessário colocando-o onde e como for essencial. Este facto apresenta-se como uma enorme vantagem. Em geral as células das estruturas têm um comprimento que varia entre 0,1 e 10 mm e o comportamento mecânico da estrutura celular é anisotrópico [45].

Propriedades mecânicas das estruturas *lattice*

As propriedades mecânicas dependem da forma e estrutura da célula unitária bem como do material de que são produzidas [45]. Vários estudos têm sido realizados com vista ao estudo das propriedades mecânicas das estruturas *lattice*. Quando aplicadas cargas às estruturas, podem ser verificados 3 tipos de tensões, a tensão de flexão, a tensão de corte e a tensão normal [50]. Um dos conceitos mais importantes aquando da análise do comportamento mecânico das estruturas *lattice* é a sua capacidade de flexão e de extensão. No que respeita ao comportamento mecânico as treliças podem ser caracterizadas como:

- Estruturas de arquitetura do domínio de extensão;
- Estruturas de arquitetura do domínio da flexão [48] [47] [50].

As estruturas de extensão são rígidas e fortes enquanto as de flexão não sendo tão fortes são ideais para absorção de energia sob compressão [47]. Esta caracterização assenta no critério de estabilidade de Maxwell e tem como objetivo a determinação estática e cinética da célula unitária. Segundo este critério, numa célula unitária do ponto de vista da conectividade das *beams*, $M = b - 3j + 6 = 0$, em que b é o número de *beams* e j o número de juntas [48].

Estruturas *lattice* para compressão

Uma das grandes vantagens das estruturas *lattice* reside na sua capacidade de aguentarem altas cargas de compressão, o que as torna adequadas para aplicações cuja finalidade é a absorção de energia [50].

As espumas, devido à sua estrutura celular de baixa densidade capaz de se deformar rapidamente sob carga, tornam-se materiais adequados para absorver energia. Inspirando-se e estudando estas estruturas, Thomson (Lord Kelvin) criou uma célula unitária repetível que consiste num poliedro composto por 6 quadrados e 8 faces hexagonais, a qual se designa por célula *Kelvin*. Esta célula é passível de ser repetida de forma ordenada criando estruturas capazes de simular o comportamento da espuma e tem sido amplamente usada para este efeito [51].

Os favos de mel ou colmeias e a sua forma hexagonal, bem como as espumas, servem de inspiração aos materiais auxéticos. As estruturas auxéticas, também conhecidas como

estruturas de coeficiente de *Poisson* negativo ou estruturas re-entrantes têm um comportamento diferente relativamente a estruturas convencionais. Basicamente, quando sujeitas a cargas de compressão ou tensão apresentam um coeficiente de Poisson negativo, o que significa que encolhem quando comprimidas e expandem quando alongadas. Este comportamento incomum deve-se principalmente às arquiteturas das estruturas e esta tem sido alvo de estudos na comunidade científica. Quando devidamente otimizadas, verifica-se que têm uma capacidade de flexão superior, e um comportamento sob compressão superior relativamente às estruturas comuns [51][52].

O comportamento típico de uma estrutura celular sob uma carga de compressão apresenta 3 regimes: elástico, planalto e densificação[47] [48] [51]. A Figura 22 apresenta um gráfico de comportamento tensão-deformação de um sólido celular sob compressão.

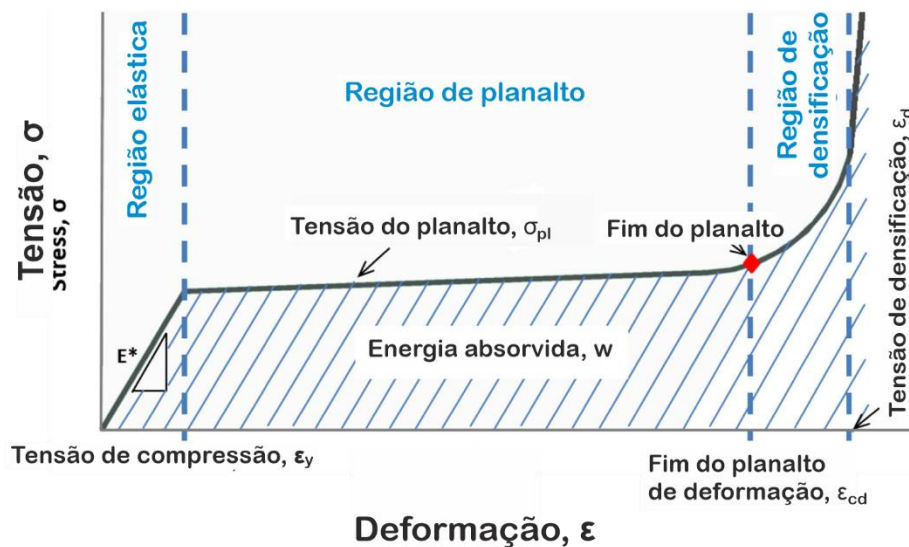


Figura 22 - Gráfico tensão-deformação representativo do comportamento de estruturas sob cargas de compressão [47].

Inicialmente a estrutura apresenta um regime elástico linear em que as hastes (*beams*) fletem dando origem à deformação, pouca energia é absorvida, segue-se um planalto onde se verifica grande absorção de energia as células começam a colapsar, seja por instabilidade, limite elástico ou fratura frágil dependendo do material de que são feitas, quando este planalto termina, inicia-se o último regime que é a densificação. Na fase densificação já todas as células colapsaram e estão em contacto umas com as outras, aqui a estrutura apresenta-se densa sem porosidade [47].

2.4. Calçado produzido por tecnologias de fabrico aditivo

As tecnologias de FA já são utilizadas na fabricação de calçados há algum tempo. Começaram a ser usadas a partir dos anos 2010 na alta moda por designers e artistas para produzir sapatos únicos baseados em experimentalismos com fins de cariz mais estéticos do que funcionais. Com o tempo, foi estendido a outros ramos da indústria do calçado, para produção de calçado casual, desportivo e ortopédico [53]. A pesquisa que se segue procura enunciar o que hoje existe de mais relevante sobre o estado da arte nas áreas do calçado acima enunciado. A Tabela 4 apresenta alguns exemplos de calçado da moda produzidos com tecnologias FA, onde está referida a empresa e/ou autor, o propósito de realização, os materiais e tecnologias usadas, as quantidades produzidas e imagem do sapato. A Tabela 5 apresenta exemplos de alguns produtos de marcas de calçado casual que investem na produção do mesmo de forma personalizada e por FA. A Tabela 6 apresenta as principais marcas produtoras de calçado desportivo em massa que estão a investir na pesquisa e implementação do FA na produção de calçado, tendo vindo a realizar calçado personalizado para atletas de elite e também na realização de pequenas séries. Por fim, a Tabela 7 apresenta alguns produtores de palmilhas ortopédicas personalizadas.

Tabela 4 - Exemplos de calçado de moda produzido por FA.





Empresa Marca/Autor	Parte do sapato	Data lançamento Propósito	Processo FA Parceria	Materiais	Qt pares preço	Produto
Promovido por United Nude – Rem D Koolas e Iris Van Herpen	Todo o sapato “Treeshoes”.	2013 Semana da moda de Paris	Tecnologia de impressãoStratasys PolyJet 3D impressoras multi-materiais Objet Connex and Objet Eden Stratasys [54].	PA e TPU, rigid black (VeroBlack) e branco(VeroWhite) materiais opacos [54].	Alguns pares para desfile de moda.	 Figura 23 - Sapatos "Treeshoes" [55].
Iris Van Herpen e Noritaka Tatehana	Salto alto “Crystal” shoe	2015 “Hacking Infinity” coleção	SLA 3D Systems’ ProX 950 SLA printer [56].		Alguns pares para desfile de moda.	 Figura 24 - Sapatos "Crystal" [56].
United Nude e designer Michal Kukucka	Tacão alto“Coral” Shoes	2014	3D systems CubePro® [57]		Alguns pares	 Figura 25 - Sapatos "Coral" [57].
United Nude e o designer Michal Kukucka	O sapato completo, impresso em partes posteriormente assembladas “Float” Shoes [58].	2014 Para ser impresso em impressoras de mesa nas lojas [58].	Impressora Cube 3D 3D systems [58].		Edição limitada	 Figura 26 - Sapatos "Float" [59].

Tabela 5 - Exemplos de calçado casual produzido por FA.



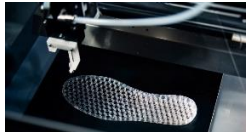








Empresa/ marca	Parte do sapato	Data lançamento Propósito	Obtenção da informação digital do pé	Processo FA Parceria	Materiais	Qt pares Preço	Produto
Feetz	Sapato completo	2013 Impressão 3D do sapato feito por medida para o cliente [60]	Tecnologia própria SizeMe™ para obtenção do <i>scan</i> do pé do cliente O cliente usa uma <i>app</i> no seu <i>smartphone</i> para obtenção do <i>scan</i> do pé [60]	FDM  Figura 27 - Fábrica Feetz [40].	Próprios da marca Feetz [60]	A fábrica está equipada com 100 impressoras 3D. Entre 99 e 250 dólares [60].	 Figura 28 - Sapato Feetz [60].
ECCO	Entressola	2017, Innovation Lab ECCO anuncia o projeto Quant-U e foi lançado em 2018 na W-21 Amsterdão [61].	Parceria com Dassault Systèmes' FashionLab para criação de uma experiência 3D baseada em informações na <i>nuvem</i> Colaboração com Cambridge Design (Cambridge, UK) para desenvolvimento de sensores, agora proprietários da ECCO para capturar dados na digitalizadora Volumental 3D [61].	Impressoras 3D dedicadas Rep- Rap [61].  Figura 29 - Impressão da entressola 3D.	Materiais de silicone da Dow Chemical Empresa [61].	Um par custa entre 350 e 400 euros [61].	 Figura 30 - Assemblagem do sapato [61].
<i>Liquid Printed Natives</i> de Native Shoes	Sapato completo	Ainda sem data para lançamento ara produção de desportivos casuais e sabrinas [62].	Ainda a desenvolver um dispositivo para o cliente digitalizar os pés com Elevado nível de precisão[62].	Colaboração com Self- Assembly Lab do MIT que desenvolve uma tecnologia que faz a impressão 3D num contentor com borracha líquida [62].	Borracha liquida 50% é (EVA)[62].	Ainda em desenvolvime nto [62].	 Figura 31 - Sabrinas de Liquid Printed Natives [63].

Tabela 6 - Exemplos de calçado desportivo produzido por FA.

Empresa/ Marca	Parte do sapato	Data lançamento Propósito	Obtenção da informação digital dos pés	Processos Fa Parcerias	Materiais	Qt pares Preço	Produto
Adidas	Entressola	2017 Alphaedge 4D de Futurcraft 4D para criar ténis de alta performance para atletas	Informação recolhida de usuários durante vários anos.	Continuous Liquid Interface Production (CLIP™) Tecnologia da Carbon [64].  Figura 32 - Estrutura <i>lattice</i> da sola[64].	Poliuretano da Carbon EPU 40 [64].	Produção em massa 299.95 euros [65]	 Figura 33 - Alphaedge 4D [65].
		2021 4D Fusion e 4DFWD, especialmente para elevar a performance de atletas [63]	Informação recolhida de usuários durante vários anos.	Tecnologia DLS da Carbon Novo tipo de <i>lattice</i> [63]. 	40% <i>bio- based</i> material [63]	 Figura 34 - Sapatilha 4DFWD [63].	
Nike	Cortes	2017 Nike Vaporfly Elite Flyprint Cortes impressos em 3D especialmente para tenis de alta performance [66]	desenvolvido a partir de informação biométrica recolhida de atletas com o propósito de definir o material e estrutura adequada [66].	solid deposition modelling (SDM)  Figura 35 - Impressão 3D de cortes Nike Flyprint [49].	Filamento TPU [66]	Produção em massa preço dependente do modelo	 Figura 36 - Nike Vaporfly Elite Flyprint [66].
New Balance	Entressolas	2016 Zante Generate shoe		SLS 3D Systems	Elastomero TPU Duraform TPU	48 pairs 400 dólares	









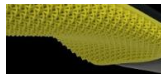

		Tenis personalizados para atletas		Chapas de espigões para tenis personalizados Tecnologia SLS EOS		Ténis personalizados para atletas	
		2019 990 Sport Triple Cell (June) seguido de FuelCell Echo Triple (Setembro)) [67]		Formlabs [67]	Resina [67]	Edição limitada 175 dólares	 Figura 37 - 990 Sport Triple Cell [67].
Under Armour	Entressolas	2016 Under Armour Architech	Estruturas lattice 3D Desenhadas com “Autodesk Within” software de design generativo da Autodesk [68]	criado nos laboratórios de inovação da Under armour em Baltimore [69]	TPU	96 pares 300 dólares [69]	 Figura 38 - Architect [69].
		2017 ArchiTech Futurist Sneaker		Sinterização seletiva a laser (SLS) EOS [69].	TPU em desenvolvimento de pós de polimeros[69]	Edição limitada 300 dólares [69]	 Figura 39 - ArchiTech Futurist 3D [69].
Reebok	Tiras (vermelhas) que envolvem todo o sapato e ajustam [70]	2016 Ténis Liquid Speed		Material de extrusão da Reebok Liquid Factory desenvolvido para o seu processo tecnológico de impressão 3D de sapatos que combina software com braços robóticos para imprimir. BASF eRAMPFjuntaram-se para desenvolver o processo e material [70].	Material patenteado de base líquida [70].	300 pares 189.50 dólares [70]	 Figura 40 - Liquid Speed shoes [70].
		2018 Liquid Floatride Run				180 dólares [70]	 Figura 41 - Liquid Floatride Run [70].

Tabela 7 - Exemplos de palmilhas ortopédicas produzidas por FA.

Empresa/ Marca	Parte do sapato	Data de lançamento Propósito	Aquisição da informação sobre os pés	Processo FA Parceria	Materiais	Qt pares/Preço	Produto
Wiiv	Palmilhas e sandálias personalizadas [71]	Para combater a fascite plantar, e outras patologias, impressão 3D personalizada Sandálias com suporte de arco plantar personalizado[71]	Digitalização do pé através de uma <i>app</i> no <i>smartphone</i> . A informação é recolhida e processada por tecnologia proprietária da Wiiv para construção do modelo para impressão 3D [71]	SLS sPro™ 60 SLS Impressora da 3D Systems [71]	100 % espuma reciclada [71]	Comercialização em massa, 99 dólares [71]	 <p>Figura 42 - Palmilhas Wiiv [71].</p>  <p>Figura 43 - Sandálias Wiiv [71].</p>
Phits	Palmilhas ortopédicas	2014	Digitalização na passadeira Footscan® para medição da pressão plantar e analisar a passada. É criado um perfil do cliente e enviado para profissionais de saúde para que sejam criadas as palmilhas personalizadas. São desenhadas e impressas com a forma de estruturas lattice[72].	SLS Parceria entre RS scan e Materialize que deu origem à RS Print® [72].	PA12 [72]	Comercialização em massa Entrega em 2 semanas 199 £ [72].	 <p>Figura 44 - Palmilhas Phits [72].</p>  <p>Figura 45 - Estrutura lattice Phits [72].</p>
Scientifit	Palmilhas ortopédicas	2016 Empresa de podologia pertencente à divisão de produto da Prodways Group [73].	Scientifeet 3D scanner PodoClic permite obter uma digitalização precisa dos pés. [73].	Pó de sinterização da tecnologia da Prodways [73].	PA12 [73]	Scientifeet trabalha com podologistas e estes com os seus clientes [73].	 <p>Figura 46 - Scientifit insoles [73].</p>

2.5.O pé e a pressão plantar

O projeto tem como objetivo conceber entressolas e/ou palmilhas realizáveis por processos de fabricação aditiva com o objetivo de aliviar a pressão plantar. Assim, torna-se imperativo compreender o que é a pressão plantar, como esta é medida e tratados os dados, quais as vantagens do conhecimento obtido e como poderá ser aplicado em objetos e serviços relacionados ao ser humano com vista a melhorar a sua qualidade de vida.

2.5.1. O pé

O pé humano faz a ligação entre o corpo e a terra, adapta-se e contorna as irregularidades da superfície que pisa. É uma estrutura altamente complexa quer na sua dimensão anatómica quer biomecânica. Estas dimensões conjuntas desempenham funções que permitem ao pé contribuir para a estabilidade, flexibilidade, absorção de choques, locomoção e propulsão do corpo. Sendo uma alavanca de propulsão, contribui para o balanço do corpo permitindo um menor gasto de energia do mesmo [74]. Músculos, ligamentos, tendões, articulações e 60 ossos no total, 26 em cada pé somados aos 4 de cada membro inferior contribuem o desempenho das funções referidas [74]. A Figura 47 representa os ossos do pé.

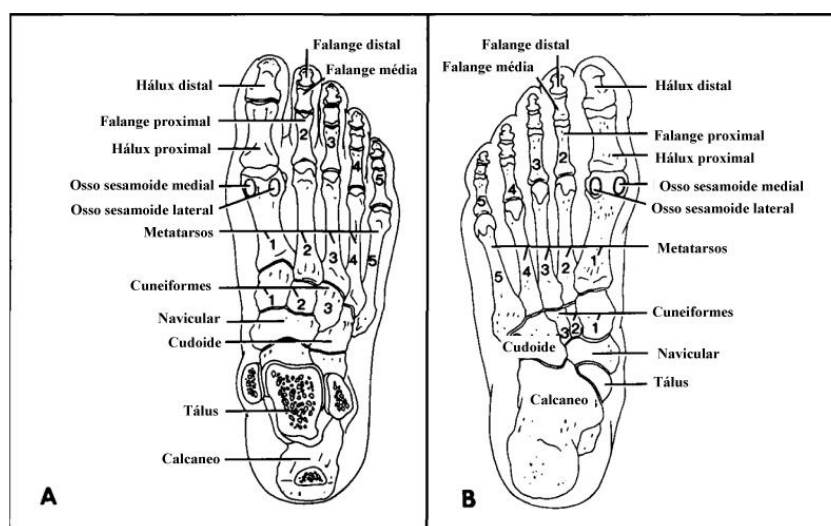


Figura 47 - Os ossos do pé, vista dorsal (A) e vista plantar (B), adaptado [74].

Clinicamente o pé é dividido em regiões: o retropé, o mediopé e o antepé. O retropé inclui os ossos tálus e calcâneo e a articulação entre os dois é a articulação subtalar, também denominada de articulação de *Choupart*. O mediopé é formado pelos ossos navicular,

cuboide e cuneiformes medial, intermédio e lateral, a principal articulação é a taluscalcâneonavicular e que liga os ossos navicular do mediopé aos ossos do retropé o tálus e calcâneo. O antepé é formado pelos ossos metatarsos e falanges, a articulação que liga o antepé ao mediopé denomina-se de articulação tarsometatarsal, também chamada de articulação de *Lisfranc* [75]. A Figura 48 representa as regiões do pé.

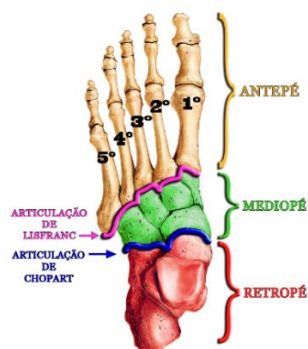


Figura 48 - Regiões do pé [75].

Dado o cariz do projeto a realizar, a atenção irá focar-se na planta do pé e na pressão plantar, enquanto critério de validação da solução.

2.5.2. A pressão plantar e as vantagens do seu conhecimento

Designa-se por pressão plantar ao campo de pressão que atua entre o pé e a superfície de apoio deste durante as atividades diárias de locomoção dos indivíduos [76]. A análise da distribuição da pressão plantar tem como objetivo identificar quais as zonas do pé sujeitas a maior carga e/ou sobrecarga em situações de estática e dinâmica. Tal análise revela-se importante não só para o estudo de locomoção do ser humano em geral e de cada indivíduo em particular, mas também para detetar disfunções do pé e patologias deste, sendo estas muitas vezes consequência de outras patologias em que uma das mais importantes é a diabetes e o consequente “pé diabético”, mas também podem ser identificadas a artrite reumatoide e a doença de Parkinson [77] [78]. As estruturas e tecidos do pé têm uma capacidade limitada de sobrecarga que sendo ultrapassada origina lesões. Por exemplo a formação de um calo na superfície plantar pode elevar a mesma até cerca de 30%. Em pacientes diabéticos neuropáticos é frequente a existência de ulcerações principalmente na cabeça dos metatarsos, vários estudos fazem a relação desta patologia com a excessiva pressão plantar [77].

O estudo e análise da pressão plantar torna-se assim pertinente na medida em que permite perceber como deverá ser feita a distribuição de forma a aliviar sobrecargas. O conhecimento da pressão plantar dos pés dos indivíduos em geral e de cada um em particular é de extrema importância não só para identificação de patologias mas também para o desenvolvimento de calçado adequado ao alívio da pressão plantar o que resulta em conforto e bem-estar em geral, tendo também uma enorme importância no desenvolvimento de calçado terapêutico para prevenção e tratamento de doenças do foro podológico e de calçado desportivo em geral e de alta competição [76] [77].

2.5.3. Sistemas de medição plantar

Existem vários tipos de instrumentos para medição da pressão plantar, estes dividem-se em dois grupos: os sistemas de plataformas também denominados de baropodómetros e os sistemas de medição dentro do calçado que consistem em palmilhas sensorizadas [76]. Os sistemas de plataformas consistem basicamente em bases rígidas de apoio colocadas no chão, cujo interior é provido de sensores que leem a pressão plantar quando o pé entra em contacto com a superfície e é apoiado nela. Estas plataformas estão ligadas a um *software* que faz a transmissão e análise dos dados. São utilizadas para leitura em estática e dinâmica. São usadas em laboratórios de pesquisa e como tal é exigido ao utente que replique a sua postura e caminhada do seu dia-a-dia, e esta constitui a principal desvantagem das plataformas [76]. A Figura 49 apresenta um exemplo de plataforma de medição plantar e respetiva recolha de dados pelo *software*.



Figura 49 - Plataforma RSscan e leitura de dados [79].

O grupo de sistemas de medição da pressão dentro do calçado consiste em sistemas embutidos no calçado, geralmente nas palmilhas. Estes sistemas têm a vantagem de permitir medições em situações reais de mobilidade em terrenos de ambiente natural, contudo nestes sistemas os sensores são menos resultando em menor resolução espacial dos dados, o que os torna menos eficazes quando comparados com os sistemas de plataformas. Para que estes sistemas sejam eficazes e, portanto, confiáveis é necessário que os sensores a serem embutidos no calçado sejam móveis, pequenos, leves (peso de

preferência até 300 g), que não tenham fios de ligação ou o menor número possível, sejam finos e flexíveis e por último, que sejam de baixo custo [76]. A Figura 50 representa um exemplo deste tipo de sistemas.



Figura 50 - Sistema embutido no calçado F-Scan®, da Tekscan, adaptado de [80].

A localização da colocação dos sensores é de extrema importância. Estes deverão ser colocados nas zonas identificadas na Figura 51 visto serem estas as zonas que suportam a maior parte do peso do corpo e que durante a locomoção vão sendo ajustadas pelo equilíbrio do corpo [76].

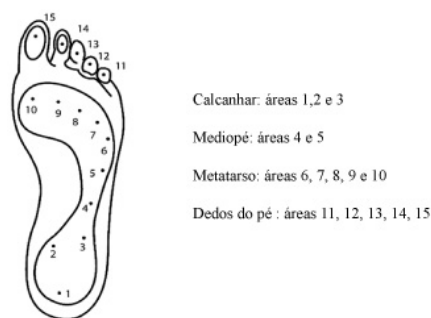


Figura 51 - Zonas da sola do pé onde devem ser colocados sensores [76].

2.5.4. Identificação e distribuição da pressão plantar

A distribuição da pressão plantar pode ser medida em estática e dinâmica, no entanto esta última torna-se mais pertinente de analisar visto que o ser humano apresenta dinâmica nas suas tarefas diárias pela marcha. A marcha é caracterizada por ciclos. Um ciclo de marcha compreende o tempo em que um pé está em contacto com o solo e o tempo que está levantado fora do solo. Assim, o ciclo compreende duas fases, a fase de apoio – aquela em que o pé está em contacto com o solo e suporta o peso do corpo, e a fase de balanço – quando o pé se retira do solo alavancado pelo dedo maior do pé e se prepara para voltar a este, iniciando um novo ciclo. A fase de apoio compreende 60% do ciclo enquanto a fase de balanço compreende os restantes 40% [78]. As fases do ciclo de marcha estão representadas na Figura 52.

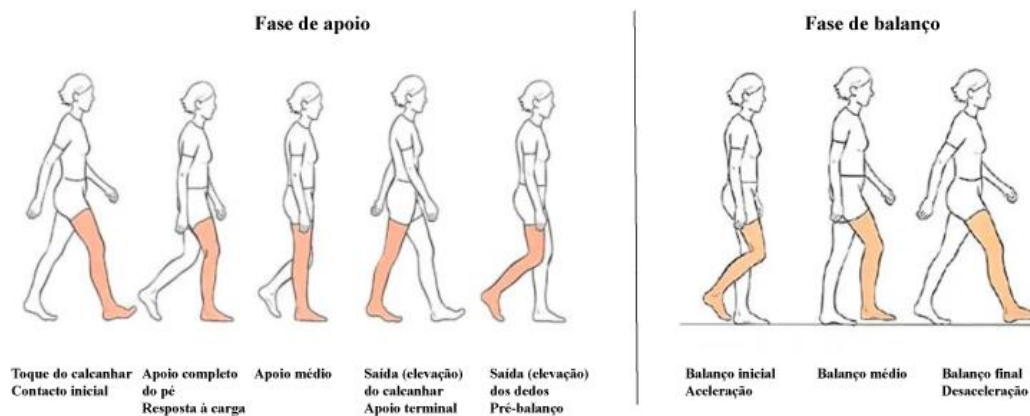


Figura 52 - Fases do ciclo de marcha, adaptado [81].

Os dados obtidos pelos sistemas de medição plantar são interpretados e tratados de forma a obter a informação necessária para atingir objetivos pré-estabelecidos. Os resultados obtidos pelas medições aparecem sob a forma de gráficos em 2D ou 3D e dão informação sobre a progressão da pressão plantar durante o ciclo de marcha. As diferenças da pressão plantar são visíveis através de uma legenda na forma de cores que varia em magnitude desde o azul-escuro que representa baixa pressão plantar, até ao vermelho que representa os mais elevados valores para a pressão plantar e o consequente pico de pressão. A Figura 53 representa os valores típicos de valores de pressão plantar durante a marcha num estudo realizado com indivíduos sem patologias [78].

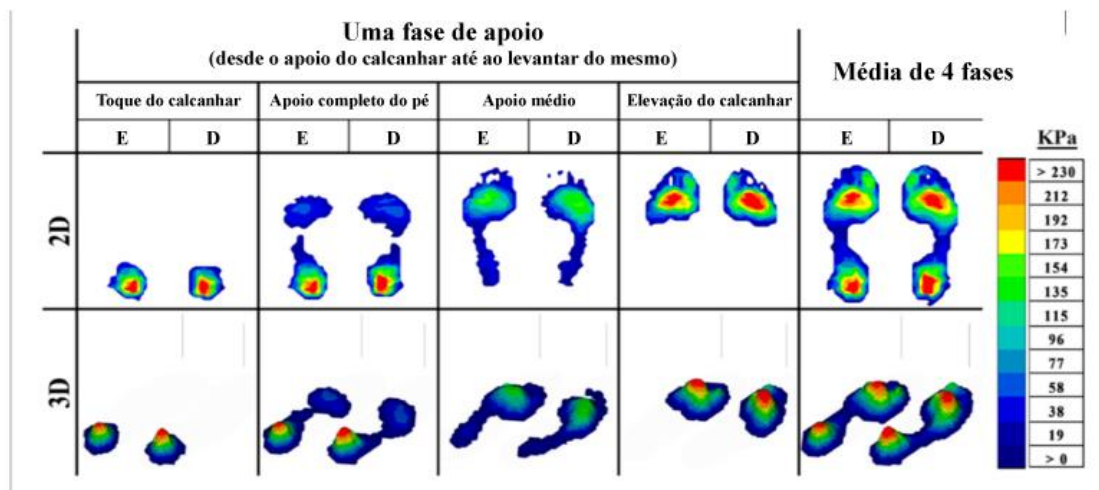


Figura 53 - Representação da distribuição plantar em 2D e 3D na fase de apoio do ciclo de marcha em indivíduos sem patologias, adaptada [78].

Como é facilmente verificável, as zonas de maior pressão plantar durante o ciclo de marcha são as zonas do calcanhar (retropé) e dos metatarsos (antepé), o dedo maior

(*hallux*) que apresentam valores elevados, sendo que a zona do médio-pé não é particularmente afetada devendo, no entanto, ser levada em consideração.

A maior ou menor pressão e as variações desta nas diferentes zonas da sola do pé é algo particular de cada indivíduo dependendo das suas diferentes características. No entanto, há fatores que contribuem de forma muito significativa para a distribuição da pressão plantar sendo as mais importantes o índice de massa corporal (IMC), a caracterização do tipo de arco do pé, ou seja, se é pé plano, normal ou cavo, o tipo de passada se é passada normal, supinada ou pronada, estando este fator bastante correlacionado com o tipo de arco do pé, e claro, se o indivíduo sofre de patologias que afetem a estrutura e biomecânica do pé.

Com o intuito de verificar de que forma é que estes fatores influem na distribuição da pressão plantar em indivíduos saudáveis, é seguidamente apresentada uma revisão da literatura referente ao assunto.

2.5.5. Influência dos diferentes tipos de pé segundo o Arco Longitudinal Medial (ALM) – pé normal, pé plano e pé cavo na distribuição da pressão plantar

O que define o tipo de pé quanto à sua estrutura segundo o ALM é o índice do arco plantar. Segundo Cavanagh e Rodgers, o ALM é classificado pelos seguintes valores: ALM elevado (arco $\leq 0,21$), ALM normal ($0,22 > \text{arco} < 0,26$) e ALM baixo (arco $\geq 0,26$) [82]. A Figura 54 representa os três tipos de pés [83].

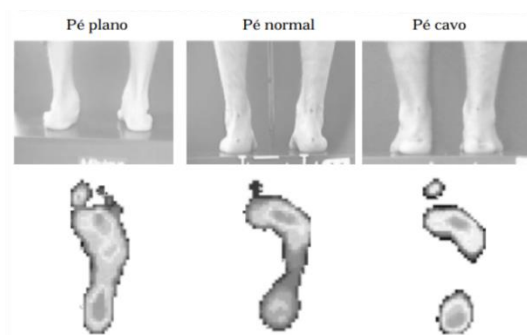


Figura 54 - Representação dos 3 tipos de pés: plano, normal e cavo [83].

Vários estudos têm vindo a ser realizados no sentido de perceber qual a influência do tipo de pé segundo o seu ALM na distribuição da pressão plantar.

Por exemplo num estudo realizado com 111 indivíduos masculinos saudáveis, com média de idade 28.76 (± 6.34) peso 73.96 (± 10.18) foi usado o sistema de palmilhas sensorizadas *F-Scan* para as medições. De entre os indivíduos foram formados três grupos, um grupo com pés planos, outro com pés cavos e outro com pés normais. Os dados sobre a distribuição da pressão plantar e a força de reação do solo, foram recolhidos com os indivíduos na posição em pé equilibrado com peso distribuído igualmente sobre os dois pés descalços e a caminhar com velocidade normal [83]. Os principais resultados e conclusões são apresentados na Tabela 8 e a Figura 55 apresenta as imagens obtidas das diferentes pressões plantares referentes aos diferentes tipos de pés.

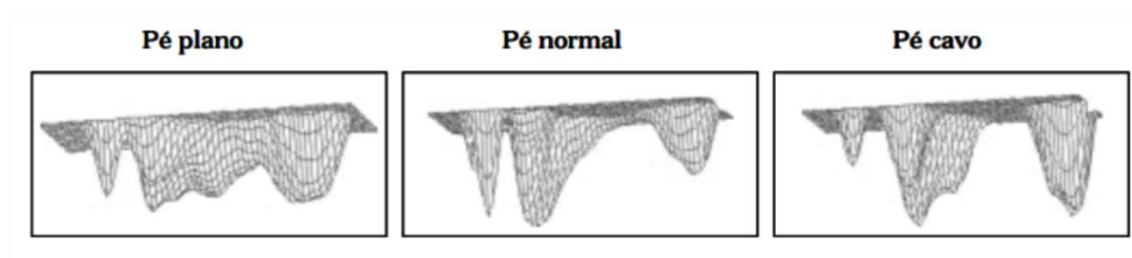


Figura 55 - Picos de pressão nos três diferentes tipos de pés para o caminhar normal [83].

Tabela 8 - Resumo dos resultados do estudo [83].

Tipo de pé	Distribuição das cargas nas zonas do pé	Distribuição da pressão na zona do antepé	Análise da trajetória do centro de força
Plano	Há pressão na zona do medio pé e esta é mais elevada e com maior área de contacto com o solo que os pés normais	Maiores pressões nas cabeças dos metatarsos I e II (padrão medial)	Deslocação medial das forças em direção à cabeça do metatarso I.
Normal	Há pressão na zona do médio pé	Maiores pressões nas cabeças dos metatarsos II e III (padrão central)	Deslocamento mais central para as cabeças dos metatarsos II e III seguindo depois em direção ao dedo maior.
Cavo	Sem pressões na zona do mediopé e com pressões elevadas no calcanhar e antepé.	Maiores pressões nas cabeças dos metatarsos II, III, IV e V (padrão central ou lateral)	Semelhante ao pé normal, mas mais lateralizado.

O mesmo estudo conclui também que, ainda que a distribuição do peso corporal seja diferente para o pé esquerdo e direito, pode considerar-se que em média 60% do peso corporal situa-se na zona do calcanhar, entre 31 e 38% na zona da cabeça dos metatarsos, até um máximo de 5,2% na zona do meio do pé e um máximo de 2% na zona dos dedos em que cerca de 82% desta situa-se no dedo I (*hallux*).

Um outro estudo foi realizado com 48 indivíduos adultos saudáveis sem anormalidades ao nível dos pés, 24 mulheres e 24 homens com o objetivo de comparar as várias medidas relacionadas com arco do pé e investigar as diferenças nas medidas dimensionais entre vários tipos de pés. Foi usado o sistema de medição de pressão *F-Scan* para determinar a área de contato, as forças e as pressões média e máxima no calcanhar, médio pé e antepé, excluindo as áreas dos dedos. Os dados foram recolhidos com os participantes na posição de pé para que o peso do corpo fosse dividido pelos lados esquerdo e direito [84]. Entre os vários resultados obtidos salientam-se a distribuição da pressão plantar nos diferentes tipos de pé que está representada nas Figura 56 e Figura 57.

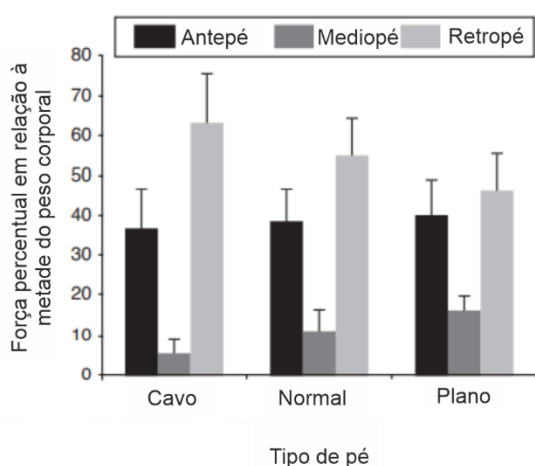


Figura 56 - Distribuição dos valores médios de força em relação à metade do peso corporal nas três regiões de cada tipo de pé. Barras de erro representam SD [84].

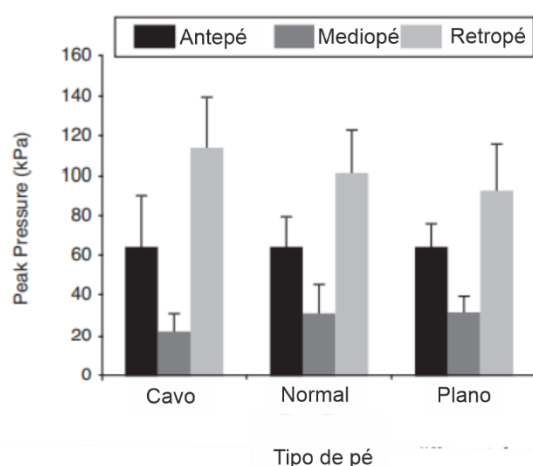


Figura 57 - Picos médios de pressão nos diferentes tipos de pés. Barras de erro representam SD [84].

Entre os vários resultados encontrados neste estudo, salientam-se os que interessam ao âmbito do projeto em questão. A distribuição das forças e picos de pressão são diferentes para os três diferentes tipos de pés consoante o seu arco. Verifica-se que as diferenças mais significativas se encontram ao nível do retropé e mediopé, enquanto na zona do antepé as diferenças não são grandes. Nos pés cavos a carga na zona do retropé é 17% superior relativamente aos pés planos e 11% inferior no mediopé, ou seja, os pés cavos apresentam picos de pressão superiores nas zonas do retropé e mediopé relativamente aos pés planos. Na zona do retropé os picos de pressão foram 112,6 kPa para os pés cavo, 101,37 kPa para os pés normais e 91,14 kPa para os pés planos [84]. Relativamente a pressões elevadas na zona do calcanhar um outro estudo sugere que na zona do calcanhar uma palmilha que se queira confortável é a que ofereça um pico de pressão inferior a 100 kPa [85].

Entre os dois estudos acima apresentados verificam-se resultados significativamente diferentes relativamente aos valores nas zonas do retropé e do antepé. Tal tem que ver com o facto de no primeiro estudo serem efetuadas medições na posição estática e em dinâmica enquanto no segundo as medições foram realizadas unicamente em estática.

2.5.6. Influência do IMC na distribuição da pressão plantar

O IMC segundo a OMS é o valor resultante da razão entre o peso e a altura: $IMC = P/altura$ e define o estado nutricional dos indivíduos. Os valores do IMC são divididos por cinco categorias: IMC <18,5 categoriza peso abaixo do normal, IMC 18,5 – 24,9 categoriza peso normal, IMC 25 – 30 categoriza pré-obesidade ou sobrepeso, IMC 30 – 34,9 categoriza obesidade I, IMC 35 – 39,9 categoriza obesidade II e IMC > 40 categoriza obesidade III ou peso mórbido [86].

Vários estudos têm vindo a ser realizados no sentido de verificar qual o impacto do IMC na distribuição da pressão plantar e picos de pressão nas várias zonas do pé. Verifica-se existir um aumento generalizado dos picos de pressão e área de contacto com o solo à medida que aumenta o IMC [87].

Um estudo com 120 indivíduos saudáveis distribuídos por 4 grupos nas categorias IMC normal, pré-obesidade, obesidade I e obesidade II, avaliou a pressão plantar e a área de contacto total do pé com o solo em estática e dinâmica com um sistema de plataforma *Mini-Emedpedobarography*. Os resultados encontrados em estática foram diferentes dos encontrados em dinâmica. Em estática verificou-se a força total plantar, a área total de contacto, o pico de pressão no calcanhar aumenta com o aumento do IMC, mas o pico de pressão no antepé desce com o aumento do IMC. Em dinâmica não se verificam diferenças significativas no pico de pressão no calcanhar, mas no meio do pé e no antepé principalmente no meio, o pico de pressão aumenta com o aumento do IMC. Conclui-se que em dinâmica e com o aumento do IMC os valores dos picos de pressão começam a aumentar a partir da zona do meio do pé para a frente [88].

Outros estudos corroboram as mesmas conclusões, ou seja, a distribuição e picos de pressão são diferentes estando os sujeitos em posição de pé estática ou em dinâmica. Em estática as pressões e picos são maiores na zona do calcanhar, em caminhada os valores são alterados e as zonas dos metatarsos e dedos, principalmente o *hallux*, passam a ser

mais solicitados e sofrer picos de pressão com valores significativamente mais elevados. Com o aumento de carga, seja porque aumenta o IMC ou porque é adicionada carga externa ao corpo, estes valores são ainda mais agravados [89] [90].

Um outro estudo complementa que para pés adultos normais os valores para as pressões máximas, designadas como picos de pressão, variam entre os 350 kPa e 400 kPa, sendo que para a zona do médio-pé esses valores situam-se entre os 57 e 73 kPa [91].

Seguidamente apresenta-se um exemplo referente à medição da pressão plantar em estática de um indivíduo do sexo feminino com um peso de 64Kg, sem patologias identificadas e realizado numa plataforma *RS Scan*. Observam-se os resultados apresentados na Figura 58. A Figura 59 ilustra as zonas de maior pressão plantar, as zonas críticas que são o calcanhar 1, 2 e 3 e a zona do metatarso particularmente as zonas 8, 9 e 10, seguidas pela zona dos dedos dos pés, mais concretamente a zona 15 e finalmente a zona do médio-pé 4 e 5 também deverão ser levadas em consideração.

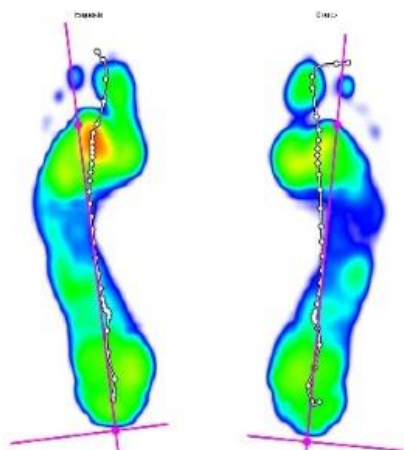


Figura 58 - Análise estática da pressão plantar, cortesia de Gameiros, Material clínico, Lda.



Figura 59 - Localização das zonas de maior pressão plantar, cortesia Gameiros, material clínico, Lda.

A distribuição do peso do indivíduo pelos pés difere para o pé esquerdo e direito e zonas destes. Verifica-se maior força exercida no pé esquerdo, Figura 60 e Figura 61.



Figura 60 - Análise dinâmica da força por impressão de sonda, cortesia Gameiros material clínico, Lda.

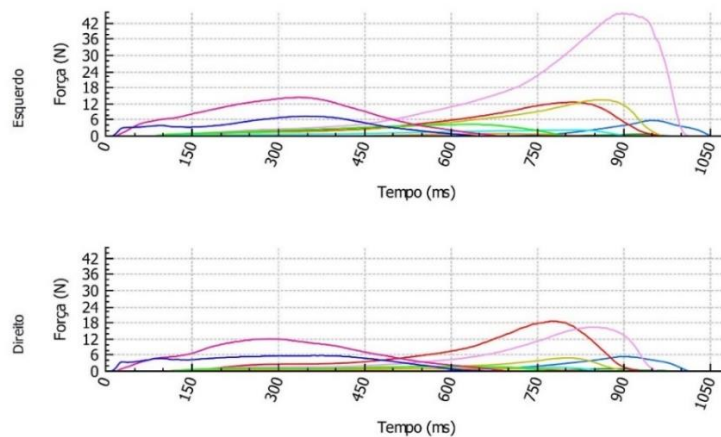


Figura 61 - Gráficos de valores obtidos da análise dinâmica da força por impressão de sonda, cortesia Gameiros material clínico, Lda.

Apresentam-se a seguir os dados obtidos relativos à pressão por impressão de sonda, Figura 62.



Figura 62 - Análise dinâmica da pressão conforme impressão de sonda, cortesia Gameiros, material clínico, Lda.

Assim, as zonas a requerer atenção quando se pretende desenvolver palmilhas ou entressolas com objetivo de reduzir a pressão plantar, tem-se que as zonas do calcanhar e cabeças dos metatarsos são as zonas críticas, as zonas dos dedos nomeadamente o *hallux* têm muita importância e por último a zona do mediopé também deve ser atendida.

3. Conceção e desenvolvimento do projeto

No presente capítulo são abordados, discriminados e especificados os assuntos relacionados com a ideia de projeto, conceção e desenvolvimento do mesmo.

3.1. A ideia e o seu desenvolvimento

A ideia para este projeto vem em resultado da observação e avaliação das necessidades dos consumidores finais dos produtos produzidos pela Jomarpi. Isto significa que o caminho não é o comumente usado, tipo “conceber um produto novo, então vai avaliar-se as necessidades do consumidor”, mas é sim um caminho que segue em virtude de uma constante observação e avaliação das necessidades do consumidor que desemboca numa ideia de proposta de um novo produto.

As necessidades do consumidor

A Jomarpi, no desenvolvimento da sua atividade e aquando do desenvolvimento de produtos, procura uma forte orientação para o mercado. Tal é realizado através de uma colaboração muito estreita com os clientes da empresa que resulta no feedback por parte destes acerca das necessidades e avaliação do consumidor final dos produtos. Por outro lado, a própria empresa realiza um trabalho de pesquisa e observação das tendências de moda no mundo do calçado. As tendências de moda estão associadas a toda a dimensão do produto e das possibilidades que ele pode oferecer e essas vão desde a dimensão estética passando por outras como a segurança, o conforto, a confiabilidade de marca, a simbologia, e, também, cada vez mais uma procura por produtos “amigos do ambiente” onde a sustentabilidade tem um papel preponderante.

A tipologia de produtos fabricados pela empresa insere-se no designado calçado casual. Nesta tipologia há diversas variantes, como por exemplo no inverno, calçado para países nórdicos com especificidades próprias como forros em pele de ovelha, no verão os designados “velas” e *moucassins*, calçado tradicional de conforto com cosido manual específico e claro, o calçado casual desportivo que é presente em verão e inverno. Em todas estas tipologias a importância do conforto assume uma importância incontornável. É neste contexto que surge a ideia de proposta do projeto. O objetivo é poder proporcionar ao mercado uma experiência de conforto adicional no sapato, que passa pela inclusão de

estruturas *lattice* numa entressola e/ou palmilha produzida por fabrico aditivo em material adequado para a função. Apresenta-se na Figura 63 um fluxograma do processo a seguir para atingir este objetivo.

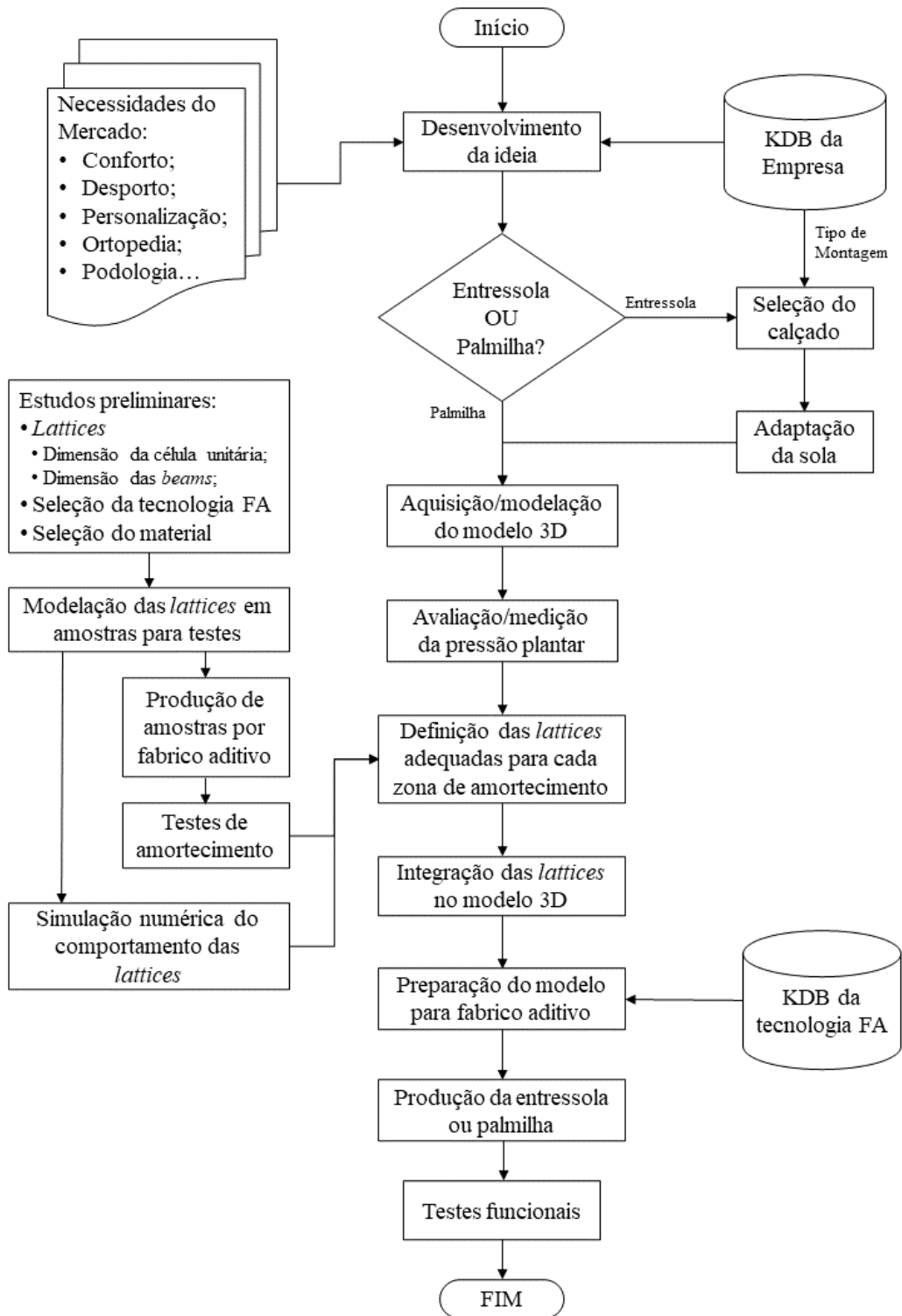


Figura 63 - Fluxograma do processo de desenvolvimento do projeto.

Descrição da ideia: entressola ou palmilha

O conforto do calçado é determinado pelo design e este contempla fatores fundamentais que concorrem concomitantemente, como sejam a forma (molde em plástico, geralmente polietileno de alta densidade, que representa o volume do pé) o solado (parte inferior do calçado em contacto com o solo e que pode ser uma sola única ou constituído por sola e entressola) a palmilha de montagem (peça que faz a ligação entre a parte superior e inferior do calçado) a forma de produção, o desenho e os materiais. A forma e a sola assumem-se como os “pilares” do sapato, são elementos estruturais sobre os quais assenta tudo o resto, são absolutamente dependentes um do outro. São também determinantes para o conforto do sapato, a forma porque representa o volume do pé e a sola porque é o meio que faz a ligação entre o pé e o solo, a Figura 64 apresenta o exemplo de uma forma e a Figura 65 apresenta uma forma e sua sola correspondente.



Figura 64 - Forma: molde em plástico representativo dos volumes do pé.



Figura 65 - Forma e sola, as bases estruturais do sapato.

À sola são exigidas propriedades como flexibilidade, resistência à abrasão e fadiga com vista à sua durabilidade e capacidade de absorção de impacto. Esta última é de extrema importância para o conforto do pé de forma a diminuir o impacto da força do pé no solo reduzindo os efeitos da pressão plantar o que geralmente é dado pela entressola quando esta existe. Contudo, no mercado, geralmente as solas não têm uma entressola. A Figura 66 apresenta o exemplo de uma sola típica, neste caso, dada a altura da sola, o seu interior é desenhado de forma a ter uma estrutura que tem em vista a redução de peso, material e consequentemente de custo. A grande maioria das solas que têm uma determinada altura são feitas desta forma.



Figura 66 - Exemplo sola de caixa.

Entressola

É com base na sola de caixa que surge o conceito: ao invés do interior da sola ser preenchido com a estrutura de reforço, esta poder ser oca e então ser preenchida com uma entressola feita com materiais mais adequados ao amortecimento e produzida por processos também mais eficazes por forma a atingir esse mesmo objetivo. A Figura 67 e Figura 68 representam a ideia.



Figura 67 - Sola de caixa comum e possibilidade de se retirar estrutura interior.

Ao retirar-se o preenchimento característico do interior da sola, fica-se com espaço disponível para se inserir uma entressola. A Figura 68 apresenta hipóteses de entressolas, uma possibilidade produzida por fabrico convencional e uma outra possibilidade produzida com forma de *lattices* por fabrico aditivo.

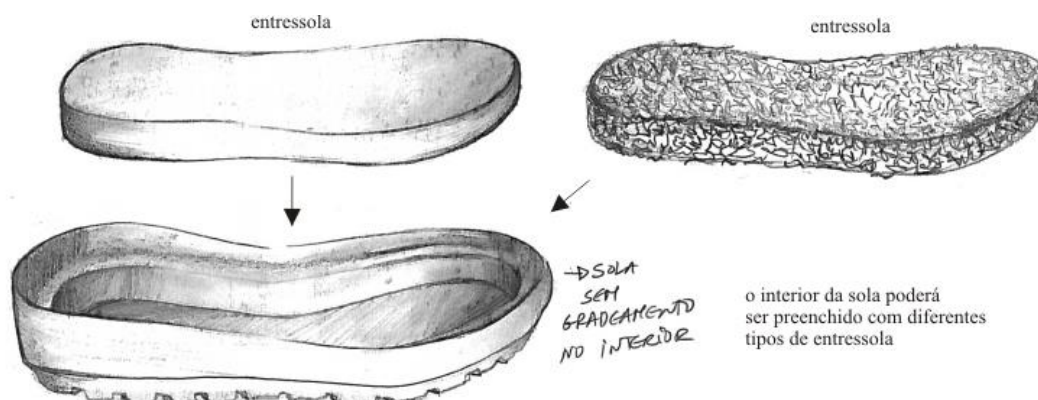


Figura 68 - Desenho ilustrativo das possibilidades de entressola como preenchimento do interior da sola.

O processo inicial de desenvolvimento de um sapato começa com a escolha da sola e forma e o relacionamento destes dois que pode ser feito de duas maneiras. Pode desenvolver-se primeiramente uma forma e depois a sola em função desta, esta solução implica grandes investimentos porque é necessário desenvolver em conjunto com os fabricantes de solas, moldes próprios para a sola e estes são caros, este método usa-se quando a empresa pretende diferenciar o produto pela sola, pela sua exclusividade no mercado e quando tem previsões de venda de grandes quantidades do modelo de forma a amortizar custos. É um dos processos usados pela Jomarpi em determinadas situações, no entanto o mais comum é ir ao mercado dos fabricantes/fornecedores de solas e selecionar as solas adequadas aos produtos que se pretende desenvolver e depois realizar a forma em função da sola. Este método tem vantagens porque não há custos de desenvolvimento de moldes para solas, mas tem como desvantagem o facto de haver outros concorrentes com a mesma sola.

Palmilha/plantar

A palmilha ou plantar também desempenham um papel crucial. Ela é colocada no interior do sapato e é o primeiro objeto no qual o plantar do pé toca, os materiais de que é produzida são extremamente importantes. Geralmente as palmilhas são feitas de espumas variadas que variam entre os 2 e 8 mm de espessura, são posteriormente forradas na parte superior por materiais que podem ser têxteis normais ou com características mais técnicas, ou couro diverso (suíno, caprino, ovino ou bovino). A palmilha é, portanto, um componente que também poderá ser passível de ser fabricado por fabrico aditivo, a possibilidade de ser construída com estruturas *lattices* oferece vantagens para o amortecimento do impacto nas zonas críticas do plantar do pé.

Fatores importantes para a realização do projeto

É sabido que aquando do desenvolvimento de novos produtos, há dois caminhos possíveis, um caminho de alguma novidade sem inovação e um caminho de novidade com inovação. O primeiro não necessita de grandes investimentos, mas corre o risco de ser recebido no mercado como “mais do mesmo” e inclusive ser apagado por produtos concorrentes mais agressivos. O segundo poderá ser mais passível de sucesso no mercado, mas contempla investimentos financeiros consideráveis e alguma incerteza no retorno de capital.

A ideia do projeto assenta na novidade com inovação, mas com uma atenção particular aos custos de desenvolvimento. Aproveitando o facto de a Jomarpi ir ao mercado seleccionar as solas para produzir os produtos casuais desportivos e a grande maioria destas serem de caixa, a ideia de preencher o interior com uma entressola com vista à absorção de impacto afigura-se como uma hipótese viável, inovadora e diferenciadora relativamente a produtos concorrentes no mercado. O facto de usar solas existentes no mercado alterando apenas o molde que faz o interior das mesmas reduz custos de desenvolvimento se comparar com a opção de realizar toda a sola de raiz. Acresce ainda o facto de os formeiros (conjunto de quantidade de formas dos variados tamanhos para realizar produções) se manterem os mesmos não havendo, portanto, custos com nova realização e aquisição dos formeiros. Os custos estarão relacionados com a realização das entressolas que serão feitos em parceria com produtores de solas.

Apresentada a ideia, há que verificar a viabilidade do projeto e os fatores internos da empresa que concorrem para a sua implementação. Dois fatores muito importantes são a orientação para o mercado e a capacidade técnica da empresa.

- A empresa detém uma estrutura comercial e de marketing sólida que obtém informação sobre os aspetos valorizados pelos clientes, sendo confirmado que conforto/estética são essenciais;
- Existe uma boa colaboração e coordenação entre departamento de marketing e departamento de desenvolvimento de produto;
- Existência de uma boa carteira de clientes para os produtos a desenvolver. Nomeadamente clientes que têm na Jomarpi não apenas um parceiro produtor, mas um parceiro no desenvolvimento de novos produtos. Os clientes escolhem a empresa para produzir os seus produtos de segmento mais alto – *premium*.
- A empresa tem *know-how* e mão-de-obra especializada na produção de diferentes tipologias de calçado;
- Tem tecnologia e meios técnicos para produção do sapato (parte superior e montagem)

- Para o desenvolvimento da entressola por FA, dado ser uma tecnologia recente será necessário encontrar um parceiro prestador de serviços ou avaliar uma situação de aquisição de equipamento.

3.2. Conceito de fabricação do tipo de calçado

Caso 1: Entressola

O sapato em geral é dividido em duas partes, a parte superior que acomoda o pé e que costuma ser fabricada de materiais como o couro, têxteis e materiais compósitos e a parte inferior do sapato que é o solado e que pode ser uma sola única de um mesmo material ou constituído por 2 dois elementos, sendo eles a sola (parte em contacto com o solo) e uma entressola (parte que fica entre a parte superior e a sola e que é responsável pelo amortecimento do impacto do pé com o solo durante a caminhada. As solas são produzidas em materiais termoplásticos, elastómeros ou em situações mais artesanais em couro. Neste projeto o enfoque será dado à parte inferior do sapato e, portanto, ao conjunto sola/entressola e palmilha/plantar. No entanto, sendo o sapato tratado como um todo, a parte superior também tem a sua influência aquando da conceção da sola/entressola, afinal a forma escolhida para a sua realização e montagem à sola contribuirão para que as características de conforto da sola sejam efetivas. Assim, o método escolhido, por ser considerado o mais adequado, para o desenvolvimento da parte superior e a sua montagem à parte inferior é o método montagem “strobil”. Este processo está exemplificado na Figura 69.

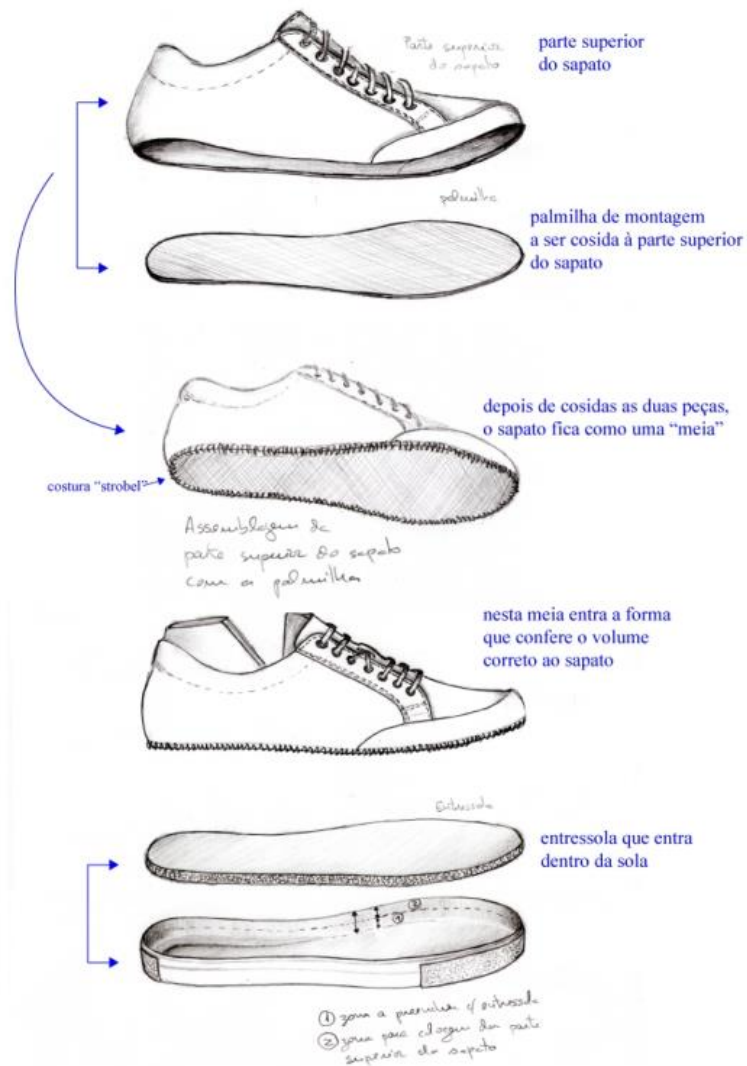


Figura 69 - Ilustração das etapas de produção calçado por montagem strobel.

Depois do sapato produzido a entressola não será visível ao olhar do consumidor final, A Figura 70 mostra um desenho de um sapato no qual a parte inferior do mesmo, constituídas por sola/entressola estão em corte.



Figura 70 - Sola e entressola em corte.

3.3. Seleção da sola e desenho do volume da entressola

A seleção da sola a usar e onde vai caber a entressola, teve como base critérios de cariz comercial de interesse para a Jomarpi que foram conjugados com critérios de índole técnica. Do ponto de vista técnico é imperativo que a sola tenha um design “de caixa”, isto é, que tenha uma estrutura tal no seu interior onde possa ser possível pela sua modificação conter a entressola. Na Figura 71 são apresentadas várias solas passíveis de serem usadas.



Figura 71 - Variedade de solas para seleção.

Estas solas de caixa para além de preencherem requisitos técnicos também vão de encontro a critérios estéticos que preenchem requisitos de interesse comercial, ou seja atualmente a calçado de conforto está ligado o conceito de calçado desportivo casual, também comumente designado de *sneakers*. Ora, as solas apresentadas e já no mercado, algumas delas já testadas e aprovadas do ponto de vista de aceitação comercial, encaixam perfeitamente dentro do que é pretendido. Depois de analisadas e discutidas entre os departamentos de desenvolvimento de produto e de marketing da empresa selecionou-se uma sola que já é usada para fabricação de linhas na Jomarpi, que é unissexo, que tem grande aceitação no mercado e que reúne consenso relativamente à sua continuidade no mesmo. A sola tem a designação de *Korea*. A sola está representada na Figura 72 e na Figura 73 está apresentada com alteração a fazer e com marcação de até onde vai caber a entressola a realizar.



Figura 72 - Sola *Korea* original.



Figura 73 - Sola *Korea* com representação de alterações a efetuar.

Seguidamente foi feito um desenho representativo da planta da entressola a caber na sola no tamanho 37 (escala francesa), Figura 74, e nesta planta foi colocado o esquema representativo da planta do pé, Figura 75.

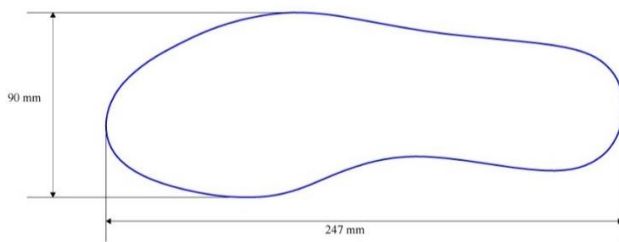


Figura 74 - Desenho da planta da entressola.

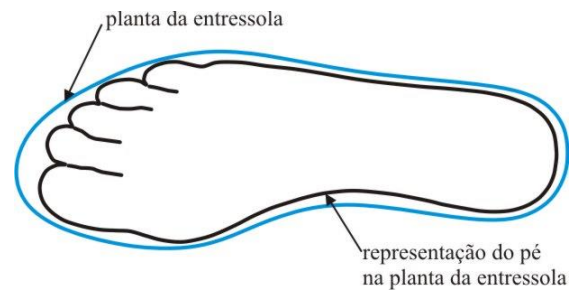


Figura 75 - Representação da planta do pé na planta da entressola.

Com vista a identificar na planta da entressola a distribuição das zonas de maior e menor pressão, foi elaborado um esquema onde foi colocado os resultados relativos ao exemplo anteriormente referido e que diz respeito ao individuo do sexo feminino cujo tamanho calçante é 37 (escala francesa), Figura 76 e Figura 77.

Pé esquerdo

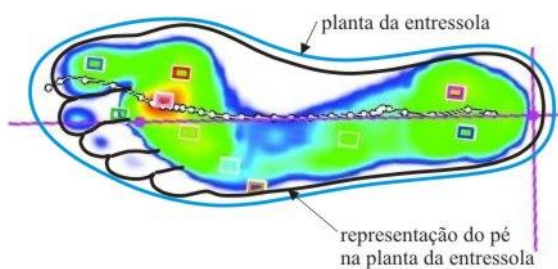


Figura 76 - Distribuição da pressão plantar do pé esquerdo na planta da entressola.

Pé direito



Figura 77 - Distribuição da pressão plantar do pé direito na planta da entressola.

Da recolha dos dados apresentados, é importante definir na planta da sola as zonas críticas e menos críticas, assim, estas foram identificadas e categorizadas como indicado na Figura 78: nível 1 – zonas onde é necessário haver um maior alívio da pressão e que dizem

respeito à zona do calcanhar e metatarsos e zonas de nível 2 – zonas para alívio da pressão plantar moderado e que dizem respeito às zonas do mediopé e dedo grande.

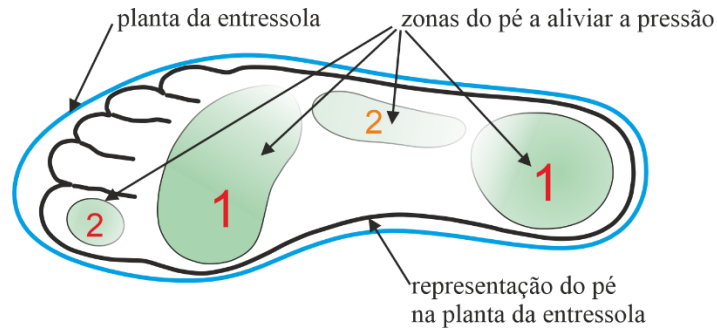


Figura 78 - Categorização das zonas da entressola para alívio da pressão plantar.

Estando definida a planta da entressola e identificadas na mesma as zonas de alívio da pressão plantar, é tempo de definir o volume da mesma. Como esta vai caber na sola *Korea*, foi efetuado um corte para definir o volume e principalmente a altura da entressola, Figura 79 e Figura 80.



Figura 79 - Corte da sola.



Figura 80 - Desenho de corte da sola.

Partindo dos dados da sola, a entressola é definida. Como pode ser verificado pela Figura 81 e Figura 82, é feita uma alteração na sola para que a entressola possa ganhar mais altura na zona do calcanhar.

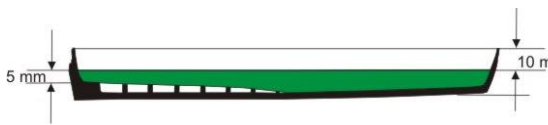


Figura 81 - Corte da sola e posição da entressola.

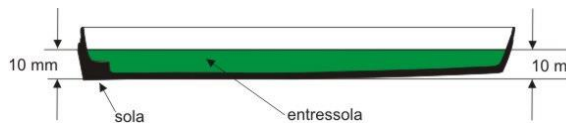


Figura 82 - Corte da sola alterada e entressola definida.

Seguidamente é desenhada a entressola em 3D com planta e volumes definidos para ser produzida por fabrico aditivo, Figura 83.

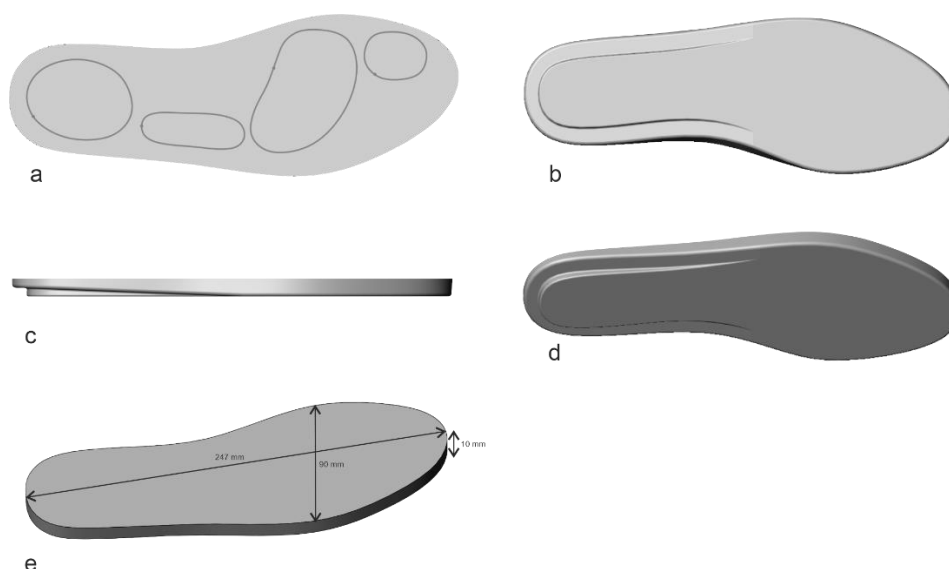


Figura 83 - Desenho 3d da entressola, a) vista de cima com identificação das zonas de alívio da pressão plantar, b) vista de baixo, c) vista lateral, d) vista perspetiva de baixo, e) dimensões principais.

Caso 2: palmilha

No caso de a opção assentar na realização de uma palmilha, Figura 84, todo o processo é mais simples. A forma de fabricação do calçado não terá que ser o processo de montagem *strobil* (ainda que este continue a ser um dos mais adequados para fabricação de calçado de conforto) mas poderão ser todos os outros processos nomeadamente um dos mais recorrentes na empresa que é a fabricação por montagem plana. No caso da palmilha o aspeto mais importante a ter em conta é a forma, ou seja, consoante a espessura da palmilha, a forma terá que possuir um volume tal que contemple o volume da palmilha.

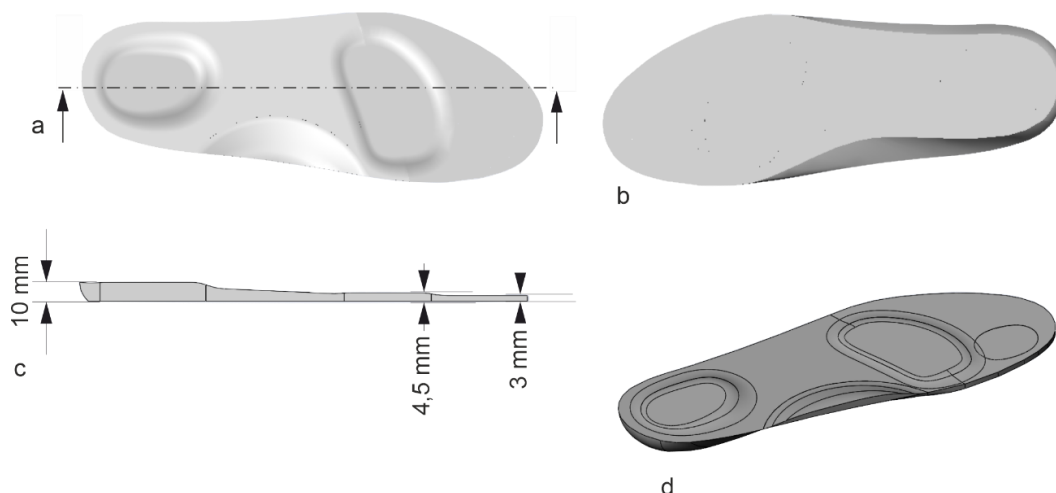


Figura 84 - Vistas da palmilha, a) vista de cima com identificação das zonas críticas, b) vista de baixo, c) corte, d) perspetiva.

Seguidamente apresenta-se uma proposta de sapato casual que tem na sua constituição a a proposta sola/entressola. Um facto importante a salientar nesta opção e que se constitui como uma desvantagem, é o facto de o produto ter dificuldades de comunicação com consumidor, isto porque a entressola não fica visível. Assim, propõe-se que no lateral da sola seja colocada a informação de que no interior existe uma entressola produzida por FA para melhorar o conforto. Este processo poderá ser feito por estampagem ou a laser e é um custo adicional pouco significativo. A Figura 85 apresenta os esboços do sapato proposto em que um deles é representado em corte de forma a se perceber como fica assemblada a parte superior do sapato (pele), a palmilha de montagem (de material fino e flexível), a entressola de estruturas *lattices* que fica dentro da sola.



Figura 85 - Esboços para proposta de sapato com sola/entressola a realizar.

Dos esboços evolui-se para o desenho técnico para que sejam realizados os moldes e ficha técnica de forma produzir o protótipo, Figura 86.

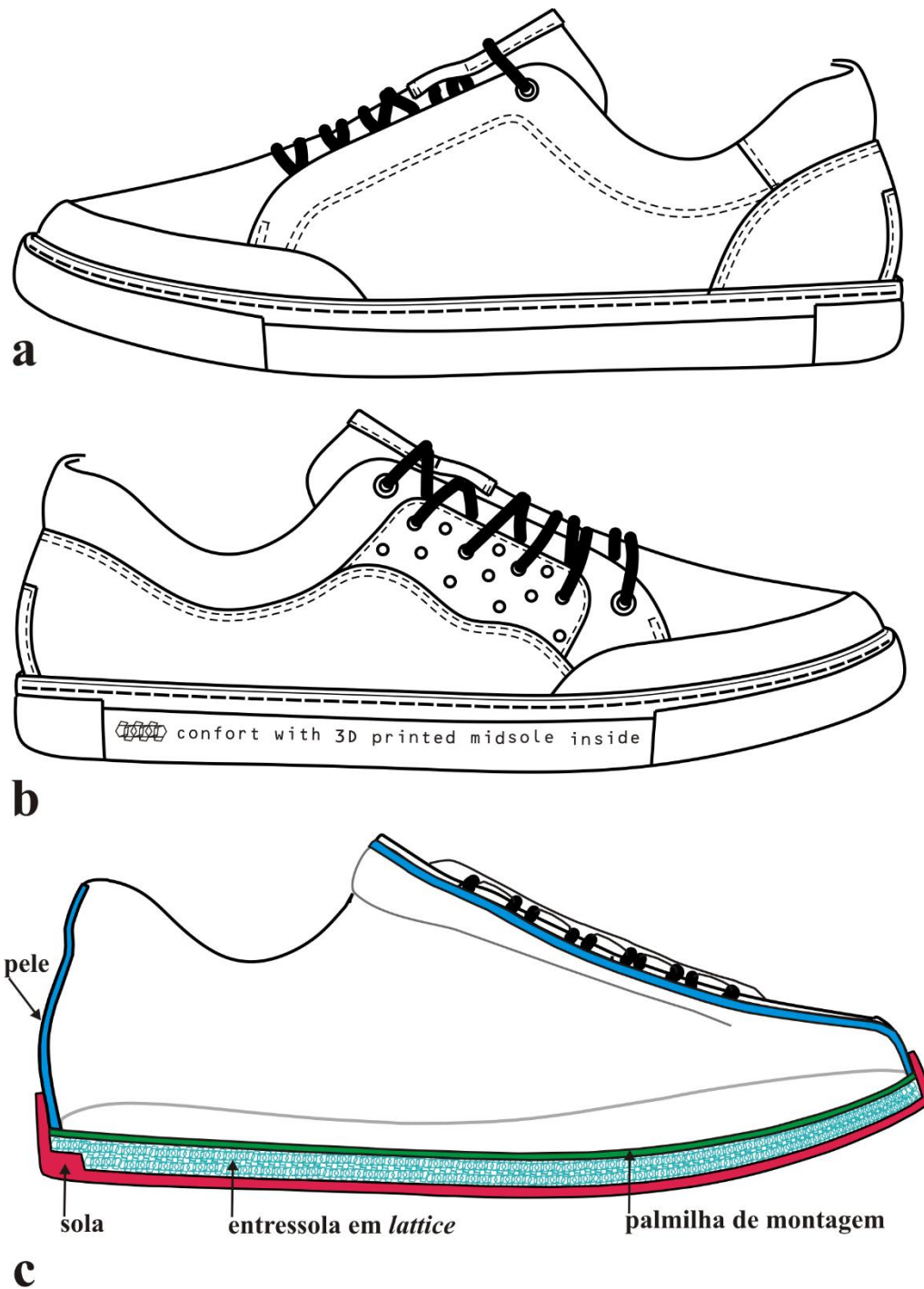


Figura 86 - Desenhos técnicos do modelo proposto. a) vista do sapato, lado interior, b) vista do lado externo do sapato, c) corte.

4. Procedimentos experimentais



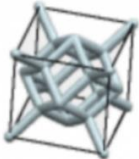
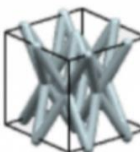
No presente capítulo é feita a exposição dos procedimentos experimentais praticados com vista a auferir a viabilidade técnica e económica da palmilha ou entressola produzida pelo processo de fabricação aditiva.

4.1. Seleção e desenho das estruturas *lattice*. Desenho dos corpos de prova.

Na planta do pé, as zonas onde é necessário que haja um alívio da pressão plantar estão definidas e não estando ainda decidido se o produto a desenvolver é uma entressola ou uma palmilha, os procedimentos experimentais irão permitir que se faça a melhor escolha. Para tal, primeiramente serão selecionadas as estruturas *lattice* que se estima terem melhor desempenho em situações de compressão e conseqüente amortecimento do impacto do pé no solo aquando da situação de caminhada normal. Seguidamente são desenhados corpos prova com as *lattices* e definidas a suas dimensões.

Para a realização do trabalho de desenho digital dos corpos prova e da peça com as estruturas *lattice* é usado o *software* Siemens NX. Neste *software*, no módulo de *Additive manufacturing* existe uma biblioteca onde estão disponíveis vários tipos de estruturas *lattice*. De entre os vários tipos foram selecionados 4 tipos, as estruturas *Hex Vase*, *Hex Vase Mod*, *Dodecahedron* e *Star* Tabela 9.

Tabela 9 - Topologias de *lattices* selecionadas.

<i>Hex Vase</i>	<i>Hex Vase Mod</i>	<i>Dodecahedron</i>	<i>Star</i>
			

A escolha destas estruturas assenta na revisão da literatura. As estruturas *lattice* cujas *beams* são de orientação vertical são mais propensas a maus resultados quando o objetivo é a flexão e compressão [47] [92]. Por outro lado, as estruturas *lattice* podem ser caracterizadas em termos de comportamento, como predominantemente de flexão, ou predominantemente de extensão. Numa unidade celular, relativamente à conectividade das *beams* e segundo o critério de Maxwell em que $M=b-3j-6=0$ (em que b são as *beams* e j

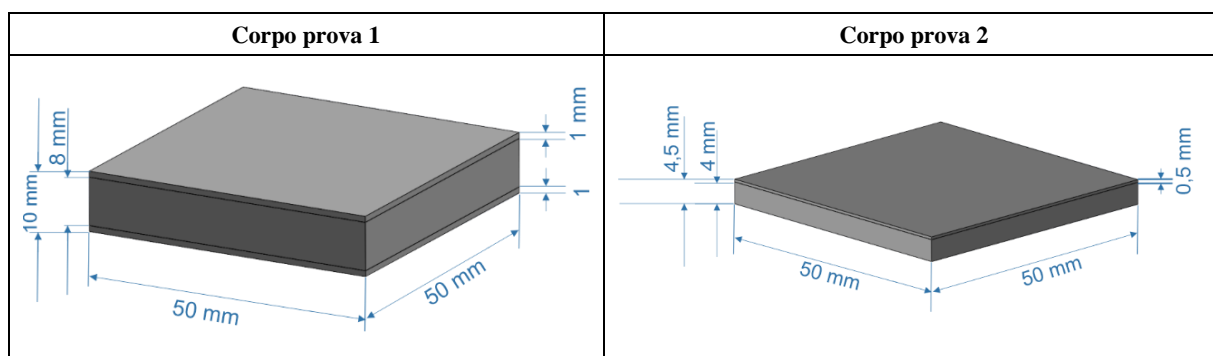
as juntas), para $M < 0$ as arquiteturas das estruturas são consideradas do domínio da flexão, ao passo que para $M \geq 0$ são do domínio da extensão [48]. Assim, para as estruturas *lattice* selecionadas obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Determinação do tipo de comportamento das estruturas *lattice* segundo o critério de Maxwell.

Lattice	$M = b - 3j + 6$	M
Hex Vase	$20 - 3(18) + 6 = -28$	$M < 0$
Hex Vase Mode	$24 - 3(17) + 6 = -21$	$M < 0$
Dodecahedron	$32 - 3(22) + 6 = -28$	$M < 0$
Star	$60 - 3(20) + 6 = 6$	$M > 0$

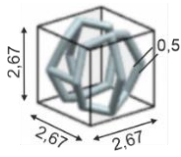

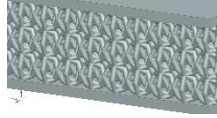
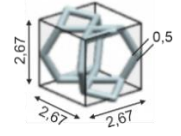
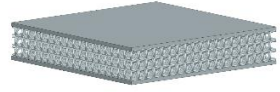
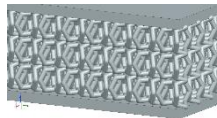
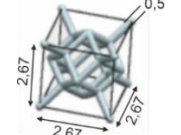
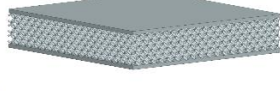
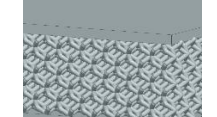
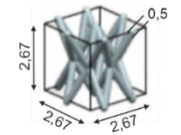
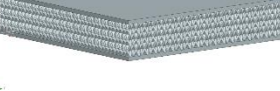
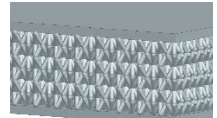
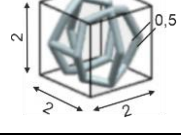
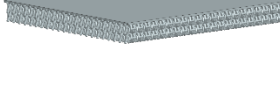
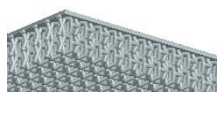
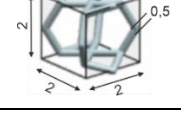


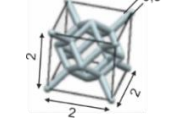
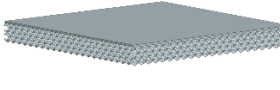
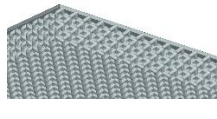
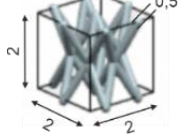
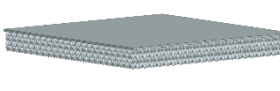
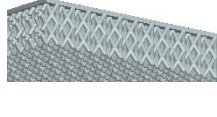
Para aferir e avaliar as propriedades mecânicas das estruturas *lattice* são realizados dois tipos de corpos prova, os dois têm em comum largura e o comprimento que é 50 mm, mas diferem em altura sendo que um tem no total 10 mm de altura e outro 4,5 mm. O facto de ainda não estar decidido fazer-se uma entressola ou uma palmilha justificam a realização dos dois tipos de corpos prova, porque se a opção for a produção de uma palmilha, esta deverá ocupar o menor volume possível no interior do calçado, assim é determinante saber quais as propriedades e o nível de amortecimento para este objeto de menor altura. Os corpos de prova e as suas dimensões são apresentadas na Tabela 11 e foram desenhados no Solidworks.

Tabela 11 - Desenhos dos corpos de prova.



Seguidamente os dois corpos prova são preenchidos com os 4 tipos de estruturas *lattice*, as dimensões destas são diferentes e apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Toplogia e dimensões das *lattices* e a sua distribuição nos corpos de prova desenhadas no *software* Siemens NX.

	Tipo e dimensões da unidade <i>lattice</i>	Corpo prova	Pormenor
Corpo prova 1.1	Hex Vase 		
Corpo prova 1.2	Hex vase mode 		
Corpo prova 1.3	Dodecahedron 		
Corpo prova 1.4	Star 		
Corpo prova 2.1	Hex vase 		
Corpo prova 2.2	Hex vase mode 		
Corpo prova 2.3	Dodecahedron 		
Corpo prova 2.4	Star 		

4.2. Produção dos corpos de prova por fabrico aditivo

Para produzir os corpos prova e subsequentes entressola e/ou palmilha selecionaram-se processos de FA que curam resinas líquidas, ou seja, os processos de fotopolimerização SLA e DLP.

4.2.1. Processo SLA da Formlabs

Inicialmente, foi utilizado o processo SLA da Formlabs através da sua impressora Form 3L. Foram impressos apenas os corpos prova 1, no material *Rebound Resin* da Formlabs. Na Figura 87 apresentam-se as peças fabricadas, estas apresentam muitos defeitos: falta de precisão nas dimensões, empenos, *lattices* muito frágeis e partidas. A principal conclusão que se retira desta primeira experiência é que a dimensão das células unitárias é demasiado pequena, em particular, o diâmetro das *beams*.



Figura 87 - Corpos de prova 1 impressos por SLA em material *Rebound Resin* na impressora Form 3L da Formlabs.

Foi então decidido fazer alterações à dimensão das células unitárias e foi aplicado um fator de escala de 130%. Essa alteração foi efetuada por escalamento direto no software da máquina. Fizeram-se novas impressões pelo mesmo processo na mesma impressora com outro material, o material *Flexible 80A*, também da formlabs A Figura 88 apresenta as peças produzidas. De facto, apesar do aumento da dimensão das *lattices* se ter revelado positiva em termos de resistência, verificou-se uma grande dificuldade no escoamento da resina o que acabou por resultar na junção e colagem das *lattices*, como se pode verificar no pormenor **I**, de facto todas as peças **a**, **b**, **c** e **d** das diferentes *lattices* apresentaram esse defeito.

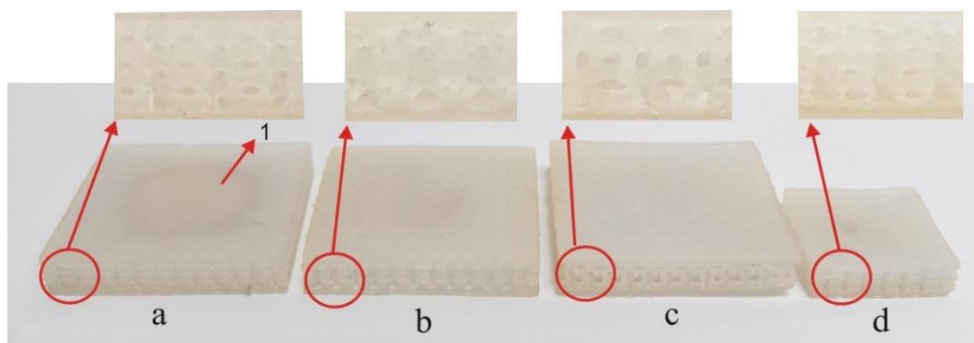


Figura 88 - Corpos prova 1 impressos em material *Flexible 80A* pelo processo SLA da Formlabs.

Os mesmos corpos de prova foram reimpressos pelo mesmo processo e na mesma impressora com o mesmo material. As dificuldades e defeitos foram similares à experiência anterior, como pode ser verificado nas Figura 89 e Figura 90.

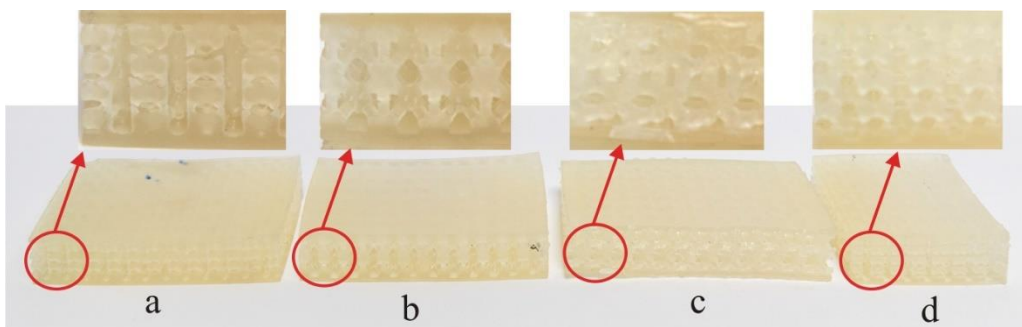


Figura 89 - Corpos prova 1 impressos em material *Flexible 80A* pelo processo SLA da Formlabs.

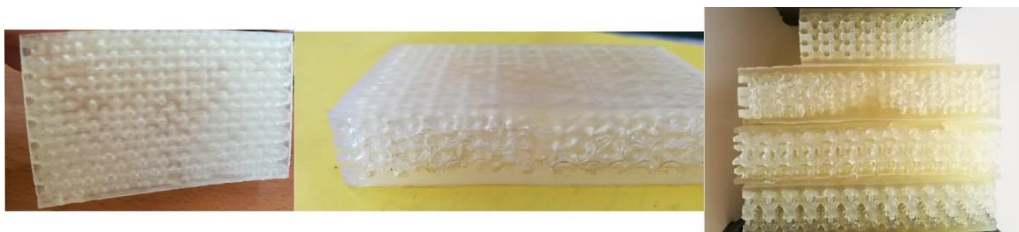


Figura 90 - Vários defeitos nas peças impressas.

Voltou a ser usado o material *Rebound Resin* com melhores resultados em termos de precisão de geometria e cura, Figura 91.

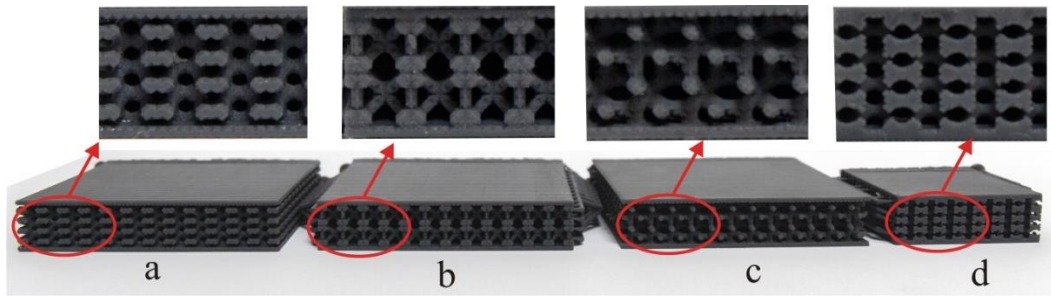


Figura 91 - Impressão dos CP1 em material *Rebound Resin* pelo processo SLA da Formlabs.

4.2.2. Processo Polyjet® da Stratasys

Face aos evidentes problemas verificados anteriormente no que se refere à remoção dos suportes, refizeram-se os corpos prova. Foi retirada a placa de 1mm da base ficando apenas a placa de cima com 2mm e aumentou-se a altura para 20 mm porque era pretendido testar células unitárias maiores em 3 camadas. O novo provete está representado na Figura 92.

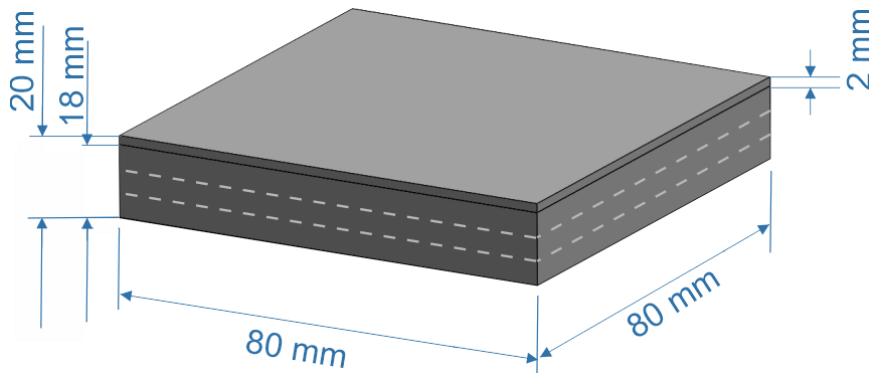
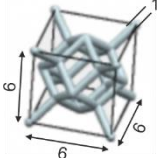

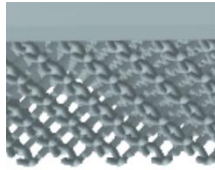
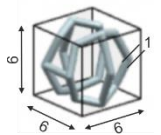
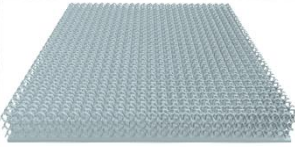
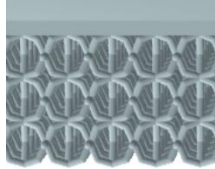
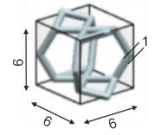

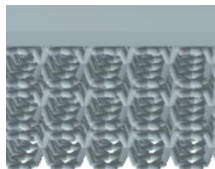


Figura 92 - Desenho 3D do corpo prova para usar na tecnologia Polyjet®.

Reduziu-se a variedade de *lattices* a 3, a *lattice Star* tendo-se revelado demasiado densa e demasiado resistente, foi retirada. Os desenhos dos corpos de prova com os diferentes tipos de *lattices* e suas dimensões estão representadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Topologia, dimensões e distribuição das *lattices* no corpo prova para impressão em Polyjet®.

	Tipo e dimensões (mm) da unidade <i>lattice</i>	Corpo prova	Pormenor
Corpo prova 1	Dodecahedron 		
Corpo prova 2	Hex Vase 		
Corpo prova 3	Hex vase mode 		

Foi testado o processo Polyjet® para a produção dos corpos de prova. A Figura 93 apresenta as peças produzidas, a peça *a* é o corpo prova 1 de estrutura *lattice Dodecahedron* produzida no material *Agilus shore A95*, a peça *b* é o corpo 2 prova de estruturas *lattice Hex Vase* produzida no material *Agilus shore A85* e a peça *c* é o corpo prova 3 de estrutura *lattice Hex Vase Mod*, produzida no material *Agilus shore A70*.

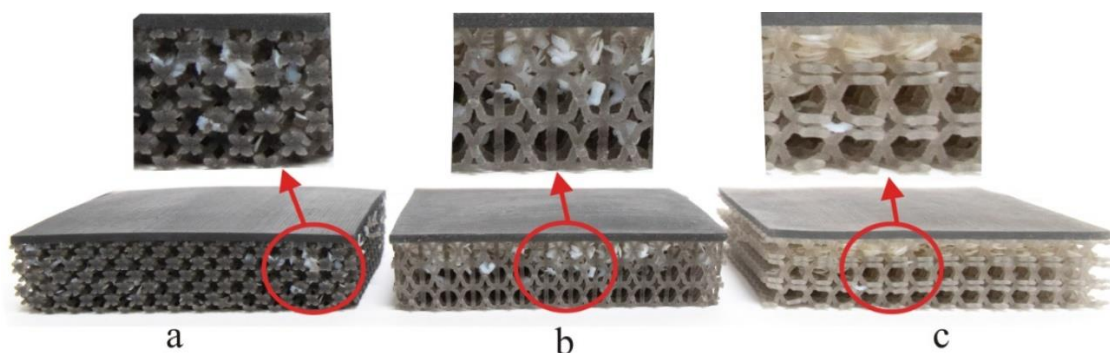


Figura 93 - Peças a, b e c correspondentes aos corpos prova 1, 2 e 3 respetivamente impressos em Polyjet®.

Neste processo são necessárias estruturas de suporte aquando da produção das peças, dadas as reduzidas dimensões das *lattices*, revelou-se extremamente difícil e até mesmo impossível a remoção destas no final da sua produção. Por outro lado, os materiais

também se revelaram demasiado flexíveis e pouco resistentes, principalmente o material do corpo prova *c*. A este fator junta-se que a nova dimensão das *lattices* (6x6x6 e *beams* 1mm) revelou-se demasiado grande e reduzi-la iria complicar ainda mais a remoção das estruturas de suporte. Outros fatores como o elevado tempo de produção e custo de equipamentos foram decisivos para o abandono desta tecnologia.

Na sequência dos testes de produção dos corpos de prova foi observado que:

- *Lattices* demasiado pequenas bem como as suas *beams*, não são suficientemente resistentes e oferecem dificuldades no processo SLA no escoamento da resina líquida e posterior cura no pós-processamento e no processo Polyjet® há uma grande dificuldade na remoção das estruturas de suporte.

Nesta fase foi repensado o tipo de *lattice*, as suas dimensões, o processo de FA a usar e o material. Todos estes fatores estão relacionados entre si e contribuem concomitantemente para o sucesso ou não do material a realizar.

4.2.3. Processo LSPc da Nexa3D

O processo LSPc da Nexa3D é um processo de fotopolimerização de resina líquida baseado no processo DLP de produção contínua e já tem representação em Portugal.

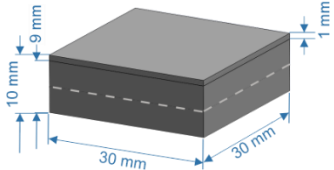
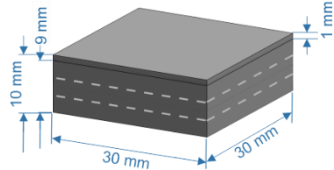
Assim, e tendo presente toda a experiência anterior foi decidido fazer alterações às *lattices* e suas dimensões para experimentar esta nova tecnologia e material usado para a mesma. As principais alterações foram:

- As tipologias de *lattice Dodecahedron* e *Hex Vase* foram abandonadas, a primeira porque é bastante complexa e densa e foi considerada não adequada para ser de dimensões muito reduzidas. A segunda porque é similar à *Hex Vase Mode*, e sendo esta mais aberta, optou-se por esta.

- Foi acrescentada uma nova tipologia, a *Octahedron*, esta foi escolhida por ser bastante aberta, e apesar de ter *beams* ortogonais, que como foi descrito atrás não são muito susceptíveis à flexão, também é bastante diferente das que foram experimentadas anteriormente e apostou-se em aferir o seu comportamento.

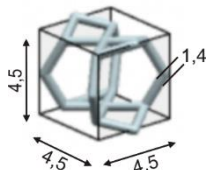
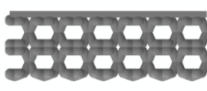
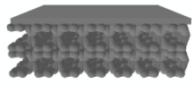
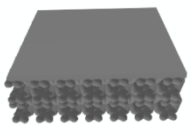
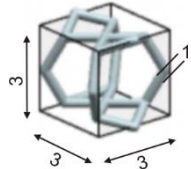
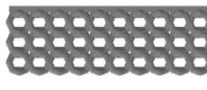

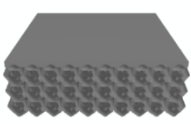
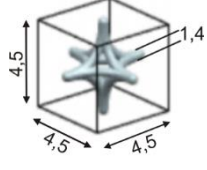
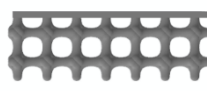
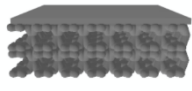
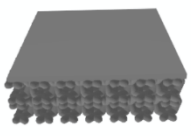
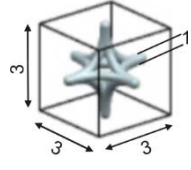
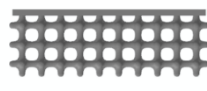
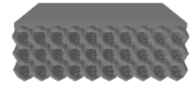
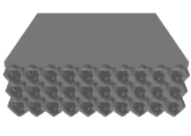
- Desenharam-se novos corpos de prova, manteve-se a altura de 10 mm, mas fizeram-se mais pequenos em largura e comprimento apenas para validar a tecnologia de FA utilizada, o material e as dimensões das *lattices*. Os novos corpos de prova estão representados na Tabela 14.

Tabela 14 - Desenho 3d dos corpos prova para preencher com lattices, 2 e 3 camadas em altura.

Corpo prova para 2 camadas de lattices	Corpo prova para 3 camadas de lattices
	

Os corpos de prova foram preenchidos com as estruturas *lattice* definidas, tal está representado na Tabela - 15.

Tabela - 15 Topologia e dimensão das *lattices* e a sua distribuição nos corpos prova para imprimir no processo LSPc.

	Tipo e dimensões (mm) da unidade <i>lattice</i>	Corpo prova Vista frente	Corpo prova perspectiva	Corpo prova perspectiva
Corpo prova 1	Hex Vase 			
Corpo prova 2	Hex vase 			
Corpo prova 3	Octahedron 			
Corpo prova 4	Octahedron 			

Os corpos de prova foram produzidos na máquina NXE 400 com a resina xFLEX475 um material que é propriedade da Nexa3D que foi desenvolvido em parceria com a Henkel. As características e propriedades do material são apresentados no anexo A, no Anexo B e no Anexo C. Este material foi especialmente desenvolvido para ser usado em situações onde se pretendem propriedades como a resiliência, amortecimento e resistência ao corte. As peças estão representadas na Figura 94.

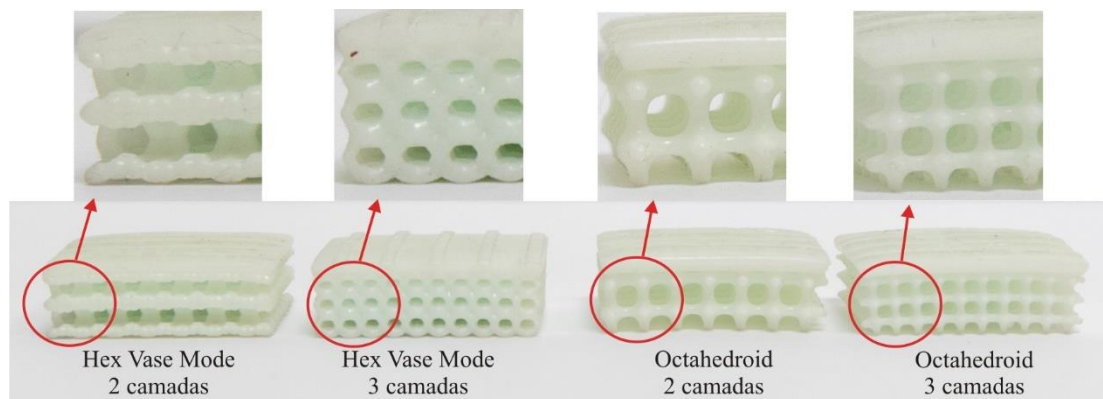


Figura 94 - Corpos prova 1,2, 3 e 4 impressos na tecnologia LSPc em resina xFlex475.

O resultado aparente foi bastante satisfatório, verifica-se uma grande precisão na geometria e bom acabamento final. Foi validada a tecnologia de FA e o material. No entanto, e relativamente às *lattices*, quando estas eram sujeitas a esforço tátil de deformação, verificou-se que a *lattice Octahedroid* deformava demasiado na diagonal pelo que foi descartada. Uma simples simulação de deformação é apresentada na Figura 95.

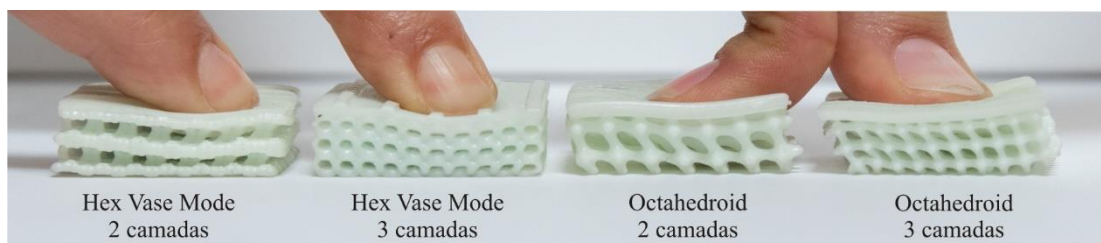


Figura 95 - Compressão das peças para aferir o tipo de deformação.

O comportamento das *lattices Hex Vase Mod*, mostrou-se interessante, pelo que foi decidido optar por apenas este tipo de *lattice* com 3 dimensões de células unitárias diferentes.

Foi desenhada uma nova forma de corpo de prova cilíndrico com 55 mm de diâmetro representado na Figura 96.

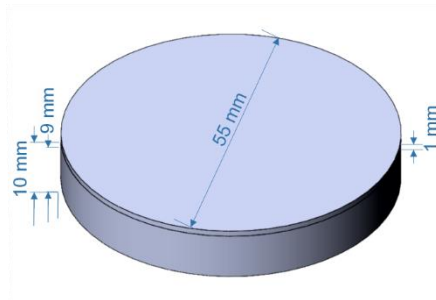


Figura 96 - Desenho 3D de provete para realização de testes de absorção de impacto.

Esta dimensão foi definida tendo como base os testes a que os corpos de prova serão sujeitos no CTCP. Estes testes serão a análise dinâmica das propriedades de absorção do impacto que é realizado, usando o equipamento de teste de absorção de impacto Zipor model EL-44 (Portugal) apresentada na Figura 97 - Máquina de testes de absorção de impacto Zipor model EL-44, Portugal [94] onde o impactor tem um diâmetro de 45 mm, uma massa de 8,5 kg e é largado de uma altura de 50 mm sobre a amostra sendo depois determinada a desaceleração máxima (m/s²) e a percentagem de energia de retorno [93].

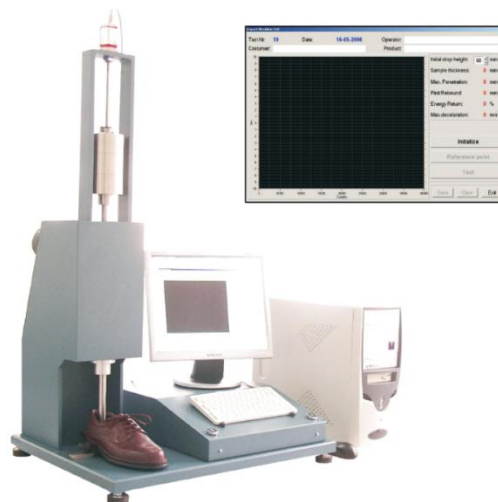
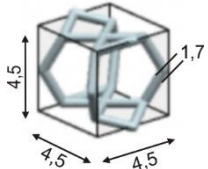
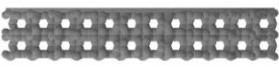
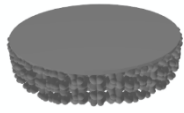
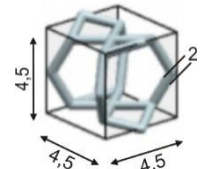
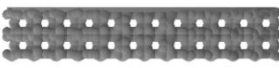
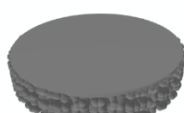
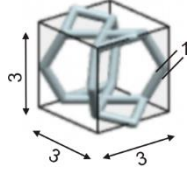
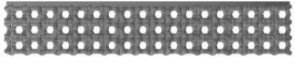
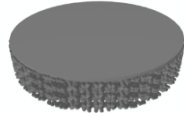


Figura 97 - Máquina de testes de absorção de impacto Zipor model EL-44, Portugal [94].

O tipo de *lattice*, a dimensão das células unitárias e a sua distribuição na geometria dos provetes estão representados da Tabela 16.

Tabela 16 - Topologia e dimensões das *lattices* e a sua distribuição nos corpos de prova a serem impressos por LSPc para realização de testes.

	Tipo e dimensões (mm) da unidade <i>lattice</i>	Corpo de prova Vista frente	Corpo de prova perspetiva
Corpo prova 1	Hex Vase Mode 		
Corpo prova 2	Hex vase Mode 		
Corpo prova 3	Hex Vase Mode 		

Processo de impressão dos corpos prova

O processo tem início com a importação das peças para o programa de *slicer* (fatiamento) para definir os parâmetros de impressão, o programa usado é o *Magics*. Nesta fase de pré-impressão é definido se são necessárias estruturas de suporte, estas podem ser geradas automaticamente ou manualmente, é definido o *slice*, que é a altura das camadas e consequentemente o número delas, e o *wait time* que é o tempo de espera entre camadas.

Começou então por se gerar os suportes automaticamente, o *slicer* indicou que eram mínimos, optou-se então por imprimir sem quaisquer suportes. A Figura 98 mostra uma imagem de uma peça no software de *slicer* da máquina NXE 400.

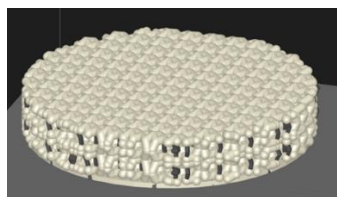


Figura 98 - Peça a ser preparada no *slicer* para impressão.

Foram utilizadas as definições predefinidas pelo fabricante para a resina xFLEX475, cuja ficha técnica se encontra no Anexo A. A Figura 99 apresenta as definições para o trabalho de impressão.

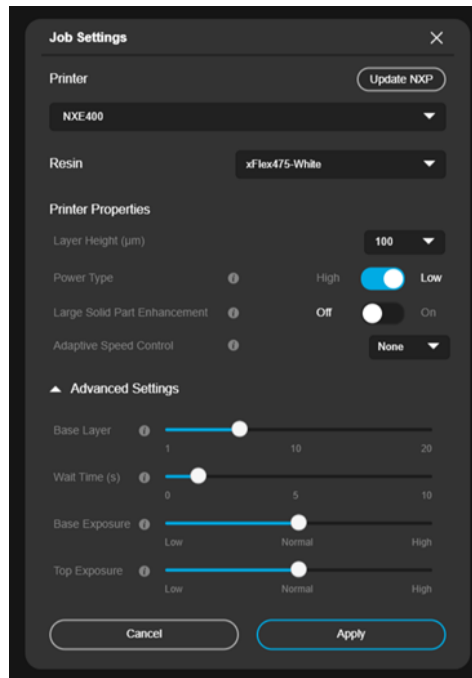


Figura 99 - Definições do trabalho de impressão para os corpos de prova.

Procedeu-se à impressão, mas sem sucesso porque as peças descolaram da plataforma de construção. Fez-se um 2º *slice* com novas definições de trabalho em que se alterou o *wait time* para 2 segundos, o *Wait-time* faz com que a máquina espere mais tempo entre camadas permitindo assim reduzir a força entre a peça e a membrana. Desta vez, as peças não descolaram da plataforma, mas ficaram com aberturas horizontais, pelo que se fez um 3º *slice* aumentando o *wait time* para 4 segundos, Figura 100. As peças saíram completas e procedeu-se à impressão de todos os corpos de prova.



Figura 100 - 2º *Slice* com alteração do *wait time* para 4 segundos.

As impressões foram feitas por três vezes, cada uma com os 5 exemplares de cada tipo de corpo de prova. A Figura 101 apresenta a disposição das peças na plataforma de

construção, a quantidade de material gasto, o número de camadas e o tempo de construção foi de 37 minutos.

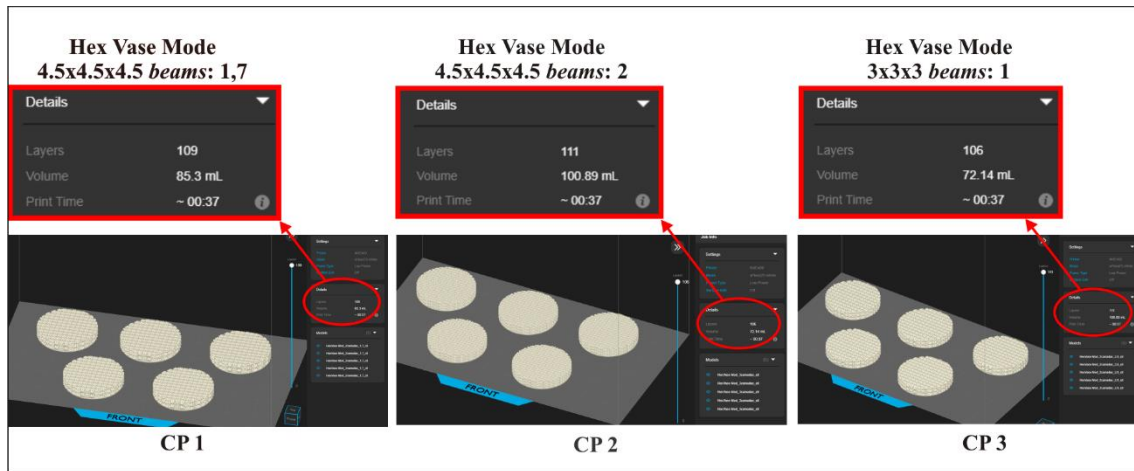


Figura 101 - Imagem dos corpos de prova preparados para impressão

Foram então impressos os três modelos. Não ocorreram grandes problemas durante a impressão, mas foi necessário repetir alguns modelos devido a pequenas falhas durante a impressão em cada 7.5 peças foi reimpressa 1, e, devido ao acabamento em cada 5 foi reimpressa 1. As peças fixaram-se muito bem à plataforma de construção, ao removê-las foi necessário ter cuidado para não se danificar a base.

Os corpos de prova foram impressos na impressora NXE 400 cujas características podem ser consultadas no Anexo D, com a resina xFLEX475, Figura 102.



Figura 102 - Corpos de prova impressos pela tecnologia LSPc na impressora NXE 400 da Nexa 3D.

Foram obtidos os 5 exemplares de cada um dos diferentes corpos de prova para execução dos testes, Figura 103.

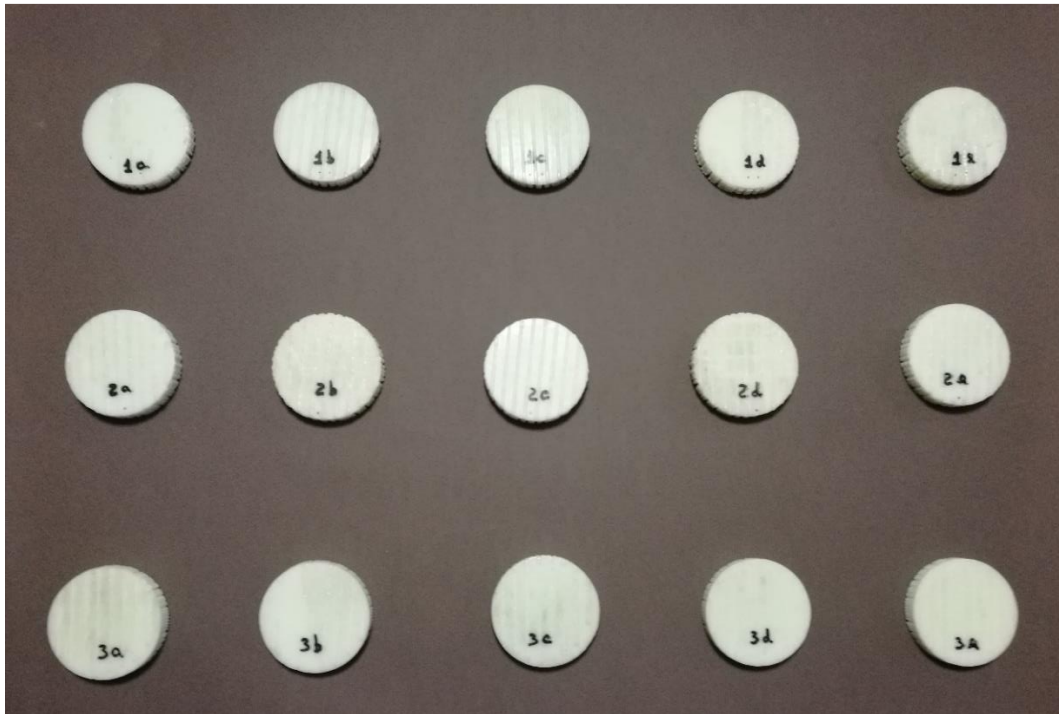


Figura 103 - Os 5 exemplares de cada um dos corpos de prova.

Pós-impressão

Após a impressão foi necessário limpar o excesso de resina não curada, e proceder à cura final das peças. De forma a garantir as características especificadas é necessário cumprir o *workflow* de pós-impressão validado pelo fabricante que se encontra na ficha técnica no Anexo A e que consiste em realizar as etapas apresentadas na Figura 104.

Validated Workflow

Exposure Parameters	NexaX default
Primary Wash	1min, xClean detergent in xWash station
Secondary Wash	2min, Isopropyl Alcohol
Dry	30min air dry
Inhibition	Spray with Mold Release
Cure	60min total cure time in xCure. Cure submersed in water using borosilicate glass container. Place container on floor of xCure. Flip part half-way through to ensure uniform exposure.
Inhibitor Rinse	Dip in IPA to remove mold release, drip dry

Figura 104 - *Workflow* para pós-impressão das peças.

A lavagem e cura das peças foi realizada nas máquinas xWash e xCure respetivamente, as duas máquinas e suas especificações encontram-se no Anexo F e Anexo G.

Seguidamente os corpos prova vão ser sujeitos a testes mecânicos para verificar a sua capacidade de amortecimento.

4.3. Testes Experimentais

Os testes de amortecimento foram realizados no CTCP, recorrendo ao equipamento Pegasil EL-44 (Anexo E) que opera de acordo com a norma ASTM F1614-99 (2006). A metodologia de ensaio prevista nesta norma abrange a medição de características de atenuação de choque e de relações força-deslocamento de sistemas de materiais utilizados na entressola de calçado desportivo para utilização em movimentos normais de corrida. O equipamento EL-44 utiliza apenas o procedimento A – máquinas de impacto de peso descendente, de entre um total de 3 procedimentos previstos na ASTM F1614-99 (2006).

O procedimento A é baseado no uso de um impactor, com uma massa de 8,5 kg, que cai de uma altura de 50 mm sobre o corpo de prova a ensair, que deverá ser rigidamente suportado. Este método de ensaio impõe um impulso para gerar um ciclo de histerese de deslocamento vs. força de compressão e avalia as características de atenuação de choque da amostra. A energia máxima aplicada ao corpo de prova ocorre no pico da deformação.

O impactor adotado para os ensaios foi um impactor convexo, com diâmetro de 45mm e raio de de 37,5mm.

O procedimento de ensaio adotado para cada amostra, segue a sequência a seguir descrita:

1. Obter o zero do impactor, fazendo-o tocar na base de ensaio do equipamento;
2. Obter a altura do corpo de prova, fazendo-o tocar na sua superfície do topo;
3. Colocar o impactor na altura de queda;
4. Realização do ensaio por queda do impactor (aquisição do deslocamento do impactor);
5. Leitura dos resultados do ensaio.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados surgem apresentados graficamente, ilustrando o deslocamento do impactor, nomeadamente, o deslocamento descendente na queda a partir da altura inicial, o deslocamento ascendente correspondente à recuperação elástica do material somado com o impulso vertical do impactor (1º salto). Seguem-se,

tipicamente, novos ciclos, onde ocorre um movimento descendente seguido de outro movimento ascendente, que se vão atenuando até que a energia potencial do impactor se anule. A Figura 105 apresenta o resultado do ensaio da amostra CP1-1b, onde é possível constatar que, na sequência dos movimentos descendentes, ocorre penetração do impactor na amostra, cuja altura é representada pela linha vermelha.

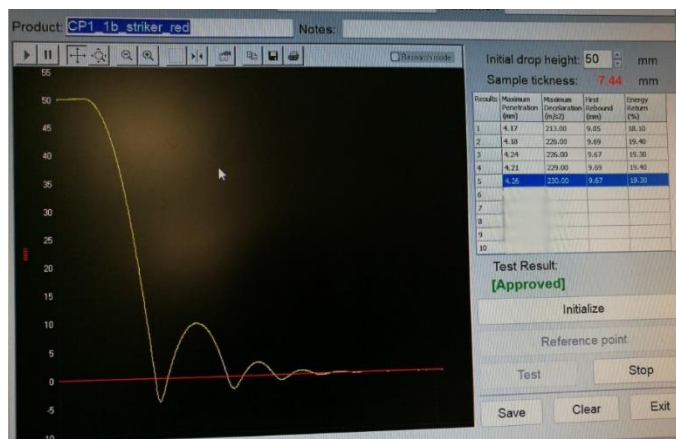


Figura 105 - Ensaio da amostra CP1 – 1b.

Os resultados dos ensaios, obtidos a partir do equipamento EL-44 são apresentados na Tabela 17, onde constam os valores obtidos por cada corpo de prova e os valores médios para cada tipo de *lattice*.

Tabela 17 - Resultados obtidos dos testes experimentais.

Amostra	Penetração máxima [mm]	Desaceleração máxima [m/s ²]	Primeiro salto [mm]	Retorno de energia [%]
CP1a	4,16	235	9,46	18,9
CP1b	4,26	230	9,67	19,3
CP1c	4,23	237	9,23	18,5
CP1d	4,09	229	8,74	17,5
CP1e	4,94	208	12,4	24,8
CP2a	5,04	198	13,0	25,9
CP2b	4,20	225	9,54	19,1
CP2c	5,18	194	13,6	27,2
CP2d	4,32	221	10,1	20,2
CP2e	4,91	198	12,6	25,2
CP3a	4,91	215	11,6	23,2
CP3b	4,71	211	11,4	22,8
CP3c	4,67	218	10,8	21,6
CP3d	4,65	205	12,0	23,9
CP3e	4,31	238	8,51	17,0

5. Análise e discussão dos resultados

5.1. Viabilidade técnica

Verifica-se alguma heterogeneidade nos resultados dentro de cada tipo de *lattice*, contudo, é possível observar algumas tendências entre os três tipos de *lattice* que poderão ser destacadas mediante uma análise adicional dos parâmetros obtidos.

O primeiro destes parâmetros adicionais pode ser a deformação média, expressa em percentagem e calculada conforme a Equação 1.

$$Deform_{m\u00e9dia} = \frac{(H_{inicial} - Penetra\u00e7\u00e3o)}{H_{inicial}} \times 100 \quad (1)$$

onde $H_{inicial}$ é a altura de queda (50mm) e $Penetra\u00e7\u00e3o$ é o valor m\u00e1ximo atingido pelo impactor abaixo da superf\u00edcie do corpo de prova.

Outro par\u00e2metro adicional que seja representativo do comportamento do corpo de prova quando sujeito ao ensaio \u00e9 a recupera\u00e7\u00e3o m\u00e9dia do 1\u00b0 salto. Este par\u00e2metro, por seu turno, relaciona a deformação sofrida pelo corpo de prova, com a recupera\u00e7\u00e3o el\u00e1stica do material e o impulso vertical do impactor, tamb\u00e9m expressa em percentagem (Equação 2).

$$Recup_{1^{\circ} salto} = \frac{(Penetra\u00e7\u00e3o + 1^{\circ} salto)}{H_{inicial}} \times 100 \quad (2)$$

onde $1^{\circ} salto$ \u00e9 a altura m\u00e1xima atingida pelo impactor ap\u00f3s a queda inicial.

A Tabela 18 - Deformação média e recuperação média do 1\u00b0 salto resume as m\u00e9dias e o correspondente desvio-padr\u00e3o da deformação média e da recupera\u00e7\u00e3o média do 1\u00b0 salto para cada tipo de amostra.

Tabela 18 - Deformação média e recuperação média do 1\u00b0 salto.

Amostras	Deformação [%]	Recuperação 1\u00b0 salto [%]
CP1	43,01%	86,52%
CP2	46,44%	85,98%
CP3	40,64%	97,25%

A análise dos parâmetros adicionais revela claramente que o grupo de amostras CP3 apresenta a menor capacidade de amortecimento, resultante de um valor de deformação mais baixo. Por outro lado, o grupo de amostras CP2 apresenta os valores mais elevados de deformação, tornando-se especialmente apto para zonas plantares onde a carga seja mais elevada.

No que concerne à recuperação média do 1º salto, este parâmetro tem em especial consideração a altura do 1º salto, denotando uma maior rigidez. O valor mais elevado ocorre no grupo de amostras CP3, o que é coerente com a menor capacidade de amortecimento já previamente detetada. O aspecto mais curioso surge agora entre os grupos de amostras CP1 e CP2 que, não obstante terem deformações médias distintas, apresentam recuperação média do 1º salto similares. A Figura 106 apresenta os valores da deformação média e da recuperação média do 1º salto com os respetivos desvios-padrão.

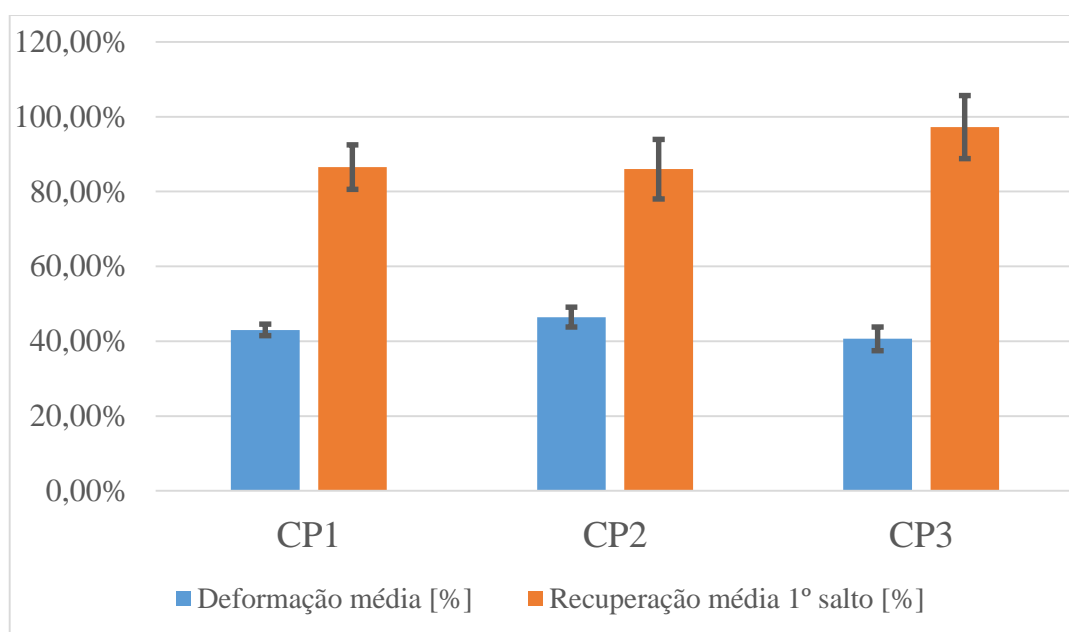


Figura 106 - Deformação média e recuperação média do 1º salto.

Com base nos resultados obtidos, é possível atribuir o tipo de *lattice* mais adequado para as diversas zonas de amortecimento de uma entressola, mediante a pressão plantar de um adulto normal. A Figura 107 apresenta as zonas do pé mais solicitadas (1) e as zonas (2) que, apesar de menos solicitadas, carecem de amortecimento para um maior conforto do utilizador. Inclui ainda a atribuição dos tipos de *lattice* a adotar em cada zona. A Figura 108 apresenta a entressola com a atribuição de cada tipo *lattice* a cada zona.

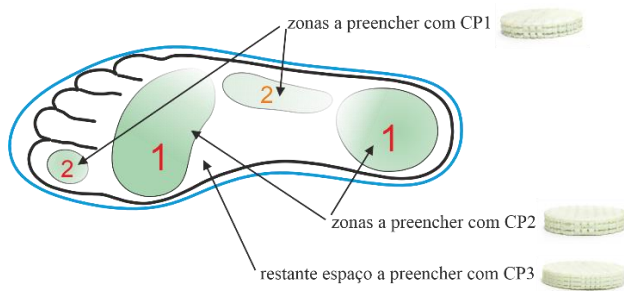


Figura 107 - Atribuição do tipo de *lattice* a cada zona do pé.

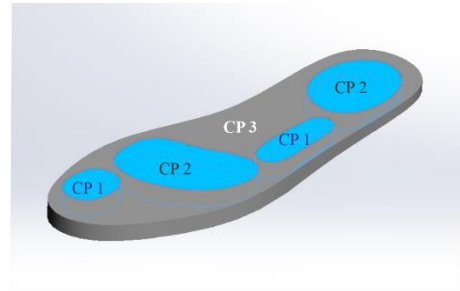


Figura 108 - Atribuição do tipo de *lattice* a cada zona da entressola.

A entressola é preenchida com as *lattices* no software Siemens NX, Figura 109.

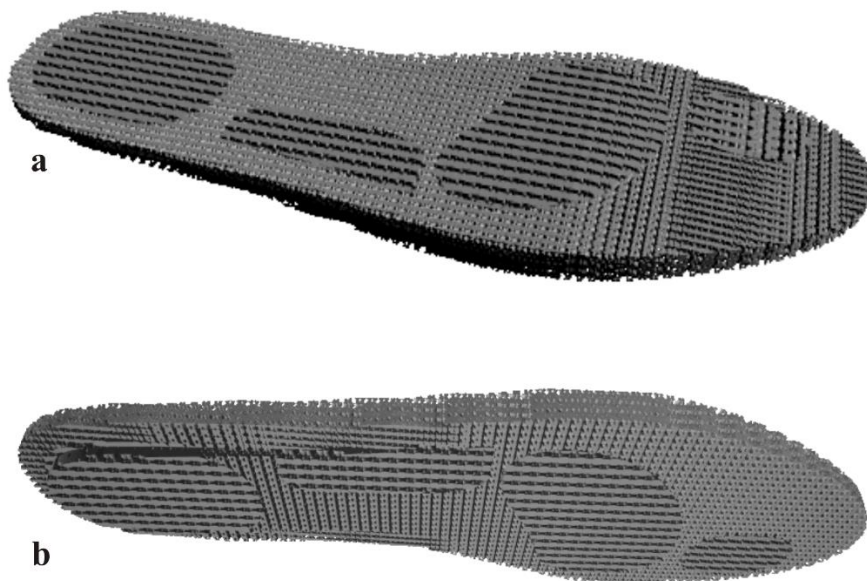


Figura 109 - Desenho 3D da entressola com as *lattices*, a) vista perspetiva de cima, b) vista perspetiva de baixo.

A entressola é impressa ao alto na câmara, tal como é apresentado no *licer* na Figura 110 e na foto da sola acabada de ser impressa na Figura 111.

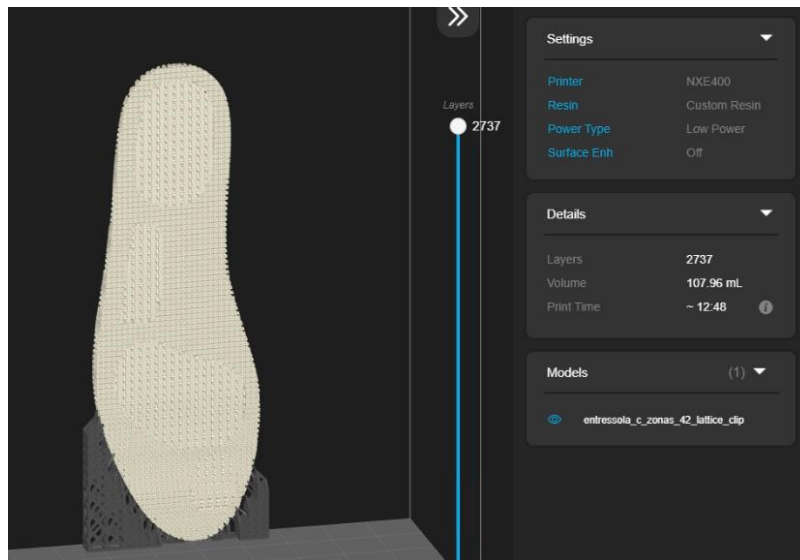


Figura 110 - imagem do *slicer* da disposição da sola na câmara de construção.



Figura 111 - A entressola a ser impressa na máquina NXE 400.

Depois de impressa e feito o pós-processamento, obtem-se a entressola. Esta apresenta uma boa qualidade de impressão com a geometria das *lattices* muito bem definida e um bom acabamento final, como se pode verificar na Figura 112.

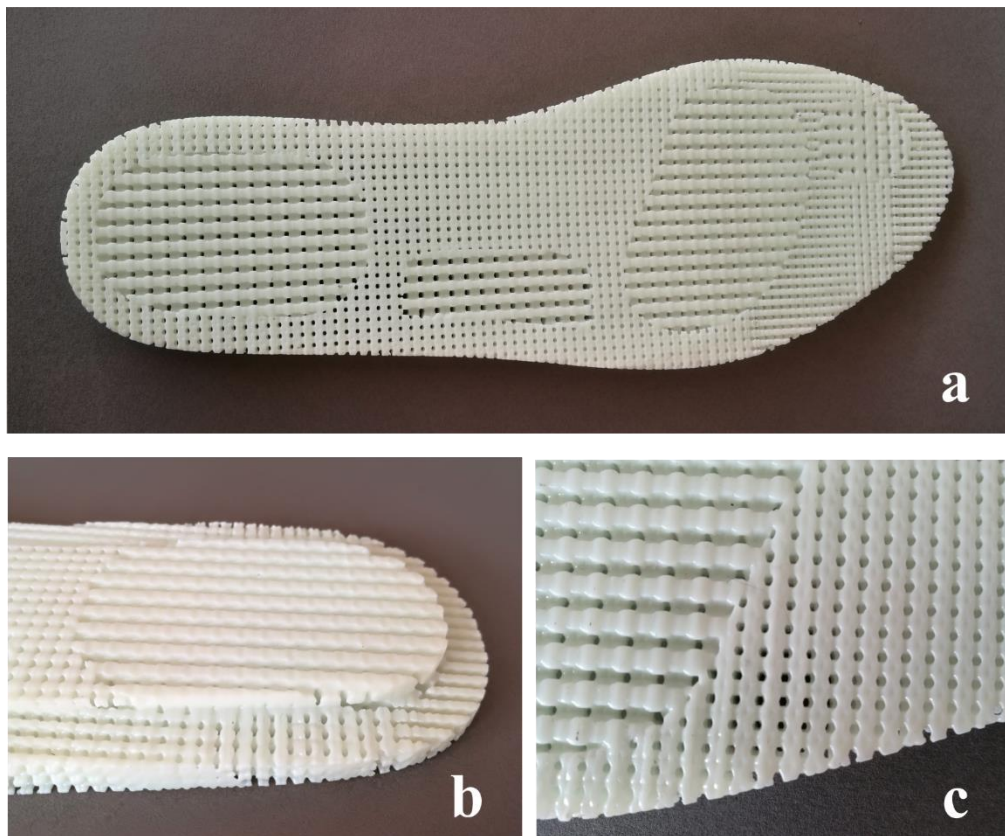


Figura 112 - Entressola impressa, a) vista de cima, b) pormenor da parte de baixo zona do calcanhar, c) pormenor *lattices*.

A entressola está pronta para ser utilizada para a construção de um sapato, tal como tinha sido projetado. A Figura 113 apresenta um protótipo da parte superior de um sapato e da entressola que vai encaixar no interior da sola de caixa.



Figura 113 - Parte superior do sapato, entressola e sola.

No entanto, ao efetuar uma experiência tátil nas variadas zonas da entressola, realizando alguma compressão, verifica-se que algo não está de acordo com as expectativas relativamente à disposição dos diversos tipos de *lattices* nas diferentes zonas da entressola. Verifica-se que o geral da entressola é a parte mais macia ao invés das zonas do calcanhar e cabeças dos metatarsos. Este aspeto torna-se pertinente de investigar. Foi efetuada uma comparação de experiência tátil com estas *lattices* do geral da entressola e os corpos de prova que a ela deram origem, os CP3. Verifica-se que os corpos de prova estão bem mais rígidos. No sentido de tentar descobrir o que possa ter acontecido, são efetuados cortes nos corpos de prova 2 e 3, tal como é apresentado na Figura 114.

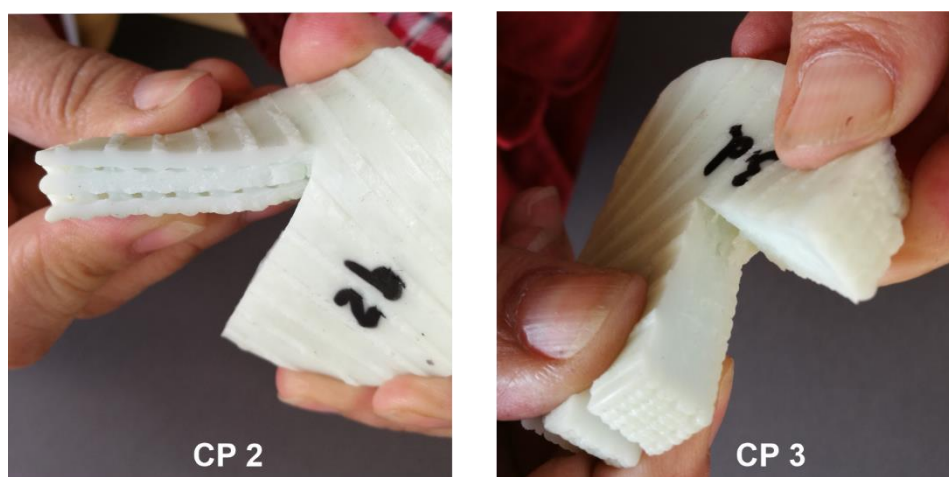


Figura 114 - Corte dos CP2 e CP3.

Pela observação dos cortes, conclui-se que os CP3, que tinham as *lattices* de dimensão mais reduzida (3x3x3mm e *beams* 1mm) ficou praticamente sem porosidade, provavelmente devido ao facto de a resina não conseguir escoar de dentro das *lattices* devido ao seu reduzido tamanho, agravado pela parede superior que os CP tinham e não existiu na entressola (visto que funcionalmente não era necessária tendo sido decidido retirá-la pois retirava material e consequentemente peso à peça). No CP2, cujo tamanho das *lattices* é maior, verifica-se a existência de porosidade e até da flexibilidade e amortecimento da peça. Este defeito dos CP3, que os tornou praticamente sólidos, fez com que os resultados dos testes os caracterizassem como sendo os mais rígidos. A partir

daqui a distribuição das tipologias de *lattices* pelas diversas zonas da entressola foi condicionada pela interpretação dos resultados iniciais.

Assim, seria necessário repetir o processo, ou seja, repetir a produção dos corpos de prova desta vez sem a parede superior de 1mm, voltar a testá-los, e com base nos novos resultados fazer uma nova redistribuição das diferentes tipologias de *lattices* pelas zonas da entressola. Por outro lado, uma nova redistribuição das *lattices* irá tornar a sola mais porosa no geral o que significa um menor consumo de material e uma maior leveza da entressola, fator este também muito importante. Um menor consumo de material também baixará os custos de produção como se verá a seguir.

5.2. Viabilidade económica

O erro de interpretação ocorrido e devidamente assinalado, não põe em causa a análise da viabilidade económica. Foi efectuado um cálculo para obter o custo total do par de entressolas. Esse custo foi baseado num par de tamanho 42, a Figura 115 apresenta a disposição desse par na câmara com o respetivo consumo de material, tempo de impressão e número de *layers*.

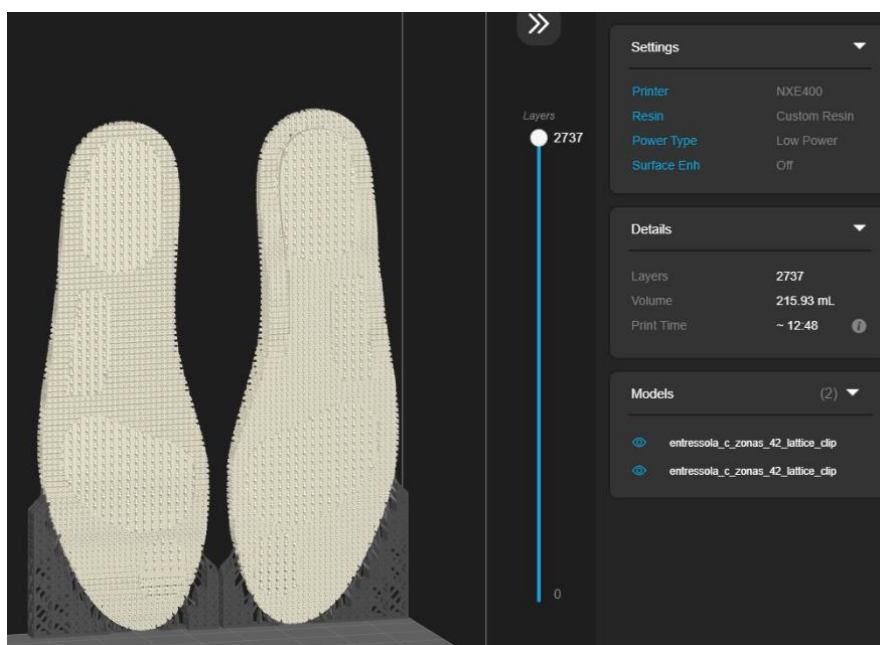


Figura 115 - Disposição de um par nº 42 na câmara de construção.

Foi efetuada uma simulação com o tamanho 37 e com o tamanho 42 para verificar quantos pares se conseguem construir numa *build*. Verificou-se que para o tamanho 37

conseguem-se construir 15 pares e para o tamanho 42 fabricam-se 13 pares, tal é apresentado nas Figura 116 e Figura 117.

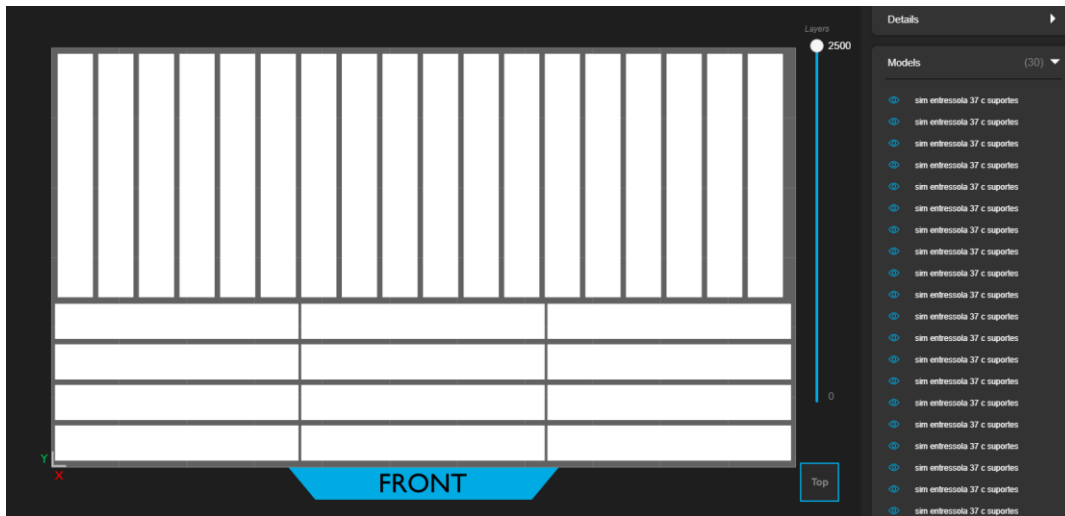


Figura 116 - Simulação *build* completa para tamanho 37.

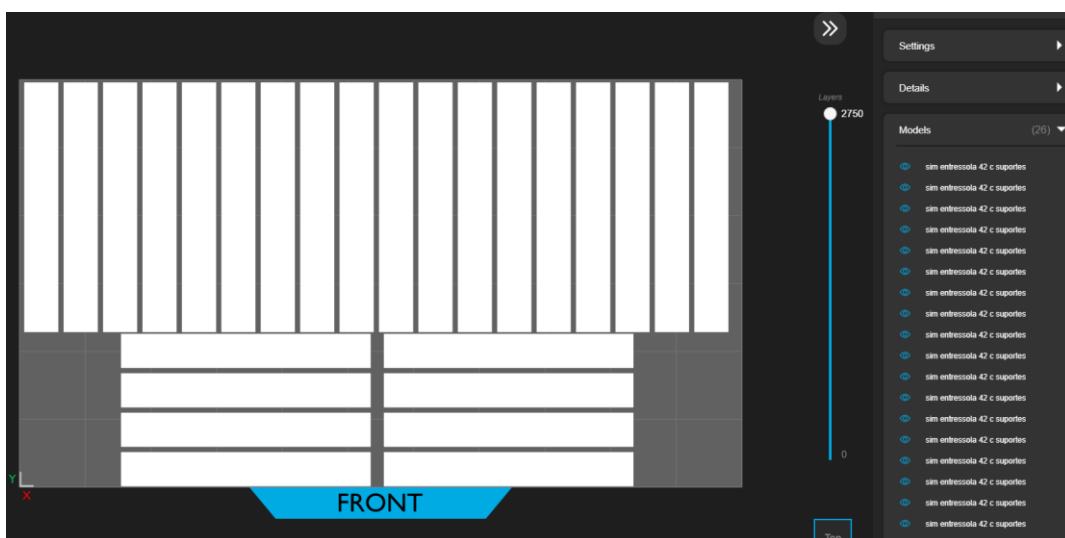


Figura 117 - Simulação *build* completa para tamanho 42.

Assim, com base nestes dados do processo de produção e noutros, foi feita uma construção de custos que se apresenta sucintamente na Tabela 19.

Tabela 19 - Construção de custos com base na simulação de uma *build* com entressolas n° 42.

Custo/h preparação da construção	15,00€	
Tempo preparação da construção	1 h	
Custo total preparação da construção	15,00€	
Custo hora-máquina NEXA NXE400	18,74€	Inclui consumo energético manutenção, etc
Tempo consumido na construção [min]	720 minutos	
Custo operação máquina	224,92€	
Custo de consumíveis p/construção/h	3,75€	
Custo total operação máquina	228,67€	
Custo/kg resina xFLEX 475	270,00€/kg	
Quantidade de resina consumida [kg]	0,21593/par	
Custo resina p/par entressolas + suportes	58,30€	
Qtd pares entressolas p/construção	13	
Custo total material	757,91€	
Custo/h pós-processamento	15,00€	
Tempo de pós-processamento	2,5 h	Limpeza e pós-cura
Custo total pós-processamento	37,50€	

Assim, obtém-se o valor de 79.93€ para cada par de entressolas, como indicado na Tabela 20.

Tabela 20 - Custo por par de entressolas, tendo por base uma *build*.

Custo total preparação da construção	15,00€
Custo total operação máquina	228,67€
Custo total material	757,91€
Custo total pós-processamento	37,50€
Custo total por par	79.93€

Verifica-se, que a resina representa o maior custo no total dos custos do par de entressolas, como pode ser verificado pela Figura 118.

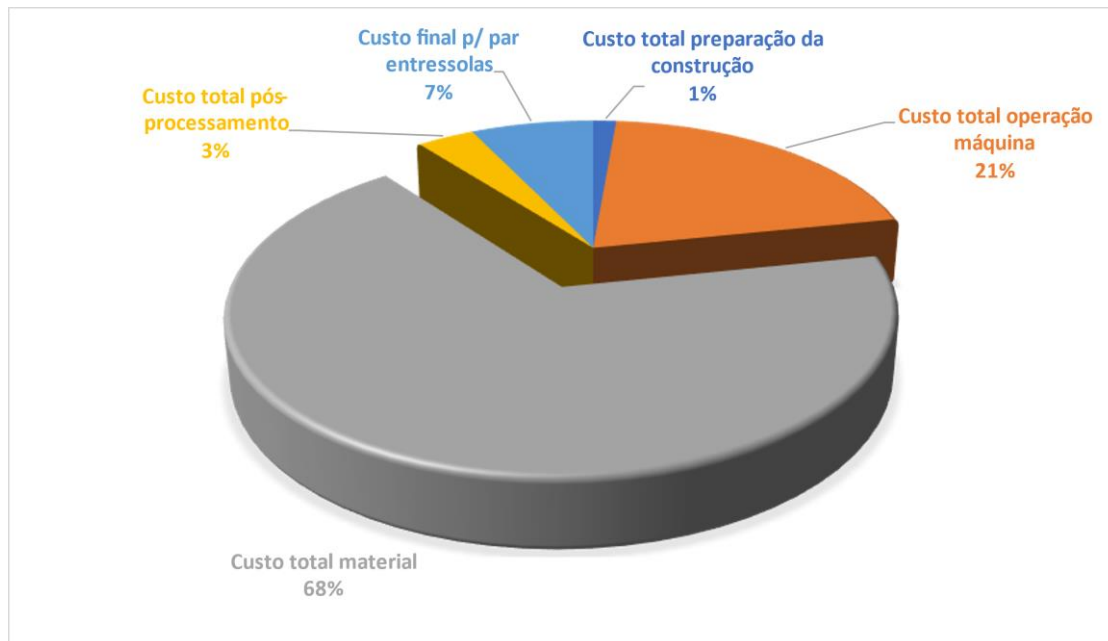


Figura 118 - Representação da percentagem de cada tipo de custo no custo final do par.

Esta análise de contribuição do custo de cada componente só confirma o que o custo da resina é bastante penalizante para que possa ser um modelo de negócio viável, para já. Poder-se-á equacionar a adoção de outra resina menos dispendiosa, contudo, essa opção também pode pôr em causa a viabilidade técnica já assegurada. No entanto, pode ser expectável que o preço possa sofrer alterações futuramente que contribuam para a viabilidade económica deste modelo de negócio. Por outro lado, ao refazer as *lattices*, sendo estas mais porosas, gasta-se menos material e isso vai baixar consideravelmente o preço do par. Afinal, tinha-se verificado que o que pesava mais no custo final era o material.

Acrescentar, no mínimo, 80€ ao preço final de um par de sapatos em loja apenas pode deitar por terra a ideia de customização em massa se o produto não for devidamente direccionado para o público alvo correto visto que o consumidor final poderá estar disposto a pagar mais por um produto que lhe proporcione uma boa experiência de personalização. Poder-se-á direccionar este tipo de projeto para um patamar mais elevado de mercado, onde o consumidor estará mais interessado no conforto e diferença de produto, estando disposto a pagar por isso. Além disso, no levantamento de produtos (palmilhas e entressolas) produzidos por FA que é feito no capítulo do estado da arte, verifica-se uma semelhança de preços, senão até um preço inferior ao agora obtido.

A análise dos custos associados deixa claro que a viabilidade económica deste modelo de negócio não está comprometida. Por outro lado, pode haver lugar a outro tipo de negócio que seja direcionar o produto para a área da saúde, onde os doentes com pé diabético, por exemplo, teriam bastantes vantagens em calçado específico e direcionado para o alívio da pressão plantar, não obstante o preço elevado. Se fosse considerado e provado ser um produto pertinente para saúde, poderia ser participado pelo SNS (Serviço Nacional de Saúde). Uma outra hipótese poderá passar pela fabricação de palmilhas ao invés de entressolas. As palmilhas não terão uma espessura tão grande, como de resto pode ser verificado nos desenhos de palmilhas do capítulo 3, logo não gastarão tanto material. O preço pode descer consideravelmente e a palmilha tem a vantagem de ser um componente amovível do sapato e constituir-se como uma opção para o cliente e aplicável a vários tipos de sapato.

.

6. Conclusões e trabalho futuro

O estudo das tecnologias de fabrico aditivo, materiais e geometrias de construção designadas por *lattices* para aplicação na produção de componentes para calçado, nomeadamente, entressolas e palmilhas, foi plenamente concretizado. Com o objetivo de produzir estes componentes, foi analisada uma amostra de perfis de pressão plantar para identificar as zonas principais de amortecimento. São claramente elencadas as zonas de nível 1, ou seja, zonas onde é necessário haver um maior alívio da pressão e que dizem respeito à zona do calcanhar e metatarsos e as zonas de nível 2, onde é necessário o alívio da pressão plantar moderado e que dizem respeito às zonas do mediopé e dedo grande.

São de salientar, no entanto, as diversas iterações realizadas no que se refere à seleção da tecnologia de fabrico aditivo mais adequada, buscando o melhor compromisso entre comportamento do material, velocidade de construção e complexidade do pós-processamento. Para o efeito, foram modeladas amostras de diferentes tipos de *lattice* para testar em cada uma das tecnologias de fabrico aditivo e com dimensões adequadas para a realização de testes de amortecimento.

A utilização da tecnologia SLA revelou-se inadequada face à inclusão de suportes no seio das estruturas *lattice*, o que incrementava a dificuldade de escoamento da resina não processada. Em acréscimo, a resina retida curava, solidificando no interior e inutilizando a amostra para a realização de testes funcionais.

A tecnologia PolyJet[®], não obstante as valências demonstradas pelo facto de utilizar um material distinto para as estruturas de suporte, que sendo solúveis, poderiam simplificar o pós-processamento. Contudo, esta expectativa não se verificou totalmente, existindo uma quantidade significativa de material de suporte que não era dissolvido no banho e que, de igual forma, inviabilizou as amostras impressas por esta tecnologia.

A LSPc foi a tecnologia de fabrico aditivo que se revelou mais adequada. A tecnologia propriamente dita, realiza a irradiação de uma camada de uma só vez e de forma contínua, resultando numa taxa de construção mais elevada. Por outro lado, a resina processada também pode ter contribuído de forma significativa para a rapidez de processamento e simplicidade de pós-processamento.

Paralelamente à seleção da tecnologia de fabrico aditivo, foi realizada também a seleção das estruturas *lattice* onde, em função do desempenho das tecnologias de fabrico testadas, foram efetuadas algumas variações ligeiras nas dimensões das células unitárias e das respetivas *beams*, com o objetivo de melhorar o processamento.

As amostras produzidas pela tecnologia LSPc foram sujeitas ao teste de amortecimento para avaliar a resposta das estruturas *lattice* após a sujeição a uma carga de impacto. Destes testes resultaram as características de amortecimento adequadas para cada uma das zonas plantares identificadas e que levou à modelação da entressola numa única peça, conjugando, no entanto, os três tipos de *lattice* testados. Após a impressão da entressola, e tendo sido verificada a qualidade desta, foi, no entanto, identificado e devidamente assinalado o erro que levou a uma escolha incorreta das *lattices* para a entressola. Este lapso resultou de uma deformidade nos corpos de prova que, por sua vez, teve como consequência uma distribuição incorreta das diferentes tipologias de *lattices* pelas diversas zonas críticas da entressola. Este percalço não compromete o processo nem os objetivos a atingir, apenas torna pertinente a repetição do mesmo com as devidas correções: anular a parede superior de 1mm dos corpos de prova e tornar maior a dimensão do tamanho das *lattices* em consonância com o diâmetro das *beams*.

Em termos de industrialização do produto, torna-se imperioso avaliar a viabilidade técnica e económica desta abordagem. A comparação dos tempos de processamento *versus* custos de produção é fundamental para retirar conclusões acerca de uma possível implementação deste modelo de negócio.

A viabilidade técnica ficou patente nos resultados obtidos anteriormente, no que concerne à tecnologia de fabrico aditivo utilizada, aos *lattices* e respetivo material pela capacidade de amortecimento e recuperação elástica demonstradas.

A viabilidade económica resulta diretamente dos custos de produção associados, nomeadamente, custos de preparação do trabalho de impressão, custos de material, custos energéticos e custos de pós-processamento. Face à volumetria da câmara de construção verifica-se que, quer por motivos de processamento, quer por motivos de espaço ocupado pelas peças, a construção é mais vantajosa ao alto. Esta opção viabiliza também a construção de mais pares de entressolas, com impacto no custo final por par. No entanto, verifica-se que o custo final de um par de entressolas ficará em cerca de 80€, no mínimo, a acrescentar ao valor de custo ao consumidor final. Este facto pode comprometer a

viabilização da introdução de FA na indústria de calçado, nomeadamente no acesso à implementação deste numa PME. Compromete, mas não inviabiliza. Poder-se-á pensar noutros tipos de modelos de negócio, como sejam a produção de palmilhas, a produção de produtos personalizados para classes de consumidores com poder económico mais elevado ou direccionar para área da saúde.

Como trabalhos futuros, elencam-se trabalhos complementares aos já realizados e que podem contribuir significativamente para o nível de conhecimento no setor do calçado. Destaca-se a possibilidade alargar a gama de produtos, nomeadamente, com o desenvolvimento de uma palmilha que possa ser utilizada em qualquer tipo de calçado.

Salienta-se que a simulação numérica do ensaio de compressão sobre os modelos 3D das amostras apenas não foram realizados por manifesta falta de tempo, uma vez que exigiria que fosse realizado o processo de homogeneização. Contudo, a realização desta tarefa poderia ter fornecido dados que permitissem despistar os resultados obtidos nos ensaios de impacto.

Ambas as soluções, entressola e palmilha, deverão ser caracterizadas em marcha, recorrendo a palmilhas sensorizadas de medição da pressão plantar em movimento.

Bibliografia

- [1] P. Estatístico, “O CALÇADO NO MUNDO,” *Apicapps*, 2021.
- [2] Portuguese Shoes, “Facts--Numbers-2019,” 2020.
- [3] APICCAPS, “Footure 2020,” 2013.
- [4] “MetalShoe FabLab.” <https://www.metalshoefablab.pt/> (accessed Mar. 05, 2022).
- [5] M. Aditiva, N. A. S. Ind, and S. D. O. Cal, “Referencial Técnico - Manufatura Aditiva nas Indústrias do Calçado e da Metalomecânica,” 2021.
- [6] “Anatomy of the Shoe.” https://www.shoeguide.org/shoe_anatomy/ (accessed Mar. 05, 2022).
- [7] “Integrating Companies in a Sustainable Apprenticeship System Produção Intelectual 3, Manual do Formador Montagem de calçado.”
- [8] Y. Ducq and B. Vallespir, “Reference Models for Mass Customisation Production of High Fashionable Products: Application to the Shoe Manufacturing Domain,” *IFIP Int. Fed. Inf. Process.*, vol. 257, pp. 165–173, 2008, doi: 10.1007/978-0-387-77249-3_17.
- [9] T. Ellena, H. Mustafa, A. Subic, and T. Yen Pang, “A design framework for the mass customisation of custom-fit bicycle helmet models,” 2018, doi: 10.1016/j.ergon.2018.01.005.
- [10] M. Marconi, A. ; Papetti, M. ; Scafà, M. ; Rossi, and M. ; Germani, “An Innovative Framework for Managing the Customization of Tailor-made Shoes,” pp. 5–8, 2019, doi: 10.1017/dsi.2019.389.
- [11] “3D Printed Footwear - 3D Printing Media Network.” <https://www.3dprintingmedia.network/category/consumer/3d-printed-footwear/> (accessed Jan. 30, 2020).
- [12] “SmarTech Projects 3D Printed Footwear To Generate \$6.5 Billion.” <https://www.smartechanalysis.com/news/smartech-projects-3d-printed-footwear-6-5-billion-yearly-revenues-by-2029/> (accessed Feb. 01, 2020).

- [13] “HP launches FitStation 3D foot scanning platform for customised 3D printed footwear products - TCT Magazine.” <https://www.tctmagazine.com/metrology-3d-scanning-imagine-inspection-news/hp-fitstation-3d-foot-scanning-platform/> (accessed Jan. 09, 2020).
- [14] “ISO/ASTM 52900:2015(en), Additive manufacturing — General principles — Terminology.” <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en> (accessed Nov. 30, 2019).
- [15] “AM technologies at a glance - Formnext - Mesago.” <https://formnext.mesago.com/frankfurt/en/themes-events/am-field-guide.html#process> (accessed Mar. 26, 2021).
- [16] “What is 3D printing? How does 3D printing work? | Hubs.” <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/#chap> (accessed Mar. 26, 2022).
- [17] A. Bagheri and J. Jin, “Photopolymerization in 3D Printing,” *ACS Appl. Polym. Mater.*, vol. 1, no. 4, pp. 593–611, Apr. 2019, doi: 10.1021/acsapm.8b00165.
- [18] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, and R. C. Advincula, “Mechanical characterization of 3D-printed polymers,” *Additive Manufacturing*, vol. 20. Elsevier B.V., pp. 44–67, Mar. 01, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2017.12.002.
- [19] “VAT Photopolymerisation | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University.” <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/> (accessed Jan. 02, 2020).
- [20] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 143. Elsevier Ltd, pp. 172–196, Jun. 15, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [21] “Stereolithography - Additively.” <https://www.additively.com/en/learn-about/stereolithography> (accessed Dec. 01, 2019).
- [22] “Digital Light Processing, DLP | Find suppliers, processes & material.” <https://www.manufacturingguide.com/en/digital-light-processing-dlp> (accessed

Oct. 05, 2020).

- [23] “SLA vs DLP: The Differences – Simply Explained | All3DP.”
<https://all3dp.com/2/dlp-vs-sla-3d-printing-technologies-shootout/> (accessed Jan. 02, 2020).
- [24] “WO2014126837A2 - Continuous liquid interphase printing - Google Patents.”
<https://patents.google.com/patent/WO2014126837A2> (accessed Jan. 31, 2021).
- [25] “WO2014126834A2 - Method and apparatus for three-dimensional fabrication with feed through carrier - Google Patents.”
<https://patents.google.com/patent/WO2014126834A2/en> (accessed Jan. 31, 2021).
- [26] “3D Printing Unicorns, Part 2: Carbon - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing.” <https://3dprint.com/260341/3d-printing-unicorns-part-2-carbon/> (accessed Feb. 25, 2020).
- [27] B. Huang *et al.*, “Continuous liquid interface production of alginate/polyacrylamide hydrogels with supramolecular shape memory properties,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 231, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2019.115736.
- [28] “US20170129175A1 - Method and apparatus for photo-curing with displaceable self-lubricating substratum for the formation of three-dimensional objects - Google Patents.” <https://patents.google.com/patent/US20170129175A1/en> (accessed Feb. 06, 2022).
- [29] “Our Process - Nexa3D.” <https://nexa3d.com/process/> (accessed Feb. 06, 2022).
- [30] “The Fastest 3D Printer and Why You Don’t Need One | Top 3D Shop.”
<https://top3dshop.com/blog/the-fastest-3d-printer> (accessed Feb. 12, 2022).
- [31] “Compare 3D Printers: Carbon3d M2 Vs Nexa3D NXE400 | Dynamism.”
<https://www.dynamism.com/nexa-vs-carbon3d.html> (accessed Jan. 22, 2022).
- [32] “Post-Processing Technology| 3D Printing Solutions |Nexa3D.”
<https://nexa3d.com/3d-printers/post-processing/> (accessed Feb. 12, 2022).

- [33] O. Gülcan, K. Günaydın, and A. Tamer, “The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review,” *Polym. 2021, Vol. 13, Page 2829*, vol. 13, no. 16, p. 2829, Aug. 2021, doi: 10.3390/POLYM13162829.
- [34] “Material Jetting | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University.”
<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/> (accessed Jan. 02, 2020).
- [35] M. Jiménez, L. Romero, I. A. Domínguez, M. D. M. Espinosa, and M. Domínguez, “Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects,” *Complexity*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/9656938.
- [36] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baci, and R. Marinescu, “FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review,” *Polym. Test.*, vol. 69, pp. 157–166, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.05.020.
- [37] U. K. uz Zaman, E. Boesch, A. Siadat, M. Rivette, and A. A. Baqai, “Impact of fused deposition modeling (FDM) process parameters on strength of built parts using Taguchi’s design of experiments,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 101, no. 5–8, pp. 1215–1226, Apr. 2019, doi: 10.1007/s00170-018-3014-6.
- [38] “Fused Deposition Modeling - Additively.” <https://www.additively.com/en/learn-about/fused-deposition-modeling> (accessed Dec. 01, 2019).
- [39] A. Dey and N. Yodo, “A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics,” *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 3, no. 3, p. 64, Jul. 2019, doi: 10.3390/jmmp3030064.
- [40] “Multi Jet Fusion, MJF | Find suppliers, processes & material.”
<https://www.manufacturingguide.com/en/multi-jet-fusion-mjf> (accessed Jan. 03, 2020).
- [41] “Powder Bed Fusion | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University.”
<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powder-bed-fusion/>

- ring/powderbedfusion/ (accessed Jan. 03, 2020).
- [42] “Laser Sintering - Additively.” <https://www.additively.com/en/learn-about/laser-sintering> (accessed Jan. 03, 2020).
- [43] R. Naboni and A. Kunic, “Design and Additive Manufacturing of Lattice-based Cellular Solids at Building Scale,” pp. 369–375, Nov. 2017, doi: 10.5151/SIGRADI2017-058.
- [44] A. du Plessis *et al.*, “Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing,” *Additive Manufacturing*, vol. 27. Elsevier B.V., pp. 408–427, May 01, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.03.033.
- [45] A. Nazir, K. Mekonen Abate, A. Kumar, and J.-Y. Jeng, “A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures,” doi: 10.1007/s00170-019-04085-3.
- [46] C. Pan, Y. Han, and J. Lu, “Design and Optimization of Lattice Structures: A Review,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 18, p. 6374, Sep. 2020, doi: 10.3390/app10186374.
- [47] F. N. Habib, P. Iovenitti, S. H. Masood, and M. Nikzad, “Fabrication of polymeric lattice structures for optimum energy absorption using Multi Jet Fusion technology,” *Mater. Des.*, vol. 155, pp. 86–98, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.05.059.
- [48] W. Tao and M. C. Leu, “Design of lattice structure for additive manufacturing,” in *International Symposium on Flexible Automation, ISFA 2016*, Dec. 2016, pp. 325–332, doi: 10.1109/ISFA.2016.7790182.
- [49] M. Mahbod and M. Asgari, “Elastic and plastic characterization of a new developed additively manufactured functionally graded porous lattice structure: Analytical and numerical models,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 155, pp. 248–266, May 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.02.041.
- [50] B. K. Nagesha, V. Dhinakaran, M. Varsha Shree, K. P. Manoj Kumar, D. Chalawadi, and T. Sathish, “Review on characterization and impacts of the lattice structure in additive manufacturing,” in *Materials Today: Proceedings*, Jan.

- 2020, vol. 21, pp. 916–919, doi: 10.1016/j.matpr.2019.08.158.
- [51] jamescraddock, “The design of impact absorbing structures for additive manufacture Related content,” doi: 10.1088/1742-6596/382/1/012042.
- [52] M. F. Guo, H. Yang, and L. Ma, “Design and characterization of 3D AuxHex lattice structures,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 181, p. 105700, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105700.
- [53] “3D Printed Footwear » 3D Printing Media Network - The Pulse of the AM Industry.” <https://www.3dprintingmedia.network/category/consumer/3d-printed-footwear/> (accessed Mar. 08, 2022).
- [54] “3D Printed Shoes Hit Paris Fashion Week 2013 Catwalk | Stratasys Blog.” <http://blog.stratasys.com/2013/07/02/paris-fashion-week-3d-printed-shoes/> (accessed Jan. 04, 2020).
- [55] “3D printed shoes by Iris van Herpen and Rem D Koolhaas.” <https://www.dezeen.com/2013/07/02/3d-printed-shoes-by-iris-van-herpen-and-rem-d-koolhaas/> (accessed Jan. 04, 2020).
- [56] “3ders.org - Iris van Herpen’s Crystal-esque 3D printed dress & shoes for Paris Fashion Week turns heads on the runway | 3D Printer News & 3D Printing News.” <https://www.3ders.org/articles/20150328-iris-van-herpens-crystal-esque-3d-printed-dress-shoes-paris-fashion-week.html> (accessed Jan. 05, 2020).
- [57] “michal kukucka - United Nude / 3D printed shoe development / CORAL.” <https://michalkukucka.com/united-nude-3d-printed-shoe-development-coral> (accessed Jan. 04, 2020).
- [58] “United Nude Brand - United Nude 3D printing.” <https://www.unitednude.com/news-page/UN3D/> (accessed Jan. 05, 2020).
- [59] “michal kukucka - United Nude / 3D printed concept shoe / FLOAT.” <https://michalkukucka.com/united-nude-3d-printed-concept-shoe-float> (accessed Jan. 04, 2020).
- [60] “3ders.org - Feetz makes world’s largest 3D printed shoes for teen with size 28 feet | 3D Printer News & 3D Printing News.”

- <https://www.3ders.org/articles/20170308-feetz-made-the-worlds-largest-3d-printed-shoes-for-teen-with-size-28-feet.html> (accessed Jan. 12, 2020).
- [61] “Innovation Lab ECCO presents Project Quant-U - ECCO Group.”
<https://group.ecco.com/en/news/newsroom/news/2017/innovation-lab#> (accessed Jan. 14, 2020).
- [62] “Native Shoes presents its 3D printed liquid rubber shoes - 3Dnatives.”
<https://www.3dnatives.com/en/native-shoes-3d-printed-shoes-070120204/>
(accessed Jan. 11, 2020).
- [63] “3D Printed Shoes: what’s available on the market today? - 3Dnatives.”
<https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-shoes-whats-available-on-the-market-today/#!> (accessed Mar. 08, 2022).
- [64] “The perfect fit: Carbon + adidas collaborate to upend athletic footwear - Carbon.” <https://www.carbon3d.com/case-studies/adidas/> (accessed Jan. 17, 2020).
- [65] “adidas Sapatos AlphaEdge 4D Reflective - Preto | adidas Portugal.”
<https://www.adidas.pt/sapatos-alphaedge-4d-reflective/FV4686.html> (accessed Jan. 16, 2020).
- [66] “How Eliud Kipchoge Helped Perfect Nike’s 3D Printing Process For Uppers - Nike News.” <https://news.nike.com/news/eliud-kipchoge-3d-printed-nike-zoom-vaporfly-elite-flyprint> (accessed Jan. 17, 2020).
- [67] “Formlabs & New Balance: The Future of Performance Products With Customized Shoes | Formlabs.” <https://formlabs.com/customer-stories/newbalance/> (accessed Jan. 18, 2020).
- [68] “EOS and Under Armour partner to develop advanced, scalable laser sintering 3D printing technology.” <https://www.eos.info/press/eos-and-under-armour-partner-to-develop-advanced-scalable-laser-sintering-3d-printing-technology>
(accessed Jan. 27, 2020).
- [69] “Under Armour Unveils a New 3D Printed Training Shoe Designed with Autodesk Software - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive

- Manufacturing.” <https://3dprint.com/123064/under-armour-3d-printed-shoe/> (accessed Jan. 21, 2020).
- [70] “Reebok introduces the Liquid Floatride Run, its latest 3D shoes ! - 3Dnatives.” <https://www.3dnatives.com/en/reebok-3d-shoes-280320184/> (accessed Jan. 21, 2020).
- [71] “Mass Customization Measured By The Foot at Wiivv | 3D Systems.” <https://www.3dsystems.com/customer-stories/mass-customization-measured-foot> (accessed Jan. 05, 2020).
- [72] “Feet first - a closer look at 3D printed orthotics - TCT Magazine.” <https://www.tctmagazine.com/3d-printing-news/feet-first-a-closer-look-3d-printed-orthotics/> (accessed Jan. 06, 2020).
- [73] “3D Printing | Scientifeet.” <https://www.scientifeet.com/en/home/documentation-en/3dprint/> (accessed Feb. 08, 2020).
- [74] C. W. Chan and A. Rudins, “Subject Review Foot Biomechanics During Walking and Running,” 1994. doi: 10.1016/S0025-6196(12)61642-5.
- [75] “Antepé | Mediopé | Retropé | Anatomia papel e caneta.” <https://www.anatomia-papel-e-caneta.com/antepe-mediope-retrope/> (accessed Oct. 18, 2020).
- [76] A. Hadi, A. Razak, A. Zayegh, R. K. Begg, and Y. Wahab, “Foot Plantar Pressure Measurement System: A Review,” *Sensors*, vol. 12, pp. 9884–9912, 2012, doi: 10.3390/s120709884.
- [77] D. V Rai and L. M. Aggarwal, “The Study of Plantar Pressure Distribution in Normal and Pathological Foot,” *Polish J. Med. Phys. Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 25–34, 2006.
- [78] L. Wafai, A. Zayegh, J. Woulfe, S. Aziz, and R. Begg, “Identification of Foot Pathologies Based on Plantar Pressure Asymmetry,” *Sensors*, vol. 15, no. 8, pp. 20392–20408, Aug. 2015, doi: 10.3390/s150820392.
- [79] “footscan® | rs scan International.” <https://rsscan.com/footscan/> (accessed Oct. 18, 2020).

- [80] “F-Scan System | Tekscan.” <https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/f-scan-system> (accessed Oct. 18, 2020).
- [81] “Fases da Marcha Humana | Praticando Fisio.” <http://praticandofisio.com/fases-da-marcha/> (accessed Oct. 18, 2020).
- [82] E. Filoni, J. Martins Filho, R. K. Fukuchi, and R. M. Gondo, “Comparação entre índices do arco plantar,” *Mot. rev. educ. fís.*, vol. 15, no. 4, pp. 850–860, 2009.
- [83] E. F. Manfio, N. P. Vilardi, V. Mendes Abrunhosa, C. De, S. Furtado, and L. Varandas De Souza, “Fisioterapia Brasil-Volume 2-Número 3-Maio / Artigo original Análise do comportamento da distribuição de pressão plantar em sujeitos normais Analysis of plantar pressure distribution behavior in normal subjects,” 2001.
- [84] “(PDF) Foot Arch Characterization A Review, a New Metric, and a Comparison.” https://www.researchgate.net/publication/41111646_Foot_Arch_Characterization_A_Review_a_New_Metric_and_a_Comparison (accessed Jan. 26, 2021).
- [85] C. P. Witana, R. S. Goonetilleke, E. Y. L. Au, S. Xiong, and X. Lu, “Footbed shapes for enhanced footwear comfort,” *Ergonomics*, vol. 52, no. 5, pp. 617–628, 2009, doi: 10.1080/00140130802419503.
- [86] “WHO/Europe | Nutrition - Body mass index - BMI.” <https://www.euro.who.int/en/health-topics/disease-prevention/nutrition/a-healthy-lifestyle/body-mass-index-bmi> (accessed Feb. 06, 2021).
- [87] S. K. R. Al-Magsoosi and A. K. Chong, “Foot Loading Pattern Variations between Normal Weight, Overweight, and Obese Adults Aged 24 to 50 Years,” *J. Biosci. Med.*, vol. 07, no. 05, pp. 34–49, 2019, doi: 10.4236/jbm.2019.75007.
- [88] F. Tuna, S. Yavuz, K. Mercimek, and H. Tuna, “Central Bringing Excellence in Open Access The Evaluation of Plantar Pressure Distribution in Non-Obese, Pre-Obese, Obese Class I and Obese Class II Adults,” 2017.
- [89] M. Castro, S. Abreu, H. Sousa, L. Machado, R. Santos, and J. P. Vilas-Boas, “Ground reaction forces and plantar pressure distribution during occasional

- loaded gait,” *Appl. Ergon.*, vol. 44, no. 3, pp. 503–509, May 2013, doi: 10.1016/j.apergo.2012.10.016.
- [90] E. F. Youssef, A. A. Shanab, M. A. Ameer, and M. E. Shanab, “Impact of body weight on shifting of foot pressure among adult subjects,” *Acta Bioeng. Biomech.*, vol. 22, no. 2, 2020, doi: 10.37190/ABB-01595-2020-02.
- [91] S. R. Urry and S. C. Wearing, “The accuracy of footprint contact area measurements: Relevance to the design and performance of pressure platforms,” *Foot*, vol. 11, no. 3, pp. 151–157, Sep. 2001, doi: 10.1054/foot.2001.0684.
- [92] A. Nazir, K. M. Abate, A. Kumar, and J. Y. Jeng, “A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 104, no. 9–12, pp. 3489–3510, Oct. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04085-3.
- [93] “Conforto do calçado | Notícias | Centro Tecnológico do Calçado de Portugal (CTCP).” <https://www.ctcp.pt/detalhe-publicacao/conforto-do-calcado/500.html> (accessed Feb. 27, 2022).
- [94] S. Tm, “Shock absorption tester,” pp. 411–412.

Anexos

Anexo A



xFLEX475

**PhotoElastic
60A High Rebound**

Nexa3D

1923 Eastman Ave, Suite 200
Ventura, CA 93003

nexa3D[®]



Description

Nexa3D xFLEX475 is an industrial strength UV resin that cures to a soft, elastomeric material. xFLEX475 is suitable for applications where resilience, snap back, and tear resistance is desired, such as lattice structures and functional prototyping. This single component resin is easy to print, making it a superior material for elastomeric applications.

Available colors: White, Black

Mechanical Properties

Mechanical Properties	Method	xFLEX475 White	xFLEX475 Black
Tensile Stress at Break	ASTM D638	3.8 ± 0.8 MPa	2.48 ± 0.3 MPa
Young's Modulus	ASTM D638	4.6 ± 0.8 MPa	3.73 ± 0.5 MPa
Elongation at Failure	ASTM D638	158 ± 2.7 %	150 ± 6.7 %
Tear Strength	ASTM D624	11.77 ± 1.3 kN/m	7.3 ± 0.7 kN/m
Energy Return	Internal	39%	46.5%
Other Properties			
Shore Hardness (0s, 5s)	ASTM D2240	55A, 44A	
Solid Density (Green)	ASTM D792	1.43 g/cm ³	
Solid Density (Cured)	ASTM D792	1.04 g/cm ³	
Volumetric Shrinkage	Internal	2.26 g/cm ³	
Water Absorption (24hr)	ASTM D570	2.1 ± 0.1%	
Water Absorption (72hr)	ASTM D570	4.5 ± 0.1%	
Water Absorption (168hr)	ASTM D570	6.5 ± 0.1%	
Viscosity @ 25°C (77°F)	ASTM D7867	1320cP	
Liquid Density	ASTM D1475	1.02 g/cm ³	

*Results based on validated workflow



Validated Workflow

Exposure Parameters	NexaX default
Primary Wash	1min, xClean detergent in xWash station
Secondary Wash	2min, Isopropyl Alcohol
Dry	30min air dry
Inhibition	Spray with Mold Release
Cure	60min total cure time in xCure. Cure submersed in water using borosilicate glass container. Place container on floor of xCure. Flip part half-way through to ensure uniform exposure.
Inhibitor Rinse	Dip in IPA to remove mold release, drip dry

Limitations

The mechanical and physical properties of **Nexa3D xFLEX475** are highly dependent on the printing parameters used as well as part geometry. It is common that validated workflows need to be adjusted for unusually thick or thin geometries. Even if the properties observed in your lab don't match the TDS, it does not signify that something is "wrong,". Parts may be tacky prior to post-cure.

Post curing of **Nexa3D xFLEX475** to reach stated property targets must be cured in water or an alternative inert medium. Deionized water is recommended. Coating parts with a spray-on mold release agent such as LOCTITE® Frekote 770-NC or Smooth-On Universal Mold Release prior to post curing will reduce the surface tack of a final part. After curing, the mold release can be rinsed off with water or Isopropanol.

Printing with **Nexa3D xFLEX475** requires detailed attention to interactions between the material and the hardware in use. Mechanical process settings must be optimized for each printer based on the hardware and software capabilities. Due to the low durometer and high elasticity of the material, printed parts may sway during tray release, Z-axis movement, and upon re-entering the resin vat. For this reason, the user must consider part orientation and support design carefully.

Typically larger supports and contacts are required and build height to width ratio should be kept near 1:1. Use wait time of 3-5 seconds to allow part and resin to settle. Parts are too soft to removing support nubs by sanding or other abrasive methods. Cutting supports with a scalpel or ultrasonic knife will leave a cleaner surface than tearing off or cutting with snips.

nexa3D



Note

The information provided in this Technical Data Sheet (TDS) including the recommendations for use and application of the product are based on our knowledge and experience of the product as at the date of this TDS. The product can have a variety of different applications and working conditions in your environment that are beyond our control. Nexa3D and Henkel are, therefore, not liable for the suitability of our product for the production processes and conditions in respect of which you use them, as well as the intended applications and results. We strongly recommend that you carry out your own prior trials to confirm such suitability of our product. Any liability in respect of the information in the Technical Data Sheet or any other written or oral recommendations regarding the concerned product is excluded, except if otherwise explicitly agreed and except in relation to death or personal injury caused by our negligence and any liability under any applicable mandatory product liability law.

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, **Nexa3D and Henkel Corporation specifically disclaim all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of said products. Nexa3D and Henkel Corporation specifically disclaim any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits.** The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more United States or foreign patents or patent applications.

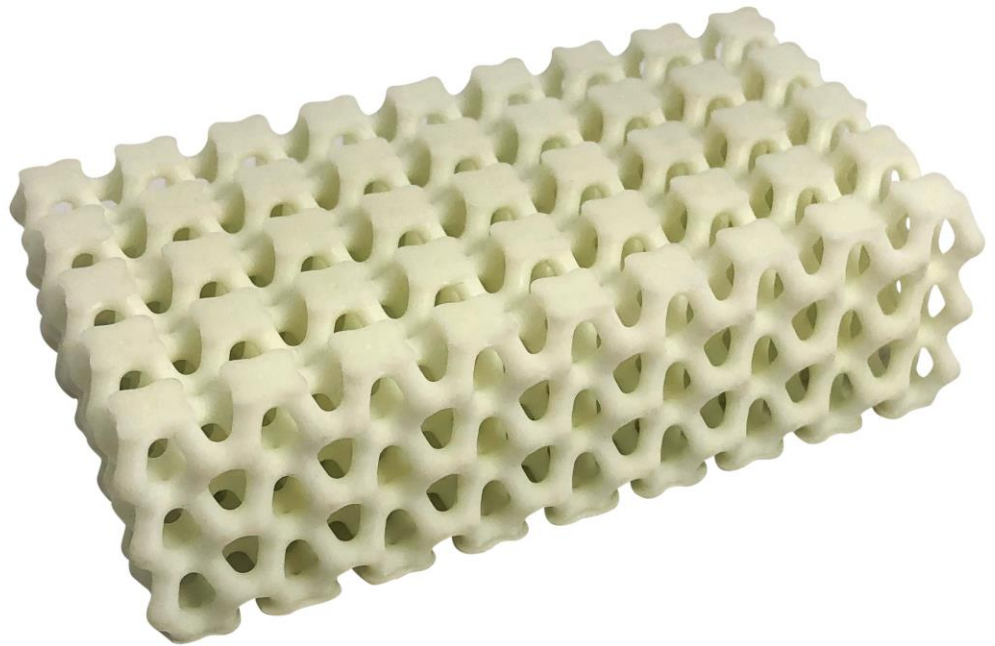
Trademark usage

Except as otherwise noted, all trademarks in this document are trademarks of Nexa3D or Henkel Corporation in the U.S. and elsewhere. ® denotes a trademark registered in the U.S. Patent and Trademark Office.



Anexo B

LOCTITE®



LOCTITE 3D IND475™

A60 High Rebound

Photoelastic

White, Black

LOCTITE®

Henkel Corporation

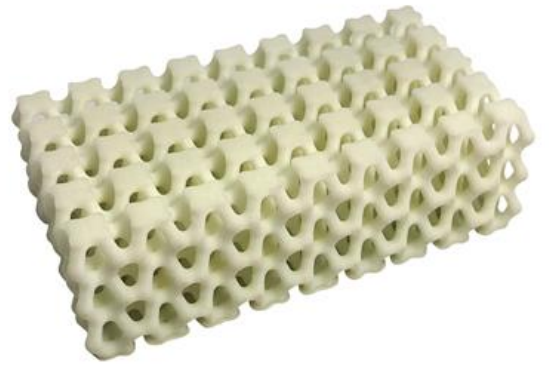
loctite3dp@henkel.com





IND475™

A60 HIGH REBOUND
PHOTOELASTIC
WHITE, BLACK



LOCTITE 3D IND475™

LOCTITE 3D IND475 is a single component UV resin that cures to a soft, elastomeric material.

LOCTITE 3D IND475 is a flexible material that gives a good balance of hardness, strength and elongation.

LOCTITE 3D IND475 is a low viscosity liquid, printable at room temperature across various DLP platforms.



Benefits:

- True elastomeric behavior
- Fast Printing with low shrinkage behavior
- High resilience / High energy return



Ideal for:

- Air and dust gaskets
- Flexible seals and housings
- Cushioning pads



Markets:



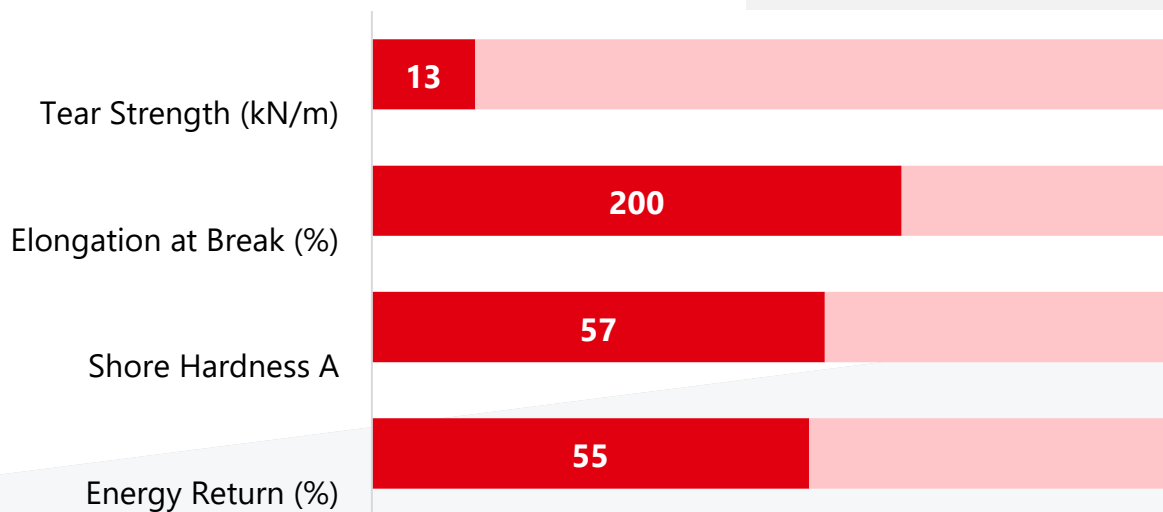
Industry



Automotive



Consumer
Goods



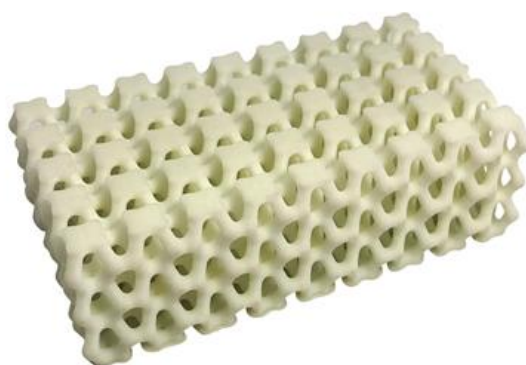
**Values shown are linked to LOCTITE IND475 White as reference, please refer to the specific mechanical properties for each of the colors shown in this document*





IND475™

A60 HIGH REBOUND
PHOTOELASTIC
WHITE



MECHANICAL PROPERTIES

Mechanical Properties	Measure	Method	Green	Post Processed
Tensile Stress at Break	MPa	ASTM D638	-	3.1 ± 0.3 ^[1]
Young's Modulus	MPa	ASTM D638	-	1.1 ± 0.5 ^[1]
Elongation at Break	%	ASTM D638	-	201 ± 16 ^[1]
Tear Strength	kN/m	ASTM D624	-	12.6 ± 0.6 ^[2]
Energy Return	%	Internal	-	55 ^[3]
Other Properties				
Shore Hardness (0s, 5s)	A	ASTM D2240	-	57, 42 ^[4]
Solid Density (Green)	g/cm ³	ASTM D792	-	1.43 ^[5]
Solid Density (Cured)	g/cm ³	ASTM D792	-	1.04 ^[5]
Volumetric Shrinkage	%	Internal	-	-27 ^[5]
Water Absorption (24hr)	%	ASTM D570	-	2.1 ± 0.1 ^[6]
Water Absorption (72hr)	%	ASTM D570	-	4.5 ± 0.1 ^[6]
Water Absorption (168hr)	%	ASTM D570	-	6.5 ± 0.1 ^[6]
Biocompatibility				
Irritation		ISO 10993-23*		Comply ^[8]

Liquid Properties	Measure	Method	Value
Viscosity @ 25°C (77°F)	cP	ASTM D7867	1,400 ^[7]
Liquid Density	g/cm ³	ASTM D1475	1.02 ^[5]

*All specimen are printed unless otherwise noted. All specimen were conditioned in ambient lab conditions at 19-23°C / 40-60% RH for at least 24 hours." ASTM Methods: D638 Type IV, 50 mm/min, D790-B, 2 mm/min, D648, D256 Notched IZOD (Machine Notched), 6 mm x 12 mm, D570 0.125" x 2" Disc 24hr@ 25°C, D2240, Type "D" (0, 3 seconds), D7867, D1475

*The biological assessment has been performed based on the in vitro method according to ISO10993-23

Internal Data Sources:

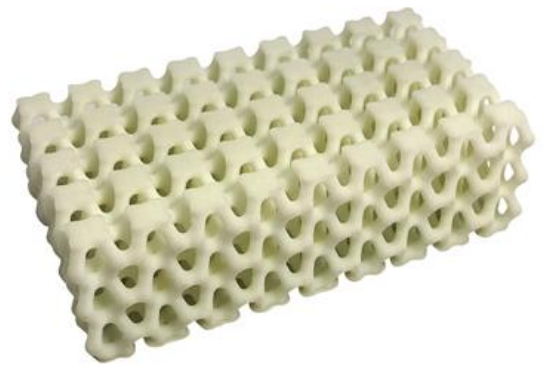
[1] FOR22878, [2] FOR22879, [3] FOR22952, [4] FOR22950, [5] FOR23307, [6] FOR22955, [7] FOR22875, FOR52189(in vitro)





IND475™

A60 HIGH REBOUND
PHOTOELASTIC
WHITE



WORKFLOW

Validated workflows need to be followed to achieve properties as provided in the TDS. Examples of validated workflow steps are listed below. Users should defer to the most current workflow information for best results which can be found at <https://www.loctiteam.com/printer-validation-settings>

PRINTER SETTINGS

LOCTITE 3D IND475 White is formulated to print optimally on industrial DLP printer. Read the safety data sheet carefully to get details about health and safety instructions. Recommended print parameters:

- Shake resin bottle well before usage
- Temperature: 20°C to 30°C
- Intensity: 3 mW/cm² to 10 mW/cm²

Exposure time for an intensity of 5 mW/cm²

Layer Thickness (µm):	100	Ec (mJ/cm ²)	3.55
First layer time (s)	60	Dp (mm):	0.13
Burn in region (s):	35	Model Layer Exposure (s):	3.5

POST PROCESSING

LOCTITE 3D IND475 White requires post processing to achieve specified properties. Prior to post curing, support structures should be removed from the printed part, and the part should then be washed. Use compressed air to remove residual solvent from the surface of the material between intervals.

Post Process Step	Agent	Method	Duration	Interval	Additional Info
Cleaning #1	TPM	Sonic	2 min	1	LOCTITE® Cleaner T
Cleaning #2	IPA	Sonic	2 min	1	Use fresh IPA
Dry	n.a.	Compressed air	30 s	1	Air pressure (30 psi)
Wait before post curing	n.a.	Ambient	60 min	1	Room temperature

POST CURING

LOCTITE 3D IND475 White requires **post curing in water** to achieve specified properties. It is recommended to apply a mold release on the parts before submerged in a transparent water container.

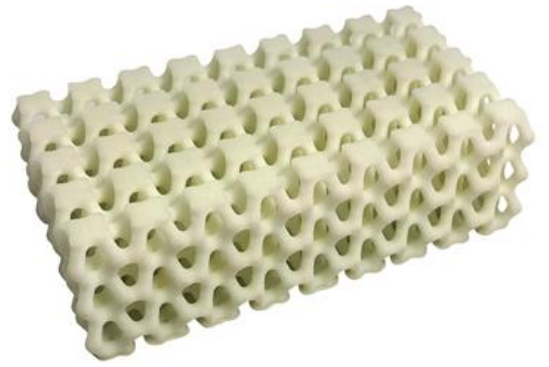
UC Curing Unit	UV Source	Intensity	Cure time/ side	Additional Settings (Shelf, Output Energy)
Loctite UVALOC 1000	Mercury Arc Bulb (broad spectrum)	30 mW/cm ² at 365nm	5 min	500 W, 3 rd shelf from the top
Dymax 5000 EC Flood	Mercury Arc Bulb (broad spectrum)	150 - 175 mW/cm ² at 380nm	10 min	400W, Shelf K
Loctite CL36	405nm LED	80 mW/cm ² at 405 nm	90 min	100% top & side





IND475™

A60 HIGH REBOUND
PHOTOELASTIC
BLACK



MECHANICAL PROPERTIES

Mechanical Properties	Measure	Method	Green	Post Processed
Tensile Stress at Break	MPa	ASTM D638	-	2.4 ± 0.6 ^[1]
Young's Modulus	MPa	ASTM D638	-	2.5 ± 0.3 ^[1]
Elongation at Break	%	ASTM D638	-	122 ± 11 ^[1]
Tear Strength	kN/m	ASTM D624	-	7.5 ± 1.2 ^[2]
Energy Return	%	Internal	-	77 ± 4 ^[3]
Other Properties				
Shore Hardness (0s, 5s)	A	ASTM D2240	-	49, 45 ^[4]
Solid Density (Green)	g/cm ³	ASTM D792	-	1.16 ^[5]
Solid Density (Cured)	g/cm ³	ASTM D792	-	1.06 ^[5]
Volumetric Shrinkage	%	Internal	-	-9 ^[5]
Water Absorption (24hr)	%	ASTM D570	-	3.2 ^[6]
Water Absorption (72hr)	%	ASTM D570	-	5.4 ^[6]
Water Absorption (168hr)	%	ASTM D570	-	8.5 ^[6]

Liquid Properties	Measure	Method	Value
Viscosity @ 25°C (77°F)	cP	ASTM D7867	1,500 ^[7]
Liquid Density	g/cm ³	ASTM D1475	1.01 ^[5]

All specimen are printed unless otherwise noted. All specimen were conditioned in ambient lab conditions at 19-23°C / 40-60% RH for at least 24 hours. ASTM Methods: D638 Type IV, 5 mm/min, D790-B, 2 mm/min, D648, D256 Notched IZOD (Machine Notched), 6 mm x 12 mm, D570 0.125" x 2" Disc 24hr@ 25°C, D2240, Type "D" (0, 3 seconds), D7867, D1475

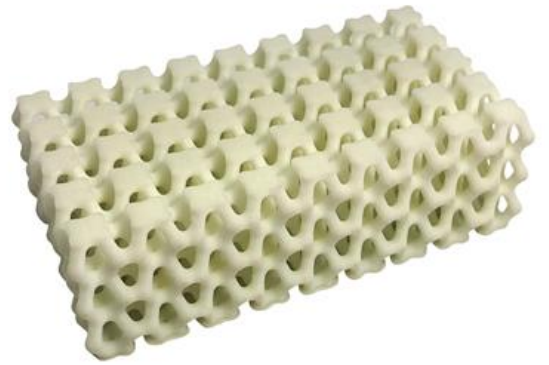
Internal Data Sources:

[1] FOR40695, [2] FOR40696, [3] FOR40697, [4] FOR40692, [5] FOR35576, [6] FOR29248, [7] FOR40548





IND475™
A60 HIGH REBOUND
PHOTOELASTIC
BLACK



WORKFLOW

Validated workflows need to be followed to achieve properties as provided in the TDS. Examples of validated workflow steps are listed below. Users should defer to the most current workflow information for best results which can be found at <https://www.loctiteam.com/printer-validation-settings>

PRINTER SETTINGS

LOCTITE 3D IND475 Black is formulated to print optimally on industrial DLP printer. Read the safety data sheet carefully to get details about health and safety instructions. Recommended print parameters:

- Shake resin bottle well before usage
- Temperature: 20°C to 30°C
- Intensity: 3 mW/cm² to 10 mW/cm²

Exposure time for an intensity of 3 mW/cm²

Layer Thickness (µm):	100	Ec (mJ/cm ²)
First layer time (s)	50	Dp (mm):
Burn in region (s):	25	
Model Layer Exposure (s):	4.7	

POST PROCESSING

LOCTITE 3D IND475 Black requires post processing to achieve specified properties. Prior to post curing, support structures should be removed from the printed part, and the part should then be washed. Use compressed air to remove residual solvent from the surface of the material between intervals.

Post Process Step	Agent	Method	Duration	Intervals	Additional Info
Cleaning #1	TPM	Sonic	2 min	1	LOCTITE® Cleaner T
Cleaning #2	IPA	Sonic	2 min	1	Use fresh IPA
Dry	n/a	Compressed air	30 s	1	Air pressure (30 psi)
Wait before post curing	n/a	Ambient condition	60 min	1	Room temperature

POST CURING

LOCTITE 3D IND475 Black requires **post curing in water** to achieve specified properties. It is recommended to apply a mold release on the parts before submerged in a transparent water container.

UC Curing Unit	UV Source	Intensity	Cure time/ side	Additional Settings (Shelf, Output Energy)
Loctite UVALOC 1000	Mercury Arc Bulb (broad spectrum)	30 mW/cm ² at 365 nm	10 min	500 W, 3 rd shelf from the top
Dymax 5000 EC Flood	Mercury Arc Bulb (broad spectrum)	150 - 175 mW/cm ² at 380 nm	10 min	400W, Shelf I
Nexa Cure	365nm and 405nm LED	20-25mW/cm ²	60 min	Middle shelf





IND475™

A60 HIGH REBOUND
PHOTOELASTIC
WHITE, BLACK



Additional Workflow Notes

PRINT SETTINGS

Printing with **LOCTITE® 3D IND475™** requires detailed attention to interactions between the material and the hardware in use. Mechanical process settings must be optimized for each printer based on the hardware and software capabilities. Due to the low durometer and high elasticity of the material, printed parts may sway during tray release, build head movement, and upon re-entering the resin. For this reason, the user must consider many variables while printing. Some applicable print process considerations and respective guidelines are discussed below. Critical considerations include adhesion behavior at the print interface, model geometry, and model print orientation.

Lift Height Between Layers: Larger parts may require larger lift heights due to overall elongation magnitude.

- Small parts (<25 mm height): 10-15mm
- Medium parts (25 - 100 mm height): 20-25 mm
- Large parts (>100mm height): 25-30 mm

Build Head Movement Rates: Thicker parts allow for more rapid rates due to overall part rigidity compared to printing forces.

- Low Thickness (<5mm thickness): 3-5 mm/second
- Medium Thickness (5-10 mm thickness): 3-10 mm/second
- High Thickness (>10 mm thickness): 3-20 mm/second

Time Delay Before Layer Exposure:

- Generally, 3-5 seconds is sufficient due to the resin's low viscosity. Parts with thin features may require longer times for the small features to return to the correct position as they normalize with the resin's viscosity forces.

Support Structures:

- Place supports on non-critical model surfaces if possible. Support structure placement and geometry is model-dependent based on model layer surface area. General recommendations are provided.
- Support Thickness: 0.6-0.8 mm diameter
- Support Contact Area: 25-75% support thickness

POST PROCESSING

- **LOCTITE® 3D IND475™** requires post processing to achieve specified properties. Prior to post curing, the part should be washed in a friendly cleaner. We recommend in **LOCTITE® Cleaner T**.
- Post curing of **LOCTITE® 3D IND475™** to reach stated property targets must be cured in water or an alternative inert medium.
- Coating parts with a spray-on mold release agent such as **LOCTITE® Frekote 770-NC** or **Smooth-On Universal Mold Release** prior to post curing can reduce the surface tack of a final part. After curing, the mold release can be rinsed off with water or Isopropanol.

<https://www.loctiteam.com/printer-validation-settings/>



LOCTITE®

IND475™

A60 HIGH REBOUND
PHOTOELASTIC
WHITE, BLACK



NOTE

The information provided in this Technical Data Sheet (TDS) including the recommendations for use and application of the product are based on our knowledge and experience of the product as at the date of this TDS. The product can have a variety of different applications as well as differing application and working conditions in your environment that are beyond our control. Henkel is, therefore, not liable for the suitability of our product for the production processes and conditions in respect of which you use them, as well as the intended applications and results. We strongly recommend that you carry out your own prior trials to confirm such suitability of our product.

Any liability in respect of the information in the Technical Data Sheet or any other written or oral recommendation(s) regarding the concerned product is excluded, except if otherwise explicitly agreed and except in relation to death or personal injury caused by our negligence and any liability under any applicable mandatory product liability law.

In case products are delivered by Henkel Belgium NV, Henkel Electronic Materials NV, Henkel Nederland BV, Henkel Technologies France SAS and Henkel France SA please additionally note the following:

In case Henkel would be nevertheless held liable, on whatever legal ground, Henkel's liability will in no event exceed the amount of the concerned delivery.

In case products are delivered by Henkel Colombiana, S.A.S. the following disclaimer is applicable:

The information provided in this Technical Data Sheet (TDS) including the recommendations for use and application of the product are based on our knowledge and experience of the product as at the date of this TDS. Henkel is not liable for the suitability of our product for the production processes and conditions in respect of which you use them, as well as the intended applications and results. We strongly recommend that you carry out your own prior trials to confirm such suitability of our product.

Any liability in respect of the information in the Technical Data Sheet or any other written or oral recommendation(s) regarding the concerned product is excluded, except if otherwise explicitly agreed and except in relation to death or personal injury caused by our negligence and any liability under any applicable mandatory product liability law.

In case products are delivered by Henkel Corporation, Resin Technology Group, Inc., or Henkel Canada, Inc. the following disclaimer is applicable:

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, Henkel Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of **Henkel Corporation's products. Henkel Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits.** The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more United States or foreign patents or patent applications.

Trademark Usage

Except as otherwise noted, all trademarks in this document are trademarks of Henkel Corporation in the U.S. and elsewhere. ® denotes a trademark registered in the U.S. Patent and Trademark Office.



Anexo C



Revision Number: 001.0

Issue date: 09/14/2020

1. PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION

Product name:	Nexa3D xFLEX	IDH number:	Not available.
Product type/use:	Acrylics	Item number:	Nexa3D xFLEX
Restriction of Use:	None identified	Region:	United States
Company address:	Nexa3D 1923 Eastman Ave, Suite 200 Ventura, CA 93003	Telephone:	1-805-465-9001
		EMERGENCY TELEPHONE:	ChemTel 1-800-255-3924 (US) / 1-813-248-0585
		Contract	MIS3892732
		Internet:	www.nexa3d.com

2. HAZARDS IDENTIFICATION

EMERGENCY OVERVIEW	
WARNING:	CAUSES SKIN IRRITATION. MAY CAUSE AN ALLERGIC SKIN REACTION. CAUSES SERIOUS EYE IRRITATION. MAY CAUSE RESPIRATORY IRRITATION. SUSPECTED OF DAMAGING FERTILITY OR THE UNBORN CHILD.

HAZARD CLASS	HAZARD CATEGORY
SKIN IRRITATION	2
EYE IRRITATION	2A
SKIN SENSITIZATION	1
REPRODUCTIVE TOXICITY	2
SPECIFIC TARGET ORGAN TOXICITY - SINGLE EXPOSURE	3

PICTOGRAM(S)

Precautionary Statements

Prevention:	Obtain special instructions before use. Do not handle until all safety precautions have been read and understood. Avoid breathing vapors, mist, or spray. Wash affected area thoroughly after handling. Use only outdoors or in a well-ventilated area. Contaminated work clothing should not be allowed out of the workplace. Wear protective gloves, clothing, eye and face protection.
Response:	IF ON SKIN: Wash with plenty of water. IF INHALED: Remove victim to fresh air and keep at rest in a position comfortable for breathing. Call a POISON CENTER or physician if you feel unwell. IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing. IF exposed or concerned: Get medical attention. If skin irritation or rash occurs: Get medical attention. If eye irritation persists: Get medical attention. Take off contaminated clothing.
Storage:	Store in a well-ventilated place. Keep container tightly closed. Store locked up.
Disposal:	Dispose of contents and/or container according to Federal, State/Provincial and local governmental regulations.

Classification complies with OSHA Hazard Communication Standard (29 CFR 1910.1200) and is consistent with the provisions of the United Nations Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals (GHS).

See Section 11 for additional toxicological information.

3. COMPOSITION / INFORMATION ON INGREDIENTS

IDH number: Not available.

Product name: Nexa3D xFLEX

Hazardous Component(s)	CAS Number	Percentage*
Aliphatic Urethane Acrylate Oligomer		30 - 60
Aliphatic Urethane Acrylate Oligomer		10 - 30
Acrylate ester	Proprietary	10 - 30
Mixture of less 3-(4-(2-Hydroxy-2-methylpropionyl)phenyl)-1,1,3-trimethylindan-6-yl 2-hydroxyprop-2-yl ketone and 3-(4-(2-Hydroxy-2-m	163702-01-0	1 - 5
Photoinitiator	Proprietary	1 - 5
UV Stabilizer	Proprietary	0.1 - 1
Hydroxyalkyl methacrylate	Proprietary	0.1 - 1
Triacrylate ester	Proprietary	0.1 - 1
Titanium dioxide	13463-67-7	0.1 - 1
Trimethylolpropane triacrylate	15625-89-5	0.1 - 1

* Exact percentages may vary or are trade secret. Concentration range is provided to assist users in providing appropriate protections.

4. FIRST AID MEASURES

Inhalation:	Move to fresh air. If not breathing, give artificial respiration. If breathing is difficult, give oxygen. Get medical attention.
Skin contact:	Immediately flush skin with plenty of water (using soap, if available). Remove contaminated clothing and footwear. Wash clothing before reuse. Get medical attention.
Eye contact:	Rinse immediately with plenty of water, also under the eyelids, for at least 15 minutes. Get medical attention.
Ingestion:	DO NOT induce vomiting unless directed to do so by medical personnel. Never give anything by mouth to an unconscious person. Get medical attention.
Symptoms:	See Section 11.

5. FIRE FIGHTING MEASURES

Extinguishing media:	Water spray (fog), foam, dry chemical or carbon dioxide. Do not use high volume water jet.
Special firefighting procedures:	Wear self-contained breathing apparatus and full protective clothing, such as turn-out gear. In case of fire, keep containers cool with water spray.
Unusual fire or explosion hazards:	Uncontrolled polymerization may occur at high temperatures resulting in explosions or rupture of storage containers. High concentration of airborne dust may form explosive mixture with air.
Hazardous combustion products:	Oxides of carbon, oxides of nitrogen, irritating organic vapors.

6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

Use personal protection recommended in Section 8, isolate the hazard area and deny entry to unnecessary and unprotected personnel.

Environmental precautions:	Do not allow product to enter sewer or waterways.
Clean-up methods:	Remove all sources of ignition. Evacuate and ventilate spill area; dike spill to prevent entry into water system; wear full protective equipment during clean-up. Soak up with inert absorbent material (e.g. sand, silica gel, acid binder, universal binder, sawdust). Scrape up as much material as possible. Store in a partly filled, closed container until disposal. Refer to Section 8 "Exposure Controls / Personal Protection" prior to clean up.

7. HANDLING AND STORAGE

Handling: Use only with adequate ventilation. Prevent contact with eyes, skin and clothing. Do not breathe vapor and mist. Wash thoroughly after handling. Keep container closed. Refer to Section 8.

Storage: Keep in a cool, well ventilated area away from heat, sparks and open flame. Keep container tightly closed until ready for use.

8. EXPOSURE CONTROLS / PERSONAL PROTECTION

Employers should complete an assessment of all workplaces to determine the need for, and selection of, proper exposure controls and protective equipment for each task performed.

Hazardous Component(s)	ACGIH TLV	OSHA PEL	AIHA WEEL	OTHER
Aliphatic Urethane Acrylate Oligomer	None	None	None	None
Aliphatic Urethane Acrylate Oligomer	None	None	None	None
Acrylate ester	None	None	None	None
Mixture of less 3-(4-(2-Hydroxy-2-methylpropionyl)phenyl)-1,1,3-trimethylindan-6-yl 2-hydroxyprop-2-yl ketone and 3-(4-(2-Hydroxy-2-m	None	None	None	None
Photoinitiator	None	None	None	None
UV Stabilizer	None	None	None	None
Hydroxyalkyl methacrylate	None	None	None	None
Triacrylate ester	None	None	None	None
Titanium dioxide	10 mg/m3 TWA	15 mg/m3 PEL Total dust. 15 MPPCF TWA Respirable fraction. 15 mg/m3 TWA Total dust. 50 MPPCF TWA Total dust. 5 mg/m3 TWA Respirable fraction.	None	None
Trimethylolpropane triacrylate	None	None	1 mg/m3 TWA (SKIN)	None

Engineering controls: Provide adequate local exhaust ventilation to maintain worker exposure below exposure limits.

Respiratory protection: Use NIOSH approved respirator if there is potential to exceed exposure limit(s).

Eye/face protection: Safety goggles or safety glasses with side shields. Full face protection should be used if the potential for splashing or spraying of product exists. Safety showers and eye wash stations should be available.

Skin protection: Use chemical resistant, impermeable clothing including gloves and either an apron or body suit to prevent skin contact. Neoprene gloves.

9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

Physical state:	Liquid
Color:	Black
Odor:	Acrylic
Odor threshold:	Not available.
pH:	Not available.
Vapor pressure:	Not available.
Boiling point/range:	Not available.
Melting point/ range:	Not available.
Specific gravity:	1.1
Vapor density:	Not available.
Flash point:	> 93.3 °C (> 199.94 °F)
Flammable/Explosive limits - lower:	Not available.
Flammable/Explosive limits - upper:	Not available.
Autoignition temperature:	Not available.
Flammability:	Not applicable
Evaporation rate:	Not available.

Solubility in water:	Not available.
Partition coefficient (n-octanol/water):	Not available.
VOC content:	< 1 %
Viscosity:	Not available.
Decomposition temperature:	Not available.

10. STABILITY AND REACTIVITY

Stability:	Stable under normal conditions of storage and use.
Hazardous reactions:	None under normal processing. Polymerization may occur at elevated temperature or in the presence of incompatible materials.
Hazardous decomposition products:	Oxides of carbon. Oxides of nitrogen. Irritating organic vapours.
Incompatible materials:	Strong reducing agents. Free radical initiators. Inert gases. Oxygen scavengers. Strong oxidizing agents. Amines, strong alkalis Reactive metals. Acids and bases. Iron. Rust. Copper. Copper alloys. Peroxides.
Reactivity:	Not available.
Conditions to avoid:	Extremes of temperature and direct sunlight. Heat, flames, sparks and other sources of ignition. Store away from incompatible materials. UV light. Avoid dust formation. High concentration of airborne dust may form explosive mixture with air.

11. TOXICOLOGICAL INFORMATION

Relevant routes of exposure:	Skin, Inhalation, Eyes, Ingestion
-------------------------------------	-----------------------------------

Potential Health Effects/Symptoms

Inhalation: Inhalation of vapors or mists of the product may be irritating to the respiratory system. May cause respiratory tract irritation.
Skin contact: Causes skin irritation. May cause allergic skin reaction.
Eye contact: Causes serious eye irritation.
Ingestion: May cause gastrointestinal tract irritation if swallowed.

Hazardous Component(s)	LD50s and LC50s	Immediate and Delayed Health Effects
Aliphatic Urethane Acrylate Oligomer	None	No Data
Aliphatic Urethane Acrylate Oligomer	None	No Data
Acrylate ester	None	Irritant, Allergen
Mixture of less 3-(4-(2-Hydroxy-2-methylpropionyl)phenyl)-1,1,3-trimethylindan-6-yl 2-hydroxyprop-2-yl ketone and 3-(4-(2-Hydroxy-2-m	None	No Data
Photoinitiator	None	No Records
UV Stabilizer	None	No Data
Hydroxyalkyl methacrylate	Oral LD50 (Rat) = 11.2 g/kg Oral LD50 (Rat) = 5,050 mg/kg	Irritant, Allergen
Triacrylate ester	None	Allergen, Irritant
Titanium dioxide	Inhalation LC50 (Rat, 4 h) = > 2.28 mg/l Inhalation LC50 (Rat, 4 h) = > 6.82 mg/l Inhalation LC50 (Rat, 4 h) = > 3.56 mg/l	Irritant, Respiratory, Some evidence of carcinogenicity
Trimethylolpropane triacrylate	None	Irritant, Allergen

Hazardous Component(s)	NTP Carcinogen	IARC Carcinogen	OSHA Carcinogen (Specifically Regulated)
Aliphatic Urethane Acrylate Oligomer	No	No	No
Aliphatic Urethane Acrylate Oligomer	No	No	No
Acrylate ester	No	No	No
Mixture of less 3-(4-(2-Hydroxy-2-methylpropionyl)phenyl)-1,1,3-trimethylindan-6-yl 2-hydroxyprop-2-yl ketone and 3-(4-(2-Hydroxy-2-m	No	No	No
Photoinitiator	No	No	No
UV Stabilizer	No	No	No
Hydroxyalkyl methacrylate	No	No	No
Triacrylate ester	No	No	No
Titanium dioxide	No	Group 2B	No
Trimethylolpropane triacrylate	No	Group 2B	No

12. ECOLOGICAL INFORMATION

Ecological information: Not available.

13. DISPOSAL CONSIDERATIONS

Information provided is for unused product only.

Recommended method of disposal: Follow all local, state, federal and provincial regulations for disposal.

Hazardous waste number: Not a RCRA hazardous waste.

14. TRANSPORT INFORMATION

The transport information provided in this section only applies to the material/formulation itself, and is not specific to any package/configuration.

U.S. Department of Transportation Ground (49 CFR)

Proper shipping name: Not regulated
Hazard class or division: None
Identification number: None
Packing group: None

International Air Transportation (ICAO/IATA)

Proper shipping name: Environmentally hazardous substance, liquid, n.o.s. (Dodecyl acrylate, Reaction mass of pentamethyl-4-piperidylsebacates)
Hazard class or division: 9
Identification number: UN 3082
Packing group: III

Water Transportation (IMO/IMDG)

Proper shipping name: ENVIRONMENTALLY HAZARDOUS SUBSTANCE, LIQUID, N.O.S. (Dodecyl acrylate, Reaction mass of pentamethyl-4-piperidylsebacates)
Hazard class or division: 9
Identification number: UN 3082
Packing group: III
Marine pollutant: Dodecyl acrylate, Reaction mass of pentamethyl-4-piperidylsebacates

15. REGULATORY INFORMATION**United States Regulatory Information**

TSCA 8 (b) Inventory Status: All components are listed as active or are exempt from listing on the Toxic Substances Control Act (TSCA) inventory.
TSCA 12 (b) Export Notification: None above reporting de minimis
CERCLA/SARA Section 302 EHS: None above reporting de minimis.
CERCLA/SARA Section 311/312: Immediate Health, Delayed Health
CERCLA/SARA Section 313: None above reporting de minimis.
California Proposition 65: This product contains a chemical known in the State of California to cause cancer. This product contains a chemical known to the State of California to cause birth defects or other reproductive harm.

Canada Regulatory Information

CEPA DSL/NDL Status: One or more components are not listed on, and are not exempt from listing on either the Domestic Substances List or the Non-Domestic Substances List.

16. OTHER INFORMATION

This safety data sheet contains changes from the previous version in sections: First issue.

Prepared by: Product Safety and Regulatory Affairs

Issue date: 09/14/2020

DISCLAIMER: The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. However, Henkel Corporation and its affiliates ("Henkel") does not assume responsibility for any results obtained by persons over whose methods Henkel has no control. It is the user's responsibility to determine the suitability of Henkel's products or any production methods mentioned herein for a particular purpose, and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and persons against any hazards that may be involved in the handling and use of any Henkel's products. In light of the foregoing, Henkel specifically disclaims all warranties, express or implied, including warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Henkel's products. Henkel further disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits.

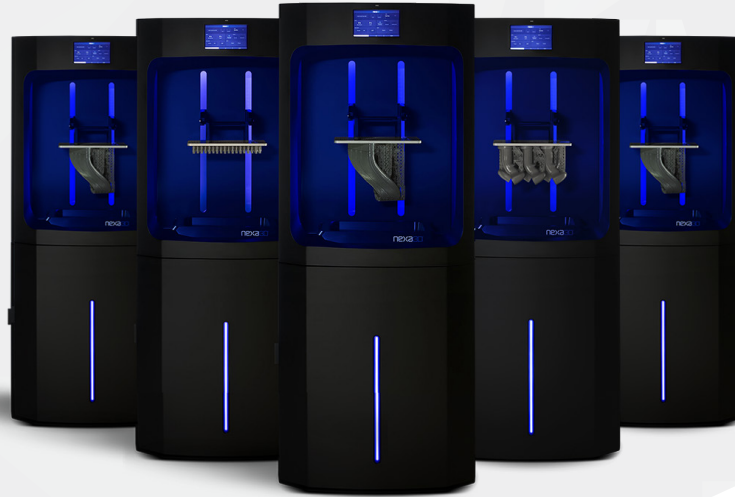
This Safety Data Sheet has been generated based on OSHA Hazard Communication Standard (29 CFR 1910.1200) and provides information in accordance with U.S. federal law only. No warranty or representation of any kind is given with respect to the substantive or export laws of any other jurisdiction or country. Please confirm that the information provided herein conforms to the substantive export or other law of any other jurisdiction prior to export. Please contact Henkel Product Safety and Regulatory Affairs for additional assistance.

Anexo D

NXE 400 3D Printer is Breaking Additive Industry Productivity Performance and Cost Barriers



NXE 400 3D printer delivers best in breed print size, volume and speed at the lowest cost of ownership, making it ideal for series production and same day on-demand parts and prototypes.



See what the World's Fastest Industrial 3D Printer can Do For Your Business

NXE 400

With an unprecedented 16L build volume measuring 10.8 in x 6.3 in x 15.7 in (27.5 cm x 15.5 cm x 40 cm), intelligent optimization, and Nexa3D's revolutionary patented LSPc technology, the NXE 400 is the perfect printer for any application.

2.5x Larger Build Volume

The NXE 400 features more than double the build volume compared to currently available technologies, allowing for much larger parts, higher part throughput, and ultimately lower part cost, all with the higher-resolution pixels (75 µm) and isotropic prints.

Manufacturing Ready + Modular Design

In addition to our highly reliable LSPc technology, the NXE 400 is crafted to be completely modular in design for easily interchangeable parts and technology upgrades eliminating hardware obsolescence.

Next-Gen Software + Predictive Service

Nexa3D's internally developed intelligent software connects our hardware and materials together into a powerful, user friendly system while providing a new era of predictive and prescriptive service. It's as simple as pressing CTRL+P.

Maximize Part Quality and Yield

The NXE 400 is the next scalable manufacturing solution with additional washing and curing units capable of handling even the largest 16L parts on a single tray making the NXE 400 the most advanced printing solution in its class. The washing and curing units are also capable of handling both single large prints and a combination of smaller parts with multiple trays to create finished parts in a matter of minutes in what would normally take hours with today's available technologies reducing labor costs and post processing times.

Smart and Connected

Our software tools, include validated workflows that are coded into our digital thread and include intuitively guided print prep and execution system. Machine learning and vision provide adaptive print process and real-time monitoring for optimal yield and quality. Our validated workflows include material and geometry specific prescribed wash and cure cycles.

[Book your live demo now](#)
[Get your sample part here](#)



Validated Post Process Tools And Processes

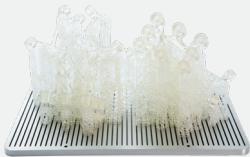
Nexa3D’s xCure consistently and rapidly unlocks the full potential of your 3D prints regardless of size or complexity. xCure optimizes the curing of all resin-based parts to ensure consistent dimensional accuracy, robust structural integrity, and stronger molecular structures. It accommodates parts as large as 16 liters in volume. The chamber can hold up to three build plates at once and allows parts to cure directly on the build plate or be placed in a basket and cured individually. xCure’s Perfect Part Optimization process consists of dual wavelength LEDs, multi-build plates, and parallel UV and thermal processing. xCure’s validated end to end workflows drive the perfect balance of temperature, UV wavelength, and material-specific sequences to deliver the perfect cure. These optimal and effective curing cycles guarantee consistent mechanical properties and predictable part performance. The net result is, less post-processing time, faster time to market, better part performance, increased 3D printing productivity and of course – the perfect part.

Specifications

Single click – rotate and push operation	External Dimensions (WDH) 21"x20"x32" 53.34x50.80x 81.28cm
Validated resin pre-setts for consistent part curing results	Internal Dimensions (WDH) 15.50"x 10.75"x25.75" 39.37x 27.30x65.40cm
30-60C heating capacity with 1C increments	Weight 110lbs (empty) 49.89 kg (empty)
6 dual wavelength 365 + 405 nm LEDs	US 100-120 VAC 60 HZ
Total input power of 360W ensures quick and efficient cycles	EU 200-240 VAC 50 HZ

Performance Photoplastics For Series Production

Nexa3D offers an expanding range of high impact functional materials for the NXE 400 3D printer that are tailored to unleash performance and productivity by taking 3D printing from dial-up internet to broadband speed, making our solutions ideal for series production and same day prototypes.



xGPP-Translucent

Fast, medium-viscous resin suitable for translucent, rigid, multipurpose high performance parts. Parts produced with this resin show no water uptake and low shrinkage. xGPP Translucent is great for demo parts, large parts, performance prototypes, fluid flow models, electrical casings, functional enduse parts and snap parts.



xGPP-Gray

Tailored to provide great surface finish and incredibly true to design details, the xGPP-Gray is ideal for texture reach models. With matt finish and high accuracy this resin will provide great visualization of fine structures and features. Ideal for visual models and rapid prototype parts.



xCE-White

High performance polymer for producing end-use plastic parts and injection molding tools in minutes. Nexa3D's new material is the fastest single cure polymer boasting higher flexural strength compared to those typically achieved only in dual cure cyanate ester resins. xCE-White has excellent isotropic properties and exhibit long-term environmental stability.



xCE-Black

High performance polymer for producing end-use plastic parts and injection molding tools in minutes. Nexa3D's new material is a single cure polymer that delivers higher flexural strength compared to those typically achieved only in dual cure cyanate ester resins. xCE-Black has excellent isotropic properties and exhibit long-term environmental stability.



3843 xABS black

High performance, high modulus material that boasts excellent flexural and tensile physical properties with a relatively high degree of elongation. 3843-ABS-Black is a low-shrinkage and high toughness material, enabling it to print accurately and function in a wide variety of applications including robotics and automation machinery, vehicle components, and end-use parts.



xMED412

xMED412 is polypropylene-like material that is ideal for manufacturing a variety of biocompatible, medical and wearable devices. xMED412 is based on Henkel's Loctite® MED412 material and is covered by all of its associated clearances, tests and certifications.

Printer Hardware

Build Volume (xyz)	275 x 155 x 400mm (10.8 x 6.1 x 15.7 inch)
Pixel Pitch	76.5 μm (0.0030 in)
Build Materials	UV Curable Plastics: xGPP-Blue, xGPP-Transparent, xGPP-Gray, xABS-HT-Orange, 3843-ABS-Black, xCE-Black, xMED, xCAST
Max Resolution	4K (3840 x 2160)
Wavelength	405 nm
Material Packaging	5kg jerry can

Operating Environment	
Air Temperature	20-25°C (60-80°F)
Electrical	NA Version : 100-120 VAC, 50/60 Hz, Single Phase, 8A (NEMA 15-5R) EU Version: 210-230 VAC, 50/60 Hz, Single Phase, 4A (CEE 7/7)
Humidity	RH below 70%

Dimensions (WxDxH)	
3D Printer crated	990 x 990 x 1905mm (39 x 39 x 75 inch)
3D Printer uncrated	710 x 710 x 1675 mm (28 x 28 x 66 inch)

Weight	
3D Printer crated	250 kg (550lb)
3D Printer uncrated	160kg (350lb)
Materialise MagicsPrint for Nexa3D Software	Full featured toolset including auto aorientation and nesting, auto support generation, mesh repair wizard, and part editing
NexaX v1 Software	Easy build processing and Remote Printer Management: submission and queues, job statistics.
Connectivity	GigaBit Ethernet RJ-45 & WiFi Interface
Client Hardware Recommendation	<ul style="list-style-type: none"> - 3 GHz multiple core processor with 16+ GB RAM - NVIDIA GTX 1060 or AMD Radeon RX 480 or better graphics with 4+ GB RAM - 3 GB available HDD space, additional 10GB for files / cache
Client Operating System	Windows 10, 64bit
Input Data File Formats Supported	.stl, .3mf
Post-Processing	Ships with basic part finishing tools accessory kit. <ul style="list-style-type: none"> - Max build requires wash basin & cure chamber with 300 x 180 x 480mm (12 x 7 x 19 in) capacity - Requires UV curing unit capable of > 2mW/cm² and 60°C (ideal 20mW/cm² and up to 120°C)

Note: Not all products and materials are available in all countries – please consult your local sales representative for availability

Performance Photoplastics

Properties	xGPP-Translucent	xGPP-Gray	xCE- White	xCE Black	3843-ABS-Black	xMED412
Viscosity at RT (cps)	1063	364	409	386	826	637
Color	Clear	Gray	White	Black	Black	Clear
Liquid Density	1.06	1.12	1.12	1.12	1.16	1.06
Package Size	5kg	5kg	5kg	5kg	5kg	5kg
Layer Thicknesses	100μm	50, 100μm	100, 200μm	100μm	100μm	100μm
Tensile Strength, Ultimate (MPa) ASTM D638	60	30	80	69	60	38
Elongation at Break	5.5%	4%	8%	8%	47%	141%
Flexural Strength (MPa) ASTM D790			135	135	80.6	37.6
Flexural Modulus (MPa)			3250	3250	1860	1022
Hardness (shore D) ASTM D2240	88	84	90	89	86	74.7
Impact, Notched Izod (J/m) ASTM D256			20	20	53.8	42.6
Heat Deflection Temperature @ 0.45 Mpa ASTM D648	61°C	59°C	120°C	120°C	80°C	40°C
Glass Transition (Tg)		93°C	129°C	128°C		
Water adsorption	0.4%		0.38%	0.63%	2.35%	0.36%
Description	Prototyping Material	Aesthetic models	High temperature & strength	High temperature & strength	High Toughness	Medical Grade

Warranty/Disclaimer: The performance characteristics of these products may vary according to product application, operating conditions, material combined with, or with end use. Nexa3D makes no warranties of any type, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability or fitness for a particular use.

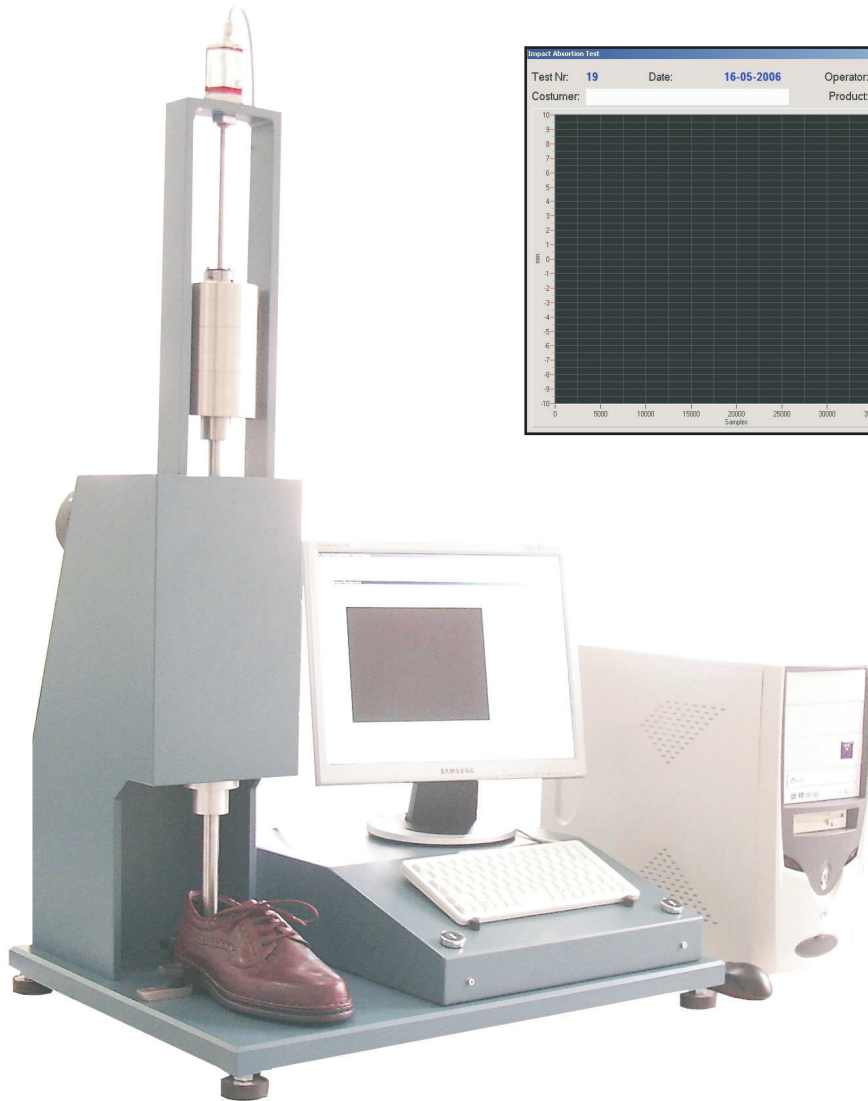
Anexo E

LABORATORY EQUIPMENTS



Made in EU

Pegasil[®] by **ZIPOR**



Shock absorption tester

EL-44

Standards: SATRA TM142

Commercial Services:
Tel.: +351.256 831 411
Fax: +351.256 831 412

ZIPOR - Equipamentos e Tecnologia Industrial, S.A.

email: pegasil@zipor.com

Technical Services:
Tel.: +351.256 888 240
Fax: +351.256 888 121

LABORATORY EQUIPMENTS

Shock absorption tester

Principle:

This test equipment has the purpose to evaluate the shock absorption properties of materials or assemblies. The test method is essentially applicable to footwear bottom units of complete footwear, however can also be used with any compressible sheet materials, namely those used for footwear midsoles and solings.

Description:

During the test an impact striker with suitable mass and design is dropped vertically from a determined height in way to subject the specimen to a standard impact. The integrated computer monitor system automatically assesses and records the following values:

- . Specimen thickness ;
- . Maximum penetration ;
- . First rebound ;
- . Energy return ;
- . Maximum deceleration.

All the performed tests are automatically stored in the software database together with the operator, client and product identification.

Supplied with:

Operating instructions ; conformity / calibration certificate

Standards:

SATRA TM142

Power Consumption:

400 Watts

Noise:

62 db

Power Supply:

220 V.ac - 50/60 Hz

Commercial Services:

Tel.: +351.256 831 411

Fax: +351.256 831 412

ZIPOR - Equipamentos e Tecnologia Industrial, S.A.

email: pegasil@zipor.com

Technical Services:

Tel.: +351.256 888 240

Fax: +351.256 888 121

Anexo F

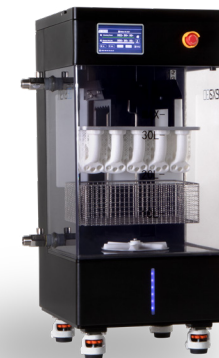
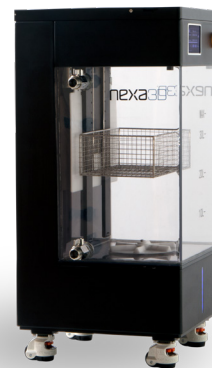
xWASH

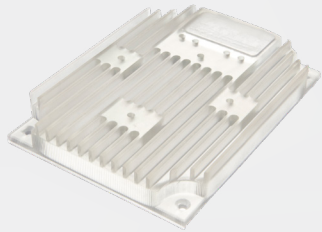
Nexa3D's xWASH matches the build volumes and process requirements of the ultrafast NXE400 3D printer, and is engineered for Nexa3D's photoplastic materials, giving manufacturers a **powerful, consistent, and sustainable washing solution**.

The xWASH is optimized for and validated with **Nexa xClean**, which offers 3X saturation limits, environmentally friendly recycling options, and enhanced chemical/flash-point safety characteristics.

The xWASH directly accommodates the full NXE400 build volume, accepts **up to two NXE400 build platforms simultaneously** for streamlined post-processing workflow, or the option of a loose parts basket for production flexibility; it can also accept the full NXE400 build volume. Bi-directional agitation with variable speeds ensures efficient cleaning regardless of part geometry, and an adjustable cleaning timer allows optimized cleaning time based on part geometry and resin type. **Dedicated drain and fill ports** facilitate easy maintenance; a pot life timer notifies when the cleaner has reached saturation limits. A tritan plastic reservoir provides **clear process and cleaner level viewing**, and provides **maximum durability** for production environments.

The ability to **automatically raise and lower the Z-axis** with a secondary lid/cover provides an extra safeguard from chemical exposure, and reduces solvent evaporation. A **touch screen** user interface makes it easy to set bath cleaning duration, agitation speed/direction, and cleaner useful life.





Key Features

SIMPLE OPERATION

Touch screen user interface with color display

EFFICIENT

Bidirectional magnetic stirrer agitation with variable speeds

CONVENIENT

Accepts 2x NXE400/NXD200 build platforms, and/or loose parts basket

FUNCTIONAL

35L Tritan reservoir with drain/fill ports

INTUITIVE WORKFLOW

Adjustable cleaning cycle timer and cleaner saturation timer

SUSTAINABLE

Reduce cost and environmental impact with Nexa xCLEAN part washing solution

Technical Data

Overall Dimensions

L x W x H: 400 x 420 x 860mm

Weight 60kg (wet)

Reservoir Capacity: 35L

Maximum part capacity

L x W x H 275 x 155 x 400mm

Weight 7kg

Agitation Method Magnetic impeller, variable speed

Power Supply 110-240VAC 50/60Hz

Recommended Operating Temperature +10 °C to +40 °C (+50 °F to +104 °F)

Anexo G



xCURE Post Curing System

Nexa3D's xCURE consistently and rapidly unlocks the full potential of your 3D prints regardless of size or complexity. xCURE optimizes the curing of all resin-based parts to ensure consistent dimensional accuracy, robust structural integrity, and stronger molecular structures. It accommodates parts as large as 16 liters in volume. The chamber can hold up to three build plates at once and allows parts to cure directly on the build plate or be placed in a basket and cured individually. xCURE's Perfect Part Optimization process consists of dual wavelength LEDs, multi-build plates, and parallel UV and thermal processing. xCURE's validated end to end workflows drive the perfect balance of temperature, UV wavelength, and material-specific sequences to deliver the perfect cure. These optimal and effective curing cycles guarantee consistent mechanical properties and predictable part performance. The net result is, less post-processing time, faster time to market, better part performance, increased 3D printing productivity and of course – the perfect part.

Key Features

SIMPLE OPERATION

LCD screen interface with a rotary knob and push operation

EFFICIENT

365+405 nanometer wavelength LED's deliver a broad spectrum of Nexa3D resin initiator coverage

MAXIMUM COVERAGE

6 LED strips that provide 360° of coverage with reflective interior to optimize uniformity

INTUITIVE WORKFLOW

Resin profile pre-settings for Nexa3D resins, as well as custom user input option

UPGRADEABLE

Updates can be done with a file, a computer and USB cable

CONVENIENT

Part loading flexibility: option to load loose parts on a shelf or parts printed on a build plate

FUNCTIONAL

Operation options: light only, heat only, or light and heat combination



Specifications

Single click – rotate and push operation	External Dimensions (WDH) 21"x20"x32" 53.34x50.80x 81.28cm
Validated resin pre-setts for consistent part curing results	Internal Dimensions (WDH) 15.50"x 10.75"x25.75" 39.37x 27.30x65.40cm
30-60C heating capacity with 1C increments	Weight 110lbs (empty) 49.89 kg (empty)
6 dual wavelength 365 + 405 nm LEDs	US 100-120 VAC 60 HZ
Total input power of 360W ensures quick and efficient cycles	EU 200-240 VAC 50 HZ