



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Rui Moreira Lopes

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLDADURA POR
ULTRASSONS EM TECIDO POLIMÉRICO**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na
Especialidade de Produção e Projeto orientada pelo Professor Doutor José Domingos
Moreira da Costa e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2022

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Comportamento Mecânico de soldadura por Ultrassons em tecido polimérico

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto.

Mechanical Behavior of Ultrasound Welding in Polymeric Fabric

Autor

Rui Moreira Lopes

Orientadores

Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa
Joaquim Fernando Fernandes Neto

Júri

Presidente Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa
Professor Associado c/ Agregação da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho
Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa
Professor Associado c/ Agregação da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional

WONDERMAC
Innovative Solutions, Lda

Wondermac-Innovative
Solutions, Lda.

Coimbra, Julho, 2022

“Have great hopes and dare to go all out for them. Have great dreams and dare to live them. Have tremendous expectations and believe in them.”

Norman Vincent Peale

Aos meus pais e meu irmão.

Agradecimentos

O meu sincero agradecimento, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste capítulo da minha vida, em especial:

À minha família, em especial aos meus pais e irmão, pelo apoio, coragem, compreensão que me deram ao longo destes últimos anos. Não há palavras para vos agradecer o amor que sempre me deram.

Ao Professor José Domingos, por toda a dedicação, disponibilidade, motivação e transmissão de conhecimentos ao longo deste curto, mas árduo percurso, o meu profundo agradecimento.

À empresa *Wondermac*, em especial ao Sr. Fernando e ao Rafael, pela contribuição, dedicação e apoio para o desenvolvimento deste projeto, e pela oportunidade de envolvimento numa área tão interessante e especial que é a soldadura por Ultrassons.

A todos os meus colegas de curso por fazerem parte desta longa jornada, em especial ao grupo *Oh Boy* e ao *The Hood*, por todas as aventuras e bons momentos que passamos por este nosso percurso académico. Mas de todos eles, um agradecimento especial, ao Ginho, à Cátia e ao Rui. A vocês um OBRIGADO do fundo do coração por todos os momentos difíceis que me ajudaram a ultrapassar, pela palavra amiga que sempre me deram em situações de maior tristeza e força necessária para as ultrapassar, e pelos momentos únicos que passamos desde o primeiro dia.

A vocês um obrigado do fundo do coração.

Resumo

A Soldadura por Ultrassons (SUS), é um processo de união de materiais, desde polímeros até aos metais, que ocorre no estado sólido, por vibração de alta frequência dos materiais a unir e aplicação de pressão. Este método destaca-se dos diversos processos de união por não ser necessária a adição de material de adesão, por ser um processo limpo, livre de poluição e pela capacidade de unir materiais de diferentes origens.

Estando inserido numa empresa (*Wondermac-Innovative Solutions Lda.*), cujo ambiente industrial passa pelas diferentes técnicas de união de diversos materiais presentes no mercado, o objetivo desta dissertação passa pela caracterização mecânica de soldaduras por ultrassons em tecido polimérico, à base de Polipropileno (PP).

Ao longo deste relatório, foram estudados diferentes parâmetros de soldadura, recorrendo uma prensa ultrassónica servo-elétrica. De modo a avaliar e interpretar a sua influência na qualidade da soldadura, consideraram-se diversas variáveis, nomeadamente, a distância de soldadura, a força de ativação das vibrações ultrassónicas, e a existência de padrões.

Para tal, realizaram-se vários ensaios mecânicos, designadamente: dois ensaios de tração, um do tipo *pull* e outro do tipo *peel*, um ensaio de fadiga e uma posterior análise das zonas de rotura por microscopia eletrónica de varrimento (MEV).

Concluiu-se que a utilização de uma geometria do padrão com uma área de ligação entre a zona-soldada e material-base maior, em conjunto com uma distância de soldadura e força de ativação razoavelmente elevada, é possível obter uma soldadura com uma resistência satisfatória para ambas as solicitações testadas.

Palavras-chave: Soldadura por Ultrassons, Tecido Polimérico, Polipropileno, Prensa Ultrassónica, Ensaios Mecânicos, Processos de União, MEV.

Abstract

Ultrasound Welding (SUS) is a process of joining materials, from polymers to metals, which occurs in the solid state, by high-frequency vibration of the materials to be joined and application of pressure. This method stands out from the various joining processes because it is not necessary to add adhesion material, because it is a clean, pollution-free process and because of the ability to join materials from different origins.

Being part of a company (*Wondermac-Innovative Solutions Lda.*), whose industrial environment involves the different joining techniques of different materials present on the market, the objective of this dissertation is the mechanical characterization of ultrasound welding in polymer fabric, based on Polypropylene (PP).

Throughout this report, different welding parameters were studied, using a servo-electric ultrasonic press. In order to evaluate and interpret its influence on the quality of the weld, several variables were considered, namely the welding distance, the activation force of the ultrasonic vibrations, and the existence of weld geometry.

To this end, several mechanical tests were carried out, namely: two traction tests, one of the pull type and the other of the peel type, a fatigue test and a subsequent analysis of the failure zones by scanning electron microscopy (*SEM*).

It was concluded that the use of a pattern geometry with a larger area of connection between the welded-zone and the base material, together with a reasonably high welding distance and activation force, it is possible to obtain a weld with a satisfactory strength. for both tested requests.

Keywords: Ultrasonic Welding, Polymeric Fabric, Polypropylene, Ultrasonic Press, Mechanical Tests, Joining Processes.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xii
Simbologia e Siglas	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas e Acrónimos.....	xiv
1. Introdução.....	1
1.1. Motivações e Objetivos	1
1.2. <i>Wondermac – Innovative Solutions Lda.</i>	1
1.3. Organização da Dissertação	2
2. Estado da Arte	3
2.1. Polipropileno (TNT-Tecido não tecido)	3
2.1.1. Processos de fabrico	4
2.2. Processos de União	6
2.2.1. Soldadura a <i>Laser</i>	6
2.2.2. Soldadura por Altas Frequências	7
2.2.3. Soldadura por Infravermelhos	8
2.2.4. Soldadura por Gás Quente	9
2.2.5. Soldadura a Quente.....	10
2.3. Soldadura por Ultrassons	11
2.3.1. Equipamento	12
2.3.2. Parâmetros da Máquina	15
2.3.3. Controlo de qualidade.....	18
2.3.4. Vantagens do Processo de SUS	19
2.3.5. SUS em TNT's	20
3. Procedimento Experimental	23
3.1. Caraterização e Preparação do Material e Equipamento Utilizado	23
3.1.1. Caraterização do material	23
3.1.2. Caraterização da máquina de soldaduras por ultrassons	24
3.1.3. Parâmetros estudados	26
3.1.4. Plano de ensaios	29
3.2. Preparação dos provetes e realização da soldadura	31
3.3. Ensaio de tração	33
3.4. Ensaio de fadiga	34
4. Apresentação e Discussão de Resultados	35
4.1. Comportamento à tração	35
4.1.1. Primeira fase dos ensaios.....	36
4.1.2. Segunda fase dos ensaios.....	42
4.2. Comportamento à fadiga.....	47
4.3. Análise das superfícies de rotura por MEV	49
5. Conclusões.....	53

5.1. Sugestões para trabalhos futuros	54
Referências Bibliográficas	55
ANEXO A.....	59
ANEXO B.....	61
ANEXO C.....	63
ANEXO D.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Processo de SL, adaptado de <i>I. Jones & G.K. Stylios (2013)</i>	7
Figura 2.2. Processo de SAF, adaptado de <i>I. Jones & G.K. Stylios (2013)</i>	8
Figura 2.3. Equipamento de soldadura por Gás quente, adaptado de, <i>I. Jones & G.K. Stylios (2013)</i>	9
Figura 2.4. Processo de SUS, <i>adaptado de Dukane Cop.</i>	11
Figura 2.5. Exemplo de montagem do Conjunto Acústico e variações de amplitude, <i>stress</i> e movimento vibracional , adaptado de <i>Dukane Cop.</i>	12
Figura 2.6. Boosters para diferentes ganhos da marca <i>DUKANE.</i>	13
Figura 2.7. Tipos de Sonotrodo consoante o ganho, <i>adaptado de Dukane Cop</i>	14
Figura 2.8. Exemplo de uma montagem de componentes (Conjunto Acústico) de um aparelho da <i>DUKANE</i> , (<i>retirado e adaptado de www.Dukane.com</i>).....	15
Figura 2.9. Simulação de SUS, onde demonstra a distância de soldadura((a) ideal; (b) excessiva; (c) insuficiente)	18
Figura 2.10. Ensaio <i>Pull</i>	19
Figura 2.11. Ensaio <i>Peel</i>	19
Figura 2.12. Padrões de soldadura utilizados no estudo (retirado de Thanh-hai Nguyen <i>et al</i> (2020)).....	21
Figura 2.13. Relação entre valores de resistência à carga em solicitações do tipo <i>Peel</i> com relação de área(retirado de Thanh-hai Nguyen <i>et al</i> (2020))	21
Figura 2.14. Relação entre valores de tensão em solicitações do tipo <i>Peel</i> com relação de área(retirado de Thanh-hai Nguyen <i>et al</i> (2020)).....	21
Figura 3.1. TNT de 100 <i>g/m²</i> de Polipropileno.....	23
Figura 3.2. Prensa de Soldadura Ultrassónica <i>Dukane IQServo 43S220</i> , presente no laboratório da <i>Wondermac</i> , utilizada nas soldaduras.	24
Figura 3.3. Exemplo da tabela fornecida pelo software da máquina <i>IQ Servo 43S220</i>	24
Figura 3.4. Esquema de realização da primeira fase dos ensaios	29
Figura 3.5. Esquema de realização da segunda parte dos ensaios.....	30
Figura 3.6. Conjunto de chave, suportes e agarras <i>Dukane</i> , retirado de <i>dukane.com</i> a 13/05/2022.....	32
Figura 3.7. Dobra efetuada nas pontas dos provetes	33
Figura 3.8. Máquina de ensaios de fadiga Instron <i>ElectroPuls E10000</i>	34
Figura 4.1. Progressão dos ensaios realizados: a) Ensaio <i>Pull</i> b) Ensaio <i>Peel</i>	36

Figura 4.2. Valores médios da carga de rotura de cada conjunto de provetes na primeira fase dos ensaios <i>Pull e Peel</i>	37
Figura 4.3. Zona soldada, retirada de Thanh-hai Nguyen (2020)	40
Figura 4.4. Zona Soldada com o padrão A.....	41
Figura 4.5. Valores médios da carga de rotura para cada conjunto de provetes na segunda fase dos ensaios <i>Pull e Peel</i>	43
Figura 4.6. Gráfico de valores obtidos durante a realização dos ensaios de fadiga	48
Figura 4.7. Tecido após realização de soldadura; (a) vista frontal, (b) vista de trás	49
Figura 4.8. Material Base (a) ; Zona Soldada (b) ; ampliação da zona amarela (c).....	50
Figura 4.9. (a) Zona de Soldadura após rotura; (b)ampliação da zona a amarelo da Figura 4.7 (a) ; (c) ampliação da região a azul da Figura 4.7 (a)	51
Figura 5.1 Caraterísticas Geométricas do padrão A.....	61
Figura 5.2 Caraterísticas Geométricas do padrão B.....	63
Figura 5.3. Caraterísticas Geométricas do padrão C.....	65

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Diferentes Aplicações do TNT	4
Tabela 2.2. Produtos obtidos pela SAF	8
Tabela 2.3. Áreas utilizadas por SQ	10
Tabela 3.1. Propriedades físicas do Polipropileno (PP),	23
Tabela 3.2. Transdutor utilizado e suas características	25
Tabela 3.3. <i>Booster</i> utilizado e suas características	26
Tabela 3.4. Sonotrodo utilizado e suas características	26
Tabela 3.5. Padrões utilizados nas soldaduras. Área total = $20 \times 20 = 400 \text{ mm}^2$	27
Tabela 3.6. Valores da distância de soldadura e força de ativação das vibrações na primeira fase dos ensaios	29
Tabela 3.7. Identificação dos pares de parâmetros variados na primeira parte dos ensaios	30
Tabela 3.8. Identificação dos pares de parâmetros variados na segunda parte dos ensaios	31
Tabela 3.9. Valores Impostos nos ensaios de fadiga	31
Tabela 3.10. Valores de binário a aplicar através de uma chave de torque, consoante a frequência de vibração, adaptado de <i>Dukane</i>	32
Tabela 4.1. Valores dos parâmetros variados na primeira fase dos ensaios	37
Tabela 4.2. Dados referentes aos resultados da primeira fase de ensaios <i>Pull</i>	39
Tabela 4.3. Dados referentes aos resultados da primeira fase de ensaios <i>Peel</i>	39
Tabela 4.4. Classificação dos provetes na primeira fase dos ensaios <i>Pull</i> e <i>Peel</i>	41
Tabela 4.5. Conjuntos de parâmetros a fixar escolhidos	42
Tabela 4.6. Valores dos parâmetros variados na segunda fase dos ensaios	43
Tabela 4.7. Dados referentes aos resultados da segunda fase de ensaios <i>Pull</i>	44
Tabela 4.8. Dados referentes aos resultados da segunda fase de ensaios <i>Peel</i>	44
Tabela 4.9. Classificação dos provetes na segunda parte dos ensaios <i>Pull</i> e <i>Peel</i>	46
Tabela 4.10. Valores de carga aplicados nos ensaios de fadiga	47
Tabela 4.11. Dados sobre os ensaios de fadiga realizados	48

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

Ω – ohm

Hz – hertz

J – joule

K – kelvin

MHz – megahertz

V – volt

W – watt

cal – caloria

g – grama

kHz – quilohertz

kN – quilonewton

$kcal$ – quilocaloria

kg – quilograma

m – metro

mm – milímetros

mm/min – milímetros por minuto

s – segundo

μm – microns

Amp – amplitude

A_T – amplitude do transdutor

G_B – ganho do *booster*

G_S – ganho do sonotrodo

in – *inch*

ft – *feet*

lb – *pound*

ΔP – gama de carga aplicada

N_r – número de ciclos até à rotura

P_m – carga média

P_a – carga cíclica

R^2 – coeficiente de determinação

r – razão de carga

Siglas e Acrónimos

AWS – *American Welding Society*

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

PA – Poliamida

PE – Polietileno

PET – Poliéster

PP – Polipropileno

SAF – Soldadura por Altas Frequências

MEV – Microscopia eletrónica de varrimento

SGQ – Soldadura a Gás Quente

SL – Soldadura a Laser

SQ – Soldadura a Quente

SUS – Soldadura por Ultrassons

TNT – Tecido-não-tecido

TPU – Poliuretano Termoplástico

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivações e Objetivos

Hoje em dia, a necessidade de inovação nas diferentes técnicas de união de tecidos, tornou-se de grande importância no setor industrial. A constante atualização e desenvolvimento de tecidos sintéticos, com propriedades e utilizações únicas, levou a que as suas formas de união, fossem também atualizadas e aprimoradas consoante as suas necessidades.

A motivação para a realização desta dissertação, para além das necessidades acima referidas, deveu-se também à oportunidade de estabelecer um primeiro contacto com o mundo empresarial numa empresa representante de uma multinacional, líder na tecnologia de ultrassons, com diversas máquinas disponíveis nas suas instalações.

No processo de união dos tecidos através do processo de ultrassons, a possibilidade de variação de diferentes parâmetros dispensados na prensa utilizada, permitiu uma análise mais completa sobre a influência dos mesmos na qualidade da soldadura. Desta forma, foi efetuado um estudo paramétrico, com o objetivo de otimizar a resistência da soldadura no tecido testado.

Em suma, a presente dissertação tem como finalidade avaliar o comportamento mecânico do tecido soldado face à variação dos parâmetros da prensa ultrassónica utilizada.

1.2. *Wondermac – Innovative Solutions Lda.*

Fundada em agosto de 2019 por Rafael Neto, Fernando Neto e Alberto Correia, com sede em Lagoa, Vila Nova de Famalicão, a *Wondermac- Innovative Solutions Lda.*, conta com a parceria da marca *DUKANE*, como seu único representante oficial na Península Ibérica, na tecnologia de Ultrassons, e da empresa francesa *MATRELEC*, no ramo da soldadura por Altas Frequências.

Com uma vasta gama de máquinas indicadas para várias indústrias como, têxtil, automóvel, plásticos, embalagem, entre outras, esta empresa dedica-se principalmente à oferta de soluções para os diversos problemas de cariz industrial existentes no mercado.

Para além disso, a *Wondermac*, destaca-se pela sua vasta tecnologia de Ultrassons e de vulcanização de matérias plásticas. Juntamente com as marcas *DUKANE* e *MATRELEC*, detém o único laboratório de testes de soldadura de plásticos em Portugal.

1.3. Organização da Dissertação

O objetivo desta dissertação passa pelo estudo do comportamento mecânico de soldaduras obtidas por ultrassons em tecido polimérico.

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, sendo o primeiro a introdução.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica, no qual é introduzido o tecido polimérico a soldar, os métodos alternativos de união, bem como uma explicação mais detalhada do método adotado neste estudo e as suas vantagens em relação aos restantes.

No capítulo seguinte, é descrito o processo experimental realizado. Nesta parte pretende-se fazer uma apresentação dos procedimentos seguidos durante a realização das soldaduras na prensa ultrassónica, na preparação dos provetes e dos ensaios mecânicos realizados.

Posteriormente, são ainda apresentados os resultados obtidos nos testes das soldaduras, a sua interpretação e discussão dos mesmos.

Por último, o quinto capítulo, encontram-se sintetizadas as principais conclusões obtidas nesta dissertação, bem com a apresentação de propostas para trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

Com o passar do tempo, a necessidade de evolução, passou a ser um aspeto predominante na vida do homem. Essa necessidade, levou ao encontro de novas formas de a satisfazer, sendo uma delas a invenção de novos tecidos e formas de os unir.

Atualmente, grande parte dos tecidos utilizados provenientes de materiais naturais como algodão (têxteis convencionais), foram substituídos por tecidos de matriz polimérica. Estes também são chamados de Tecidos Não Tecidos (TNT).

Com esta invenção de tecidos de origens diferentes da usual, houve ainda a necessidade de alcançar uma forma diferente de tratamento e de processamento dos mesmos.

2.1. Polipropileno (TNT-Tecido não tecido)

TNT é um material semelhante a um tecido, obtido pela disposição aleatória de fibras de um polímero (geralmente o Polipropileno (PP)), que através de um tratamento térmico, químico ou mecânico, são unidas entre si (ASTM 123:2003). Por vezes, devido à baixa resistência mecânica deste material, estes são reforçados com aditivos e outros polímeros, de forma a melhorar o seu comportamento.

Este material é capaz de fornecer diversas funções como absorção, elasticidade, isolamento térmico, hídrico e acústico, filtragem/barreira bacteriana, entre outros. (Volkov, 2001). Estas funções são muitas vezes combinadas, levando à criação de tecidos com capacidades únicas e específicas de utilização.

Mais recentemente, devido a estas propriedades únicas, os TNT's têm sido desenvolvidos para múltiplas aplicações onde, em casos normais, os tecidos convencionais não eram colocados como uma opção de solução.

Em certas aplicações, é considerado um tecido mais ecológico, devido à sua capacidade de poderem ser reciclados, necessitando apenas de um tratamento e de um processamento próprio para tal.

A aplicação deste tipo de material pode ser classificada de acordo com o tempo de utilização como descartável ou reutilizável. Na Tabela 2.1 estão indicadas diversas aplicações de acordo com o tempo de utilização.

Devido a ser uma variante de um polímero, em conjunto com outros materiais, dá-nos a capacidade de criar diversos produtos com diversas propriedades, amplamente utilizadas nas áreas de medicina, engenharia, têxtil, entre outros.

Tabela 2.1. Diferentes Aplicações do TNT

TNT em aplicações descartáveis	TNT em aplicações reutilizáveis
Higiene (fraldas, cuidado feminino, etc)	Vestuário (de proteção, etc)
Medicina (Batas, máscaras, etc)	Calçado e artigos de couro
Lenços (de limpeza, de bebé, de cuidado pessoal, industriais, etc)	Mobiliário
	Construção (revestimento, isolamento, cobertura, etc)
	Agricultura
	Eletrónica e Automóvel

2.1.1. Processos de fabrico

Os TNT, consoante os diferentes tipos de processamento, conseguem destacar-se em diferentes propriedades mecânicas e químicas, tais como, resistência à tração, alongamento, rigidez, resistência química, entre outros, proporcionando um extenso leque de produtos que poderão ser usados em vários setores.

Os processos de formação do TNT, podem ser divididos em três áreas principais, tendo cada um as suas próprias aplicações:

- ***Dry-Laying***

O processo de *Dry-Laying*, teve a sua origem na produção de têxteis. Este processo é uma das técnicas mais antigas presentes no mercado. (A. Pourmohammadi, 2013).

Este prepara as fibras descontinuas, misturando e colocando-as numa espécie de manta de fibras em estado seco. Posteriormente, as fibras são apanhadas em forma de teias por lapidação paralela, cruzada ou formação aerodinâmica (ar) que por fim, com recurso a métodos mecânicos, hídricos, químicos e térmicos, fazem a ligação final. (S.J. Russell, 2007).

Tem como principais aplicações os produtos de higiene (fraldas, lenços, etc), têxtil médico e produtos de cuidado feminino.

- ***Wet-Laying***

No caso do processo de *Wet-Laying*, este assemelha-se ao processo de fabricação de papel, sendo que neste sistema, são utilizadas fibras sintéticas dispersas num líquido (W. Albrecht *et al* 2006), que posteriormente são dispostas em camadas. Este método é bastante usado em produções de grande escala de produtos, essencialmente descartáveis.

As aplicações de TNT fabricadas por este processo, vão desde as mais convencionais (Batas cirúrgicas, Toalhas, Produtos de Higiene, Lenços, etc) até aplicações técnicas (Revestimentos utilizados na construção, Filtros, Isolamentos, etc.) (S.J. Russell, 2007).

- ***Polymer-Laying***

O processo de *Polymer-Laying*, também conhecido por *Spun-Laying* ou *Spun-Melting*, é um processo que passa pela transformação de uma resina polimérica, numa teia de TNT. (A. Pourmohammadi, 2013).

A produção deste material passa pela extrusão de filamentos de polímeros (T. Karthik *et al*, 2017), que são convertidos diretamente numa teia, fazendo com que passos intermédios como a produção de fibras e outras não sejam necessários. Este torna-se mais rentável com uma possibilidade de produção elevada. (A. Pourmohammadi, 2013)

Existem quatro passos simultâneos na produção deste tipo de TNT: a extrusão dos filamentos, extensão do tecido, deposição e adesão.

Geralmente, os polímeros mais utilizados neste tipo de processo são o poliéster (PET), polipropileno (PP), polietileno (PE), poliuretano termoplástico (TPU) e a poliamida (PA). (S. J. Russel & P. A. Smith, 2016).

São bastante utilizados em áreas da indústria automóvel, civil, medicina e embalamento.

2.2. Processos de União

Ao longo da história, apesar dos largos avanços dos projetistas em fabricar uma peça num único molde, muitos produtos eram demasiado complexos para serem fabricados numa única peça (D. Grewell & A. Benatar, 2007).

No caso da união de tecidos, estes passavam pelos vários tipos de costura, que, em grande escala, se tornava um processo trabalhoso o que, conseqüentemente, levava a um aumento de custos. Para além dessas conseqüências, o processo de costura resultava na criação de furos no tecido, que em termos de resistência e impermeabilidade, afetavam negativamente a *performance* do produto em questão (A. Pourmohammadi, 2013).

Para combater esses problemas, principalmente para tecidos sintéticos como o TNT, vários processos de união de tecidos foram desenvolvidos e melhorados, dependendo da utilidade do produto em questão e dos tipos de produtos a serem unidos. Estes estão brevemente explicados abaixo.

2.2.1. Soldadura a *Laser*

O processo de Soldadura a *Laser* (SL) é conhecido por ser uma técnica rápida e facilmente automatizável (I. Jones *et al*, 2013).

A SL, para além da sua utilização na união de tecidos em componentes rígidos, tem também a capacidade de realizar a união entre tecidos convencionais e tecidos técnicos (TNT).

Este tipo de processo tem a possibilidade da adição ou não de um polímero de união, de forma a fornecer uma melhor precisão de posição de soldadura e da quantidade de calor aplicada na junta.

A capacidade do aquecimento ser proveniente do interior, permite um melhor acabamento superficial e retenção da flexibilidade do material (A. Pourmohammadi, 2013).

Este tipo de soldadura passa por três fases principais. Em primeiro lugar, pela aplicação de um material absorvente do *laser* na forma de um líquido de baixa viscosidade, de maneira a que este solidifique rapidamente formando uma fina camada desse material de adição. De seguida, é montada e fixada a junta a ser soldada. Por fim, o *laser* é transmitido

sobre a junta, que, com um comprimento de onda específico, funde o material absorvente, levando à soldadura do material. (Figura 2.1) (I. Jones *et al*, 2013).

Apesar deste processo ser vantajoso pela sua rapidez, facilidade de ser automatizada, um bom acabamento e capacidade de unir materiais de classes diferentes, tem a desvantagem de a zona da junta ter de ser necessariamente transparente à radiação *laser*. (A. Pourmohammadi, 2013).

Este método tem como principais aplicações aquelas onde exista uma necessidade de estanquidade em relação aos líquidos, como é o caso de roupas impermeáveis. (I. Jones *et al*, 2013).

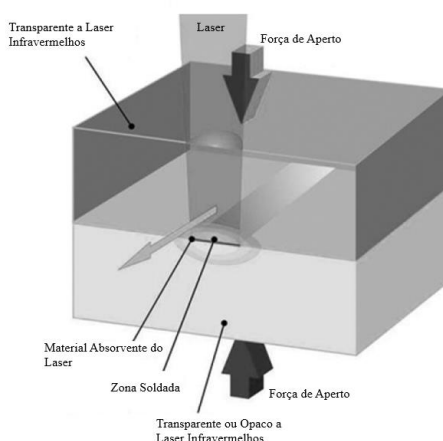


Figura 2.1. Processo de SL, adaptado de I. Jones & G.K. Stylios (2013)

2.2.2. Soldadura por Altas Frequências

A Soldadura por Altas Frequências (SAF), também chamada por Soldadura Dielétrica, tal como o nome indica, recorre a energia eletromagnética de elevada frequência levando a que esta gere calor no material, com recurso as suas propriedades elétricas. (I. Jones 2013)

Neste processo, o material a ser soldado deve ter a capacidade de:

- Conter macromoléculas polarizadas ou polarizáveis;
- Boa mobilidade de segmentos moleculares;
- Ocorrência de dipolos induzíveis.

Caso estas propriedades estejam presentes, logo após a aplicação do campo elétrico, a temperatura aumenta. Ocorre uma oscilação das moléculas, as suas forças de atração serão enfraquecidas e o seu movimento começará. (M. J. Troughton, 2008). Na Figura 2.2, está esquematizado o processo de SAF.

A SAF destaca-se pelo facto de ser um processo limpo, rápido, facilmente automatizado e controlado e pela capacidade da superfície aquecida realizar uma boa soldadura, sem que as superfícies restantes sejam afetadas.

Apesar de todas estas vantagens, este processo apresenta algumas condicionantes, tais como, o baixo leque de materiais que podem ser soldados (Poliuretano, fibras de PVC, etc), e não ser um processo contínuo, estando limitado à dimensão das placas de indução, que por norma não ultrapassam os 2 metros. (I. Jones, 2013).

A produção de embalagens, tanto na área de medicina, como noutras áreas, tem como principal utilização da SAF (Yussuf *et al*, 2002). Na Tabela 2.2, estão indicados algumas das aplicações deste processo.

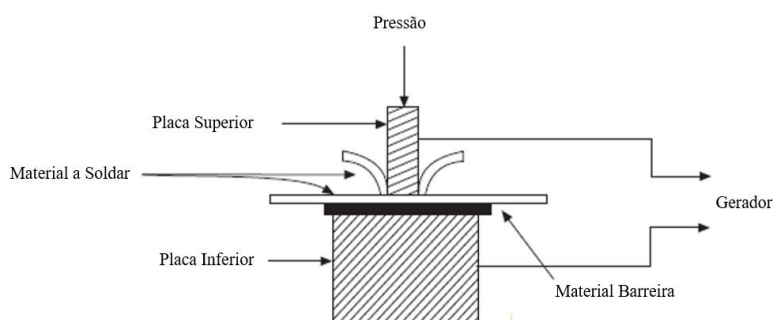


Figura 2.2. Processo de SAF, adaptado de I. Jones & G.K. Stylios (2013)

Tabela 2.2. Produtos obtidos pela SAF

Utilizações em Medicina	Utilizações noutras áreas
Sacos de Sangue, Sistemas de Separação de Sangue, entre outros.	Fatos de Radiação e HAZMAT
	Kits de sobrevivência
Sacos para drenagem de Urina, Colostomia e Enema	Luvas industriais
	Vestuário para chuva
Sacos de alimentação <i>in vitro</i>	Tendas, barcos insufláveis, tapetes transportadores

2.2.3. Soldadura por Infravermelhos

A Soldadura por Infravermelhos (SIF), tal como a Soldadura a *Laser*, é um método onde não ocorre o contacto (M. J. Troughton, 2008). É bastante utilizado quando se pretende uma soldadura de TNT à base de termoplásticos, como PP, PA, elastómeros, entre outros. (A. Pourmohammadi, 2013).

A radiação Infravermelha (IF) tem duas possibilidades de ser emitida. Pode ocorrer por um metal aquecido, ou por lâmpadas de infravermelhos.

Neste caso, quando a radiação IF é transmitida sobre o polímero, ocorrem três fenómenos: a reflexão, a transmissão e a absorção. A fusão do polímero ocorre devido ao fenómeno de absorção desta radiação.

Para além da qualidade de soldadura depender bastante da radiação transmitida, a capacidade de penetração desta depende também das características do material a ser soldado, como por exemplo, a capacidade de absorção da radiação do material.

A sua flexibilidade e rapidez, qualidade de soldadura, acabamento e ser desnecessário a utilização de superfícies de contacto a elevadas temperaturas, são algumas das vantagens deste processo. Em contrapartida, este não é adequado quando existe a necessidade de soldar materiais transparentes. Para essa situação, é utilizado um material absorvente dessa radiação entre as duas camadas, de forma a realizar a união entre as mesmas. (A. Pourmohammadi, 2013).

2.2.4. Soldadura por Gás Quente

A Soldadura por Gás Quente (SGQ), é um processo simples onde gás ou ar quente é utilizado para que ocorra a fusão dos materiais que se pretendem soldar, e em que rolos realizam pressão na junta soldada para completar a união, como descrito na Figura 2.3. (D. Grewell & A. Benatar, 2007).

É um processo bastante utilizado em produtos para assistência médica, e proteção pessoal. É também frequente a sua utilização em produtos onde a impermeabilidade é necessária. Para além disso, é destacada em aplicações onde seja necessário a realização de uma soldadura com grandes comprimentos (I. Jones, 2013).

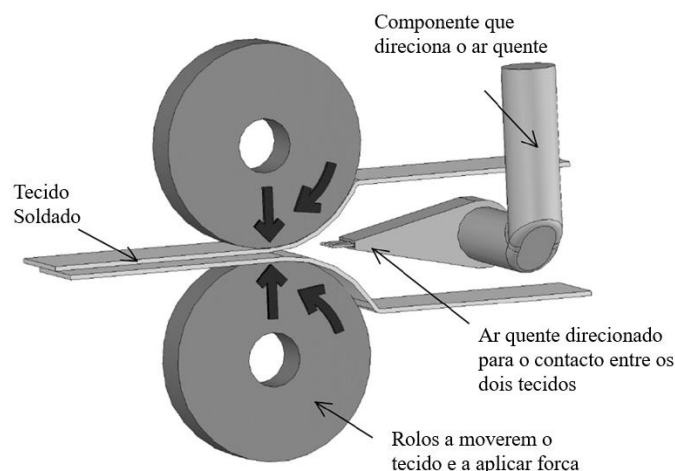


Figura 2.3. Equipamento de soldadura por Gás quente, adaptado de, *I. Jones & G.K. Stylios (2013)*

2.2.5. Soldadura a Quente

Em alternativa aos restantes métodos, onde a soldadura ocorria sem contacto, a Soldadura a Quente (SQ), faz uso de fontes de calor externas, tais como, barras aquecidas, rolos ou placas, em que estas fontes, numa combinação de pressão, temperatura, e velocidade, realiza a fusão dos materiais, para que a união dos mesmos possa ser concretizada (I. Jones, 2013).

Trata-se de um processo rápido que consegue realizar soldaduras a uma velocidade de vários metros por minuto quando utilizado rolos. (A. Pourmohammadi, 2013).

Na SQ, é bastante usual a utilização de uma película com uma temperatura de fusão mais baixa que o tecido ou material em questão, de forma a ocorrer uma melhor soldadura, sem comprometer as características e isolamento do mesmo.

Este tem como vantagens a sua elevada *performance* em termos de tempos de soldadura, o facto de ser uma técnica simples e aplicável a diversas combinações de materiais, baixos custos de utilização e de investimento inicial em equipamentos e uma vasta capacidade de aplicação em diversas áreas (Tabela 2.3). (M. J. Troughton, 2008).

Por outro lado, a sua dependência das propriedades dos materiais a soldar, como a condutividade térmica, condiciona bastante a sua utilização, não podendo realizar esse método em materiais onde a condutividade térmica seja baixa, ou até mesmo em materiais de espessura elevada. Além disso, a inconsistência de aquecimento e pressão em diferentes partes das fontes de calor, e a possível contaminação do processo com materiais presentes nas fontes, resultantes de soldaduras anteriores, pode condicionar a qualidade da soldadura. (I. Jones, 2013), (M. J. Troughton, 2008).

Tabela 2.3. Áreas utilizadas por SQ

Áreas	Aplicações
Têxtil	Vestuário sem-costura
Automóvel	Tecidos de tetos e assentos
Arquitetura	Isolamentos, Estruturas Insufláveis, Toldos, ...
Medicina	Batas, outros vestuários

2.3. Soldadura por Ultrassons

A Soldadura por Ultrassons (SUS), surgiu na década de 60 do século XX, primeiramente como uma forma de soldadura de cabos metálicos, mas após algum desenvolvimento, foi estendido também aos materiais plásticos. Este tipo de soldadura destaca-se pela sua capacidade de se realizar sem a necessidade de adição de material (H. Dubbel *et al*, 1994).

É um processo bastante usado em vários campos industriais, tais como, automóvel, aeroespacial, medicina e várias aplicações elétricas e eletrônicas. (D. Grewell *et al*, 2013).

A SUS utiliza o fenómeno de criação de calor, através da vibração. Esta, no caso da SUS, é obtida pela conversão da energia elétrica fornecida num movimento de elevada frequência mecânica, tendo como resultado a fricção na zona onde se pretende realizar a soldadura.

A ocorrência desta fricção, leva a um aumento de temperatura na zona onde ocorre o contacto que, conseqüentemente, faz com que os materiais em contacto fundam, provocando uma união molecular entre os mesmos. (I. Jones, 2013) .

Neste processo de soldadura, sumarizado por Benatar e Gutowski (1989), o sonotrodo (peça que transmite a vibração), entra em contacto com um dos materiais a serem soldados e ocorre uma aplicação de uma pressão. Após esse contacto, a vibração ultrassônica acontece, percorrendo todo o material, gerando a fricção pretendida e por consequência, a fusão do material na junta entre eles. Quando a vibração para, ocorre um tempo de fixação entre o sonotrodo e a peça a soldar, de modo a ocorrer a solidificação do material sem movimento das peças. De seguida, o sonotrodo sobe e a soldadura entre as peças é concluída. Este processo apresenta-se esquematizado na Figura 2.4.

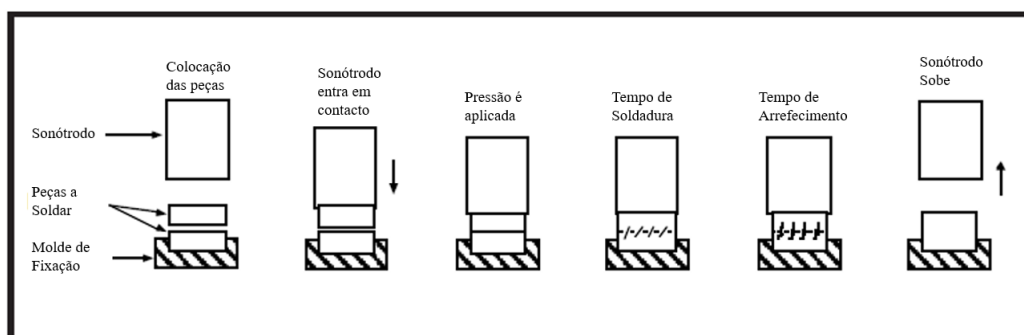


Figura 2.4. Processo de SUS, adaptado de Dukane Cop.

2.3.1. Equipamento

Um sistema de SUS baseia-se em quatro componentes principais (Froment, 1999)

- Gerador,
- Transdutor;
- *Booster*;
- Sonotrodo.

É ainda de salientar que é necessária uma prensa para alojar a montagem destes componentes (Transdutor-*Booster*-Sonotrodo, também chamado de Conjunto Acústico (Figura 2.8)) e um acessório para fixar as peças que se prende soldar (molde), para que seja possível realizar o processo de soldadura.

Na Figura 2.5., pode ser observada a montagem do conjunto acústico, com as respectivas variações de amplitude, tensão e movimento vibratório que ocorrem ao longo dos diferentes componentes, quando este é utilizado. É de notar que os pontos de ligação entre componentes são as zonas onde ocorre maior tensão. A amplitude do movimento vibratório com um valor entre 8 e 20 μm à saída do conversor piezoelétrico é modificada no *booster* e no sonotrodo. A geometria destes é seleccionada de modo a atingir-se, na face inferior do sonotrodo, o valor necessário para a realização da soldadura em cada material.

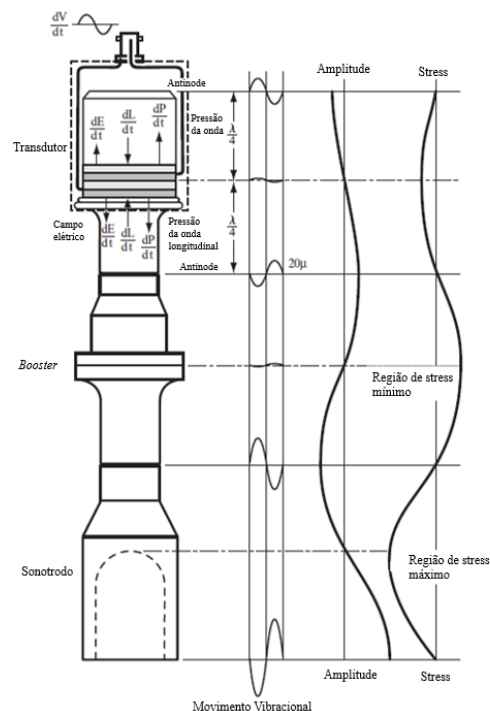


Figura 2.5. Exemplo de montagem do Conjunto Acústico e variações de amplitude, *stress* e movimento vibracional, adaptado de *Dukane Cop.*

O Gerador tem como função principal, a conversão de energia elétrica da rede (120-240 Volts (V), 50/60 Hertz (Hz)), em energia elétrica a que o sistema está destinado e designado a operar. As frequências mais comuns em que normalmente se trabalha são de 15, 20, 30, e 40 quilohertz (kHz). (Dukane, 2011).

Após a conversão da energia elétrica presente na rede, em energia elétrica destinada ao sistema, esta é enviada para o transdutor, que transforma essa energia elétrica, em energia mecânica, ou seja, em vibrações. (Dukane, 2011).

Este fenómeno é obtido pelos princípios de piezoelectricidade. Esta consiste na compressão de substâncias cristalinas de forma a gerar eletricidade ou polaridade elétrica.

Nos ultrassons ocorre a piezoelectricidade-inversa, ou seja, a energia elétrica é convertida em energia mecânica (vibrações ultrassônicas). (adaptado de https://stringfixer.com/pt/Piezoelectric_effect , a 29/06/2022)

Nos equipamentos de ultrassons, o *Booster* tem duas funções principais, servir de peça de ponte entre o transdutor e o sonotrodo, e aumentar ou diminuir a amplitude das vibrações (E. de Vries, 2004). Esse aumento ou diminuição de amplitude pode variar entre 0,5 e 2,5. Ou seja, um *Booster* 2 para 1 vai duplicar a amplitude das vibrações do transdutor para o sonotrodo, e uma 0,5 para 1 vai diminuir para metade. (Dukane, 2011).

Os *Boosters* podem ser fabricados de três tipos de materiais consoante as condições de operação. Podem ser em Titânio, quando existe a necessidade de um frequente ciclo de montagem e desmontagem do mesmo, que apesar de serem mais robustos para aguentar esses ciclos, são mais caros em comparação aos *Boosters* fabricados em aço e alumínio (Figura 2.6). Estes últimos são utilizados quando existe uma atividade contínua necessitando de uma melhor dissipação de calor.



Figura 2.6. Boosters para diferentes ganhos da marca *DUKANE*.

Nos sistemas de ultrassons, o sonotrodo tem o propósito de transmitir a energia vibracional do sistema para o material que se pretende soldar (J. Kumar, 2013).

No fabrico de um sonotrodo, temos de ter em consideração diversos aspetos, tal como os *Boosters*. As diferentes formas que um sonotrodo terá, pode levar a um aumento de amplitude. No caso em que o sonotrodo tem um lado reto (Figura 2.7 (a)), não ocorre ganhos. Caso esse tenha uma forma exponencial, catenoidal ou em degrau, pode haver um menor ou maior ganho (Figura 2.7 (b)). (Dukane, 2011).

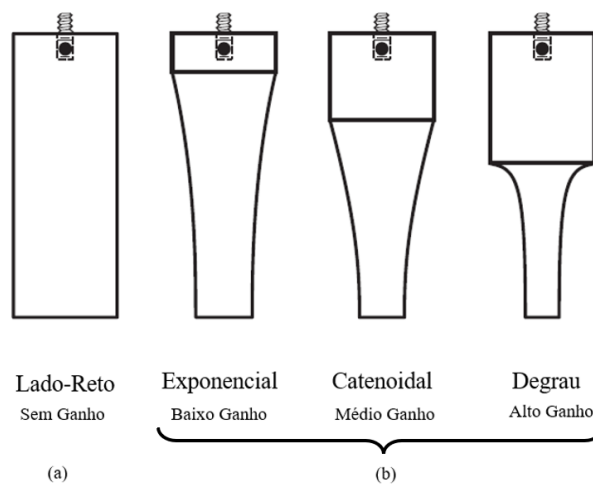


Figura 2.7. Tipos de Sonotrodo consoante o ganho, *adaptado de Dukane Cop*

Devido ao elevado movimento de compressão e tensão a que o sonotrodo está sujeito ao longo da sua utilização (no caso de 20 kHz, este expande e contrai 20,000 vezes por segundo), o material deste componente é um aspeto muito importante na sua construção (Dukane, 2011). Dependendo das suas condições de utilização, os sonotrodos podem ser compostos por:

- **Alumínio**, devido às suas excelentes propriedades acústicas e baixo custo de material. Este é um dos materiais mais utilizados na fabricação dos sonotrodos. A sua rápida e fácil maquinação, bem como custos de trabalho, levam a que este material seja bastante utilizado quando existe a necessidade de maquinação de peças mais complexas. Em contrapartida, a sua baixa dureza superficial e resistência à fadiga moderada, faz com que este material não seja ideal para utilizações de longo tempo e de elevada utilização. Uma das soluções

que podem se pode ter em conta para combater esses problemas, é aplicação de revestimento em crómio, níquel ou carbonetos. (Dukane. 2011).

- **Titânio**, ao contrário do alumínio, este apresenta propriedades mecânicas excelentes, como a resistência à fadiga, e elevada dureza superficial, e tem em comum as excelentes propriedades acústicas. Este material tem como desvantagens a sua dificuldade em maquinar, custos elevados de fabricação e de material, e por consequência, a sua capacidade de fazer peças complexas e de grande tamanho é baixa. Tal como o alumínio, caso sejam necessárias aplicações onde estes estejam sujeitos a grandes amplitudes, ou a um aumento de dureza superficial, estes também podem ser revestidos pelos materiais referidos acima. (Dukane, 2011).
- **Aço**, é usado em aplicações de elevada utilização, como inserção de metais, soldadura de materiais à base de vidro e realização de cortes. Graças a sua elevada dureza, este tem um comportamento mais frágil. Sendo assim, devido à sua fragilidade, as suas dimensões e complexidade de *design* são bastante baixas, para além de só serem usados em casos de baixa amplitude. (Dukane, 2011).

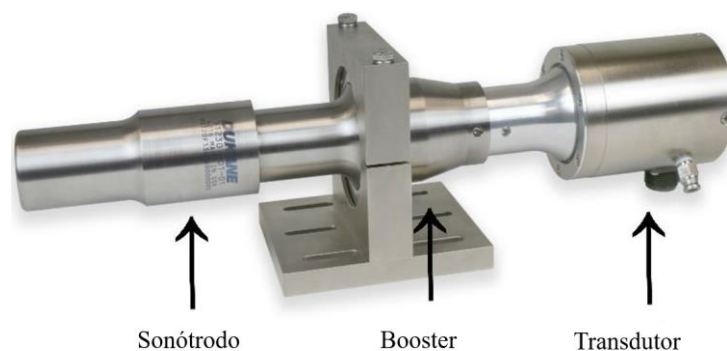


Figura 2.8. Exemplo de uma montagem de componentes (Conjunto Acústico) de um aparelho da *DUKANE*, (retirado e adaptado de www.Dukane.com)

2.3.2. Parâmetros da Máquina

Um dos pontos importantes na SUS é a estipulação dos parâmetros de funcionamento da máquina:

- Força;
- Frequência de Vibração;
- Energia;
- Amplitude;
- Distância de soldadura;
- Tempo de soldadura;

2.3.2.1. Força

A força tem um papel determinante, na concretização de uma boa soldadura. Esta é que promove o contacto entre a superfície, que combinado com a energia de vibração, origina a quebra dos óxidos superficiais do material a soldar. (S. Yadav & C. Doumanidis, 2005)

É bastante importante uma boa definição da força a ser utilizada no processo de soldadura, pois com forças baixas ocorre o deslizamento entre o sonotrodo e o material em contacto com o mesmo, levando a um desgaste e aumento de temperatura do sonotrodo. Por outro lado, forças excessivas, levam a uma deformação plástica excessiva do material, e, por consequência, a um pior acabamento. Em grande parte dos casos compromete a resistência mecânica do material. (M. Shakil, 2014).

2.3.2.2. Energia

O processo de SUS, a energia está depende do material e da sua secção, em que, quanto maior a dureza, maior será a energia necessária para se soldar, para uma mesma secção. (J. Valente, 2011).

A energia no processo de soldadura, tem como função a coalescência das superfícies de contacto através da deformação plástica superficial. No caso de energia ser insuficiente, ao contrário da ligação por difusão que é pretendida, gera uma ligação fraca, ou seja, uma ligação por adesão. Em caso de energia em excesso, ocorrerá um fenómeno de extrusão de material, distorção da soldadura, redução da secção transversal e, por vezes, um fenómeno chamado de *sticking*, provocando uma redução da resistência mecânica. (T. Marques, 2014).

2.3.2.3. Frequência de Vibração

A frequência, é um parâmetro definido no gerador, sendo este decidido consoante o sonotrodo que foi designado para a função a realizar.

Este pode variar entre 0,1 e 300 *kHz*, sendo mais usual um intervalo de 15 a 75 *kHz*. (Dukane, 2011).

2.3.2.4. Amplitude

Na SUS, a amplitude refere-se ao movimento em que o sonotrodo alonga e contrai (Devine, 1998), sendo que está diretamente relacionada com a potência a ser entregue à soldadura. O facto da frequência presente no sistema se encontrar fixa previamente, a amplitude de vibração, só poderá ser aumentada com o aumento da energia fornecida, de forma a ser percorrido uma maior distância, no mesmo intervalo de tempo. (A. Fernandes, 2007).

Dependendo da secção a ser soldada, a amplitude varia diretamente com o aumento da secção. Em contrapartida, baixas amplitudes, levam a um aumento do tempo de soldadura, podendo não gerar uma ligação por difusão devido ao amortecimento natural do material a ser soldado. Maiores amplitudes, geram um aumento de deformação plástica e de temperatura na zona onde ocorre a soldadura. (Dukane, 2011)

Uma boa seleção de amplitude, facilita o processo de união (processos difusivos), uma redução do tempo de soldadura e uma melhor resistência mecânica.

2.3.2.5. Distância de soldadura

No processo de SUS, a distância de soldadura refere-se à distância percorrida pelo sonotrodo em relação à posição de início da atuação das vibrações ultrassónicas.

Este parâmetro é muito importante para a qualidade de soldadura, no ponto em que, uma maior distância implica um aumento de material fundido, levando a escorrimentos laterais, e no caso de TNT's a uma perfuração do tecido (Figura 2.9 (b)). Uma baixa distância

compromete a resistência da soldadura, pois a fusão do material será insuficiente, ocorrendo uma fraca adesão entre os materiais. (Figura 2.9 (c)).

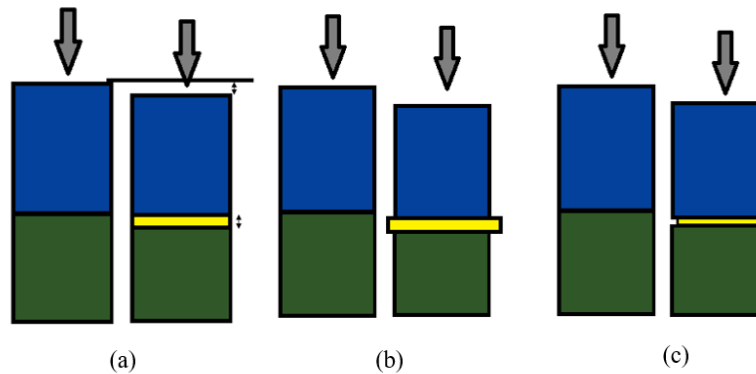


Figura 2.9. Simulação de SUS, onde demonstra a distância de soldadura((a) ideal; (b) excessiva; (c) insuficiente)

2.3.2.6. Tempo de soldadura

O tempo de soldadura é o intervalo de tempo durante o qual as vibrações ultrassónicas de uma amplitude pré-definida estão ativas.

Uma boa definição deste intervalo de tempo, influencia bastante a qualidade de soldadura, de maneira a conseguir uma ótima resistência, interface mais contínua e resistências à fadiga. (AWS, 1997).

Estes intervalos de tempo, dependendo das dimensões das secções a soldar, podem ir de 0.001s, para pequenas secções, até 1s para secções maiores. Este parâmetro vai também depender do material que se pretende soldar. (J. Valente, 2011).

2.3.3. Controlo de qualidade

Para uma melhor *performance* das soldaduras por SUS, a resistência da soldadura realizada, deve ser sujeita a diversos testes de controlo de qualidade: ensaios *Pull* e *Peel*, e ensaios de Fadiga.

Os **ensaios de *Pull* e *Peel*** (Figura 2.10 e Figura 2.11, respetivamente), consistem num ensaio de tração uniaxial, que, dependendo da forma de soldadura praticada, apresentam as diferentes denominações apresentadas.

O Ensaio de *Pull* permite testar a resistência da área total da soldadura quando sujeita a forças de corte.



Figura 2.10. Ensaio *Pull*

No caso do Ensaio de *Peel*, este permite testar a resistência à tração dos pontos de ligação por unidade de largura.



Figura 2.11. Ensaio *Peel*

Os **ensaios de Fadiga**, consistem numa série de ensaios cíclicos onde é mantida, em cada ensaio, a amplitude de força e a frequência sobre o material a ser testado.

Nesta série de testes temos a possibilidade de determinar o número de ciclos de rotura para cada nível da amplitude de carga. São geralmente realizados um mínimo de quatro níveis de carga, replicado três ensaios por cada nível.

2.3.4. Vantagens do Processo de SUS

A SUS é um processo tomado como preferência em relação aos restantes métodos de soldadura de TNT's, pelas vantagens de ser: (S. F. Raza (2015), Dukane (2011))

- Isento de fluxo de calor ou de material de adição, que quando efetuada corretamente, proporciona uma elevada resistência, semelhante ao material base;
- Processo rápido, necessitando apenas de fração de segundo para realizar a soldadura, não necessitando de uma limpeza de superfície, podendo ser automatizada facilmente e, por consequência, usada em produções em massa;
- Ser uma opção onde se pretenda uma soldadura limpa e com um bom acabamento, evitando empenos da peça e distorções na vizinhança;

- Ser um processo que a longo prazo, devido a sua rapidez e fácil automatização, é economicamente vantajoso;
- É um processo livre de poluição.

2.3.5. SUS em TNT's

A utilização da SUS em alternativa aos métodos tradicionais de união em tecidos, tem sido cada vez mais investigada pelas indústrias têxteis, medicina e engenharia.

Na união de tecidos por processos tradicionais, o tipo de costura leva a diferentes prestações da zona de união quando solicitada. No processo de SUS esse tipo de costura, é substituída pela geometria da soldadura.

Em trabalhos anteriores, foram estudados os valores de carga e alongamento na rotura em juntas soldadas por ultrassons, sendo variados a densidade de tecidos e a área de soldadura, usando diferentes geometrias do padrão. Verificou-se que uma maior área de soldadura em conjunto com o aumento da densidade do material, levam a um aumento da resistência e do alongamento na rutura das juntas soldadas (K. Mahmut *et al*, 2015).

Thanh-hai Nguyen *et al* (2020) e Manal A. Seif & Mona M. Nasr (2016) foram alguns dos investigadores que realizaram estudos sobre esta influência. Soldaduras com padrões de linhas paralelas, angulares, e pontos de soldadura de geometrias diferentes foram amplamente investigados na sua prestação em diversos ensaios.

Thanh-hai Nguyen *et al* (2020), realizou um estudo com um tecido de Polipropileno de 80 gramas, usando uma máquina de soldadura por ultrassons pneumática, com uma frequência de utilização de 20 *kHZ*, e uma amplitude de 60 microns. Este concluiu que a resistência à rutura da soldadura, quando submetida a uma solicitação de *Peel*, é dependente da razão entre a área soldada e a área total. Para além disso, padrões com uma estrutura do tipo "tijolo", ou seja, com vários pontos de soldadura com uma geometria retangular, tiveram melhores *performances* em relação a geometrias com linhas de soldadura contínuas e cruzadas. Na Figura 2.12 mostram-se os padrões utilizados neste estudo, e nas Figura 2.13 e Figura 2.14 a comparação entre valores de resistência (carga e tensão) obtidos em solicitações do tipo *Peel* bem como a razão de áreas de cada padrão.

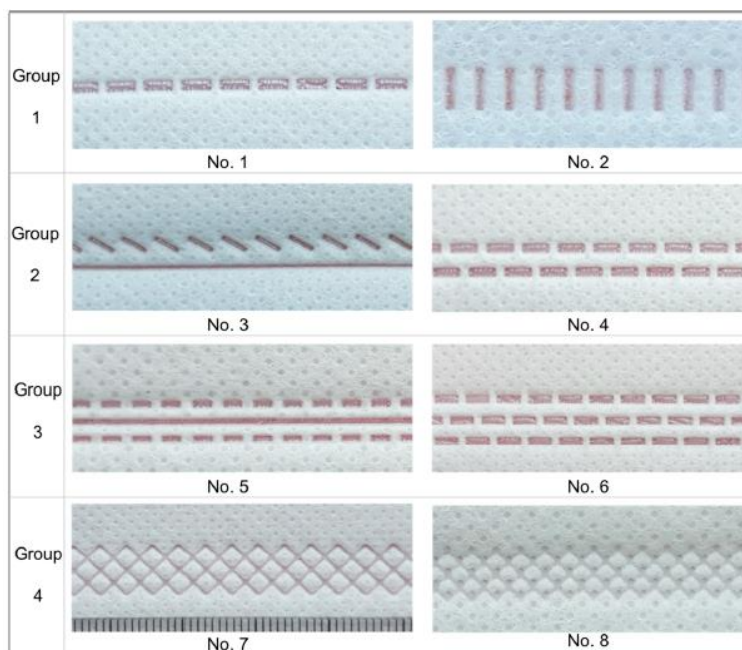


Figura 2.12. Padrões de soldadura utilizados no estudo (retirado de Thanh-hai Nguyen *et al* (2020))

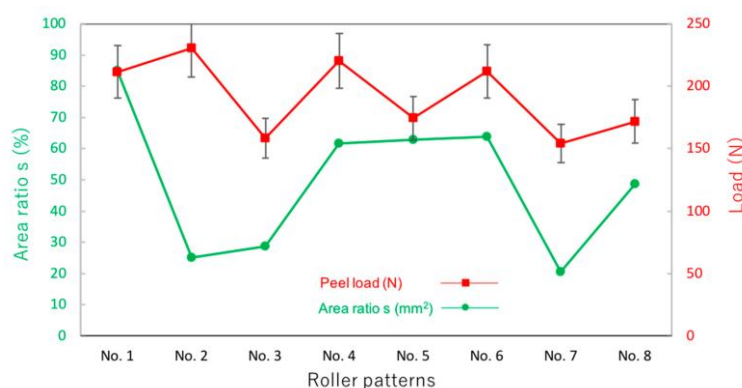


Figura 2.13. Relação entre valores de resistência à carga em solicitações do tipo *Peel* com relação de área (retirado de Thanh-hai Nguyen *et al* (2020))

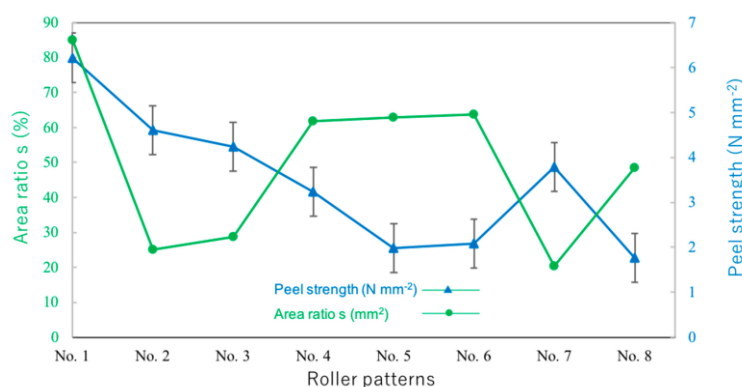


Figura 2.14. Relação entre valores de tensão em solicitações do tipo *Peel* com relação de área (retirado de Thanh-hai Nguyen *et al* (2020))

Neste estudo, os padrões que apresentaram valores de resistência mais elevados, em testes de *Peel*, foram os que apresentavam uma geometria de soldadura com elementos retangulares. Concluiu-se também, que uma soldadura onde ocorra a fusão total das fibras na área soldada, leva a uma perda de resistência.

Num outro estudo de união de tecidos por ultrassons, apresentado por Shi *et al*, concluiu-se que um aumento de tempo de soldadura e da força aplicada, leva a um aumento da resistência. No entanto, a aplicação de valores muito elevados de energia de soldadura, leva a uma redução da resistência. Um aumento da amplitude de vibração, é favorável a um aumento da resistência da junta (S. Weijua & L. Trevor, 2000)).

Num estudo efetuado por Tolunay *et al* (1983) foi concluído que a força aplicada durante a soldadura tem um efeito na taxa de aquecimento do material, tanto na interface, como no interior do material, e também que, a resistência à rotura aumenta com o aumento do tempo de soldadura.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste terceiro capítulo, apresenta-se o procedimento experimental realizado nesta dissertação. Além da seleção e caracterização do material a ser soldado faz-se uma breve caracterização da máquina de soldadura, padrões de soldadura e os parâmetros que foram estudados. Na parte final do capítulo descrevem-se os procedimentos usados na realização dos vários ensaios de caracterização da resistência à tração, arrancamento e fadiga.

3.1. Caracterização e Preparação do Material e Equipamento Utilizado

3.1.1. Caracterização do material

Como referido anteriormente, neste estudo é utilizado um tecido polimérico, à base de Polipropileno (PP), também conhecido por TNT.

Baseado na larga experiência da empresa *Coimpack Embalagens Lda.*, na utilização destes materiais, foi escolhido um TNT de 100 gramas, com 100% de PP (Figura 3.1.), cujas propriedades físicas estão presentes na Tabela 3.1., obtidas pela realização de três ensaios de tração com provetes do material base com uma largura de 30 mm, para uma posterior comparação com os resultados obtidos em juntas soldadas.

Tabela 3.1. Propriedades físicas do Polipropileno (PP),

Material	Densidade [g/m^2]	Espessura [mm]	Carga de Rotura por unidade de largura [N/mm]	Alongamento [%]
Polipropileno (PP)	100	0,49	3,1	75

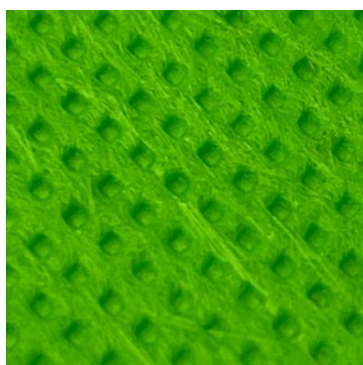


Figura 3.1. TNT de 100 g/m^2 de Polipropileno

3.1.2. Caraterização da máquina de soldaduras por ultrassons

Para a realização das soldaduras, foi escolhida a prensa elétrica da marca *Dukane*, a modelo *IQServo 43S220* (Figura 3.2.), presente no laboratório da *Wondermac*.



Figura 3.2. Prensa de Soldadura Ultrassónica *Dukane IQServo 43S220*, presente no laboratório da *Wondermac*, utilizada nas soldaduras.

A possibilidade de realização de soldaduras, definindo dois parâmetros a serem cumpridos: **o parâmetro de ativação das vibrações ultrassónicas** (também chamado de *trigger*), que pode ser definido através de força, pico de potência e posição e **o método de soldadura**, podendo ser definido pela distância de soldadura, tempo de atuação, energia, pico de potência e força máxima aplicada.

Juntando também a simplicidade de calibração da máquina durante a pré-soldadura, a sua maior precisão e repetibilidade da qualidade das soldaduras, foram aspetos cruciais para a escolha desta prensa. A disponibilidade de um *software* de análise, onde é possível consultar uma tabela como a ilustrada na Figura 3.3., com os valores dos parâmetros referidos, foram também fatores determinantes.

Part Count	Part Analysis	Downtime	Position at Trigger	Force at Trigger	Weld Time	Weld Distance	Weld Energy	Weld Peak Power	Weld End Position	Weld Peak Force	Hold Time	Hold Distance	Total Cycle Time	To
3	GOOD	2.553	43.691	260	0.338	0.332	46.8	215.8	44.024	362	0.700	0.000	3.591	
2	GOOD	2.537	43.675	260	0.397	0.394	59.4	287.6	44.069	466	0.700	-0.002	3.635	
1	GOOD	0.915	43.670	304	0.458	0.454	80.1	366.9	44.124	535	0.700	0.011	2.074	

Figura 3.3. Exemplo da tabela fornecida pelo software da máquina *IQ Servo 43S220*

Durante o processo de realização da soldadura, são definidos o método de ativação das vibrações ultrassónicas e o método de soldadura, que neste caso, trata-se da força inicial de compressão e a distância percorrida durante a soldadura, respetivamente. Ao iniciar a soldadura o conjunto acústico desce, até encontrar o material a soldar. Depois de o encontrar e aplicar a força de compressão pré-definida, as vibrações ultrassónicas são ativadas, e a soldadura passa a ser realizada consoante o método escolhido previamente, que neste caso, corresponde a percorrer uma distância pré-definida. Após os valores impostos no método serem atingidos, o movimento de aproximação do sonotrodo pára e inicia-se o tempo de arrefecimento, mantendo-se o conjunto acústico em contacto com o material. Logo que esse tempo tenha sido atingido, o conjunto acústico volta para a posição de “housing” e a soldadura termina.

3.1.2.1. Conjunto Acústico

Devido à prensa escolhida trabalhar a uma frequência de 20 kHz, a escolha do conjunto acústico a ser utilizado na realização do processo de soldadura teve que ser adaptado ao mesmo.

Sendo assim, na escolha do Transdutor, *Booster* e Sonotrodo, cujas características estão presentes na Tabela 3.2., Tabela 3.3. e Tabela 3.4., respetivamente, foram escolhidos os seguintes:

Tabela 3.2. Transdutor utilizado e suas características


Transdutor			
	Frequência (kHz)	20	Transforma a energia elétrica, em energia mecânica, ou seja, em vibrações
	Potência (W)	3000	
	Amplitude (μm)	20	
	Peso (kg)	1,27	

Tabela 3.3. *Booster* utilizado e suas características

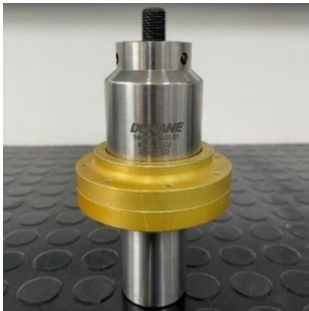

Booster			
	Frequência (kHz)	20	Tem duas funções principais, servir de peça de ponte entre o transdutor e o sonotrodo, e aumentar ou diminuir a amplitude
	Material	Alumínio	
	Ganho	2	
	Comprimento (mm)	138	

Tabela 3.4. Sonotrodo utilizado e suas características

Sonotrodo			
	Material	Alumínio	Tem o propósito de transmitir a energia vibracional do sistema para o material que se pretende soldar.
	Tipo de Ganho	Degrau	
	Área Superior (mm ²)	6028	
	Área Inferior (mm ²)	3500	
	Ganho	1,75	
	Altura (mm)	127,5	
	Frequência (kHz)	20	

3.1.3. Parâmetros estudados

Durante a realização dos ensaios foram estudados três parâmetros, padrão de soldadura, distância e força de ativação das vibrações. Cada um destes parâmetros foi variado com 3 valores/geometrias. Estes foram escolhidos seguindo as indicações do fabricante da máquina para o material em estudo e após a realização de alguns testes de confirmação.

A amplitude de vibração foi mantida durante todos os ensaios, escolhendo o valor de $70\mu\text{m}$ estando este dentro do intervalo de valores aceitáveis indicados na tabela fornecida pelo fabricante (ANEXO A) em função do material a soldar - Polipropileno. Este valor pode ser obtido pela equação, também fornecida pelo fabricante:

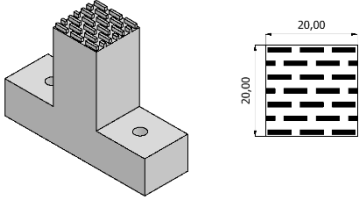
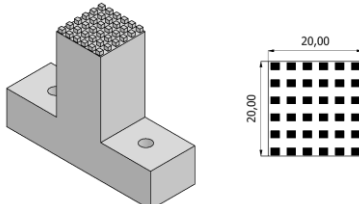
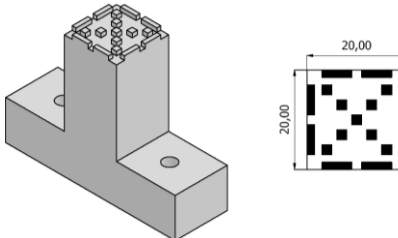
$$Amp = A_T * G_B * G_S \quad (1)$$

Na equação apresentada, A_T , G_B e G_S , correspondem à amplitude do transdutor, ganho do *booster* e ganho do sonotrodo, respetivamente.

3.1.3.1. Padrão de Soldadura

Na SUS de TNT, a geometria do padrão a ser utilizado na soldadura resulta em diferentes *performances* quando sujeita a solicitações mecânicas. Neste caso, o suporte que na maioria dos casos serviria de apoio à peça na realização da soldadura, é substituído por uma peça com o padrão de soldadura pretendido. Na Tabela 3.5. pode ser observado os padrões utilizados e suas características.

Tabela 3.5. Padrões utilizados nas soldaduras. Área total = 20x20=400 mm²

Padrão	Modelo CAD	Área soldada [mm ²]	Área da primeira linha do Padrão [mm ²]	Relação Área soldada/Área total [%]
A		102	15	25
B		97,2	16,2	24,3
C		108	18	27

Para tal, após a modelação geométrica dos padrões com recurso ao *software Autodesk Inventor*, e com a ajuda da empresa *Resultamper Metalomecânica Lda.* na sua fabricação, foram desenvolvidos os seguintes padrões, cujas características geométricas podem ser consultadas nos ANEXO B, ANEXO C e ANEXO D, respetivamente.

3.1.3.2. Parâmetros da Soldadura

Como referido anteriormente, são vários os parâmetros de regulação da máquina de soldadura.

A máquina realiza as soldaduras definindo somente dois parâmetros impostos. Os restantes são determinados automaticamente pela mesma, de forma a realizar a melhor soldadura possível.

No processo de SUS, a combinação dos parâmetros de força de ativação e distância de soldadura, pode levar a uma melhor ou pior ligação entre os materiais. No caso do TNT, uma escolha correta destes dois parâmetros é essencial para obter uma soldadura de qualidade, evitando uma fraca ligação entre materiais, ou uma perfuração do tecido, pela compressão imposta no material antes da ocorrência das vibrações, e posterior distância de soldadura percorrida, para uma mesma energia de soldadura transmitida em todo o processo. Apesar da energia ser também um fator importante nas soldaduras, esta está diretamente relacionada com a força, pois uma maior força aplicada ao material, leva a um aumento de energia transmitida, e vice-versa.

Desta breve análise conclui-se que os parâmetros da máquina que mais influenciam a qualidade de soldadura, são a Força de pré-compressão e a Distância de Soldadura, sendo então estes os escolhidos para analisar a sua influência na resistência das soldaduras.

Numa primeira fase dos ensaios serão estudados três valores de distância e respetivas forças (Tabela 3.6.) e os três padrões ilustrados na Tabela 3.5.

Os valores de força a serem definidos na segunda fase dos testes, será dependente do valor da força correspondente ao conjunto padrão-distância que melhor prestação teve na primeira fase dos ensaios.

Desta maneira, para além de verificarmos a influência dos valores de distância de soldadura e geometria do padrão na qualidade da mesma, podemos verificar também a importância da força de compressão prévia à ativação das vibrações.

Os valores da força de pré-compressão para cada distância de soldadura foram escolhidos de acordo com a prestação num teste de arrancamento manual e avaliação visual da zona soldada de várias soldaduras realizadas antes das definitivas. Ou seja, após a soldadura dos provetes, analisava-se a zona soldada para garantir que não ocorresse demasiada transparência entre camadas, pois indicava um esmagamento excessivo do material. Após a observação, o provete era tensionado manualmente sem recurso a nenhuma máquina. De acordo com o esforço realizado para ocorrer a rutura, os valores da força eram reajustados, de forma a realizar uma soldadura com melhores prestações, chegando aos seguintes valores:

Tabela 3.6. Valores da distância de soldadura e força de ativação das vibrações na primeira fase dos ensaios

Valores de distância (mm)		Valores de força (N)	
Distancia_A	0,45	Força_1	180
Distancia_B	0,38	Força_2	245
Distancia_C	0,31	Força_3	390

3.1.4. Plano de ensaios

O plano de ensaios foi dividido em três fases. Primeiramente, foram estudados três geometrias do padrão de soldadura e três distâncias de soldaduras. Para cada condição geometria do padrão/distância de soldadura foram realizados três testes estáticos de tração (*Pull*) e três testes estáticos de arrancamento (*Peel*).

Após realização dos diferentes testes estáticos e análise de resultados, escolheu-se para cada um dos padrões, as distâncias de soldaduras que demonstraram maior resistência.

Na Figura 3.4, estão indicados os diferentes pares de ensaios realizados na primeira fase.

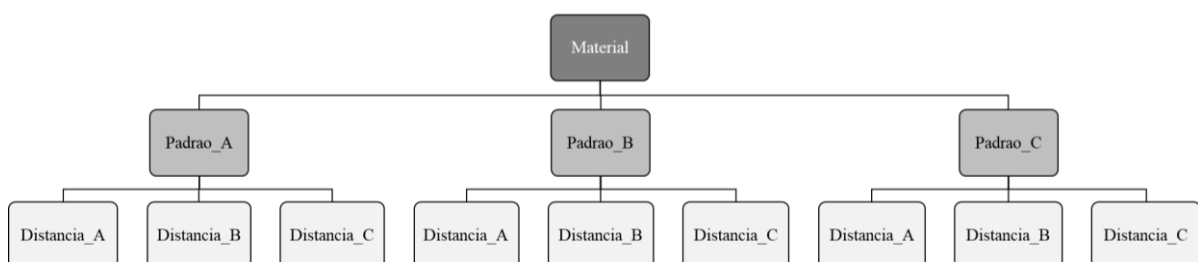


Figura 3.4. Esquema de realização da primeira fase dos ensaios

De forma a simplificar a identificação dos pares de parâmetros variados na primeira fase dos ensaios, estes foram identificados por códigos, presentes na Tabela 3.7.

Tabela 3.7. Identificação dos pares de parâmetros variados na primeira parte dos ensaios

Código	Padrão	Distância [mm]
E_AA	Padrao_A	Distancia_A
E_AB		Distancia_B
E_AC		Distancia_C
E_BA	Padrao_B	Distancia_A
E_BB		Distancia_B
E_BC		Distancia_C
E_CA	Padrao_C	Distancia_A
E_CB		Distancia_B
E_CC		Distancia_C

Na segunda fase, para os três melhores conjuntos de Padrões/Distâncias, que evidenciaram maior resistência estática, realizaram-se novas soldaduras, variando somente o parâmetro da força, cujos valores foram obtidos pela adição de 20% e subtração de 10% ao valor da força previamente definida nas soldaduras realizadas na primeira fase de ensaios, mantendo-se fixos os parâmetros distância e padrão.

Os diferentes pares de ensaios a realizar na segunda fase estão indicados na Figura 3.5.

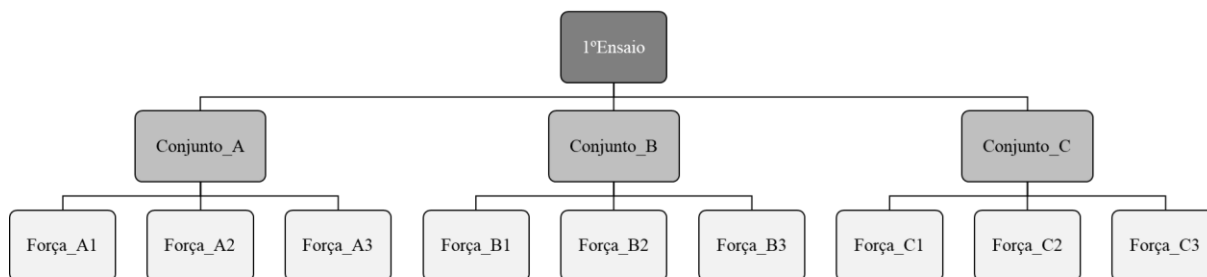


Figura 3.5. Esquema de realização da segunda parte dos ensaios

Tal como na primeira fase dos ensaios, na Tabela 3.8., estão identificados os códigos para os diferentes parâmetros variados na segunda parte dos ensaios.

Tabela 3.8. Identificação dos pares de parâmetros variados na segunda parte dos ensaios

Código	Conjunto	Força [N]
EF_A1	Conjunto_A	Força_A1
EF_A2		Força_A2
EF_A3		Força_A3
EF_B1	Conjunto_B	Força_B1
EF_B2		Força_B2
EF_B3		Força_B3
EF_C1	Conjunto_C	Força_C1
EF_C2		Força_C2
EF_C3		Força_C3

Para cada condição padrão/distância/força replicaram-se três testes estáticos de tração e três testes estáticos de arrancamento.

Na terceira e última fase foram efetuados ensaios de fadiga para a condição padrão/distância/força que apresentou melhor resistência estática.

Nestes testes de fadiga analisaram-se cinco níveis da amplitude de carga (os respetivos valores impostos na máquina estão apresentados na Tabela 3.9.). A frequência de ensaio foi somente de 2 Hz devido à baixa rigidez dos provetes.

Tabela 3.9. Valores Impostos nos ensaios de fadiga

Código	Conjunto	Força [N]	Carga Máx. [N]	Carga Min. [N]	Amplitude [N]	Carga Média [N]
EFA_CF[1-12]	Conjunto_A	Força_A1	63	3	30	33
			67,5	2,5	32,5	35
			74	4	35	39
			84	4	40	44
			94	4	45	49

3.2. Preparação dos provetes e realização da soldadura

Após a preparação do material a soldar, cortando as amostras com uma largura de 30 mm, e um comprimento de cada uma das tiras de 170 mm, efetuou-se a preparação da máquina de soldadura. Esta preparação passou por diversas etapas.

Inicialmente, realizou-se a montagem dos diversos componentes do conjunto acústico. Primeiramente, fez-se a junção do transdutor com o *Booster* manualmente. De seguida, realizou-se um ajuste do aperto dos mesmos, com recurso a uma chave especial de torque do

fabricante da máquina (Figura 3.6), ajustada de acordo com a frequência de vibração utilizada na realização das soldaduras.



Figura 3.6. Conjunto de chave, suportes e agarras *Dukane*, retirado de *dukane.com* a 13/05/2022

Neste caso foi utilizada a regulação para a frequência de 20 *kHz* indicada na Tabela 3.10.

Tabela 3.10. Valores de binário a aplicar através de uma chave de torque, consoante a frequência de vibração, adaptado de *Dukane*

Binário [<i>in. lb</i>]	Binário [<i>ft. lb</i>]	Binário [<i>N. m</i>]	Frequência [<i>kHz</i>]
540	45	61	15
420	35	47,5	20
216	18	24,4	30
216	18	24,4	40

De seguida, efetuaram-se as mesmas operações para a união do sonotrodo com os outros dois componentes já montados e ajustados.

Tendo o conjunto acústico preparado, montou-se o mesmo na máquina de realização das soldaduras, a *IQServo 43S220*.

Posteriormente, um dos passos efetuados após a montagem do conjunto acústico, passou pela realização do *scan* do mesmo. Este tem como objetivo, verificar se a frequência que passa pelo conjunto acústico está de acordo com as especificações da máquina. Deste *scan* obteve-se um valor de 19939 *Hz*, estando este dentro do intervalo de valores aceitáveis da máquina (19443 *Hz* – 20443 *Hz*)

Posto isto, montaram-se os padrões na base da máquina sendo realizada uma primeira nivelção das faces, sem qualquer ajuda.

Com a finalidade de verificar se a face do padrão estaria paralela com a face do sonotrodo, utilizou-se uma folha de papel branco e uma folha de papel químico, que colocadas entre o sonotrodo e o padrão e fazendo contacto entre os mesmos, realizamos ajustes no nível do padrão, de forma a ficarem paralelos, e assim, poder realizar uma soldadura uniforme. Este passo foi repetido sempre que ocorria a troca do padrão de soldadura.

Por fim, foi definido a distância limite a percorrer, com a recurso a funcionalidades da máquina e do seu *software*.

Após a conclusão destes passos, realizaram-se as soldaduras que foram definidas no plano de ensaios, variando os parâmetros necessários para cada uma delas.

3.3. Ensaio de tração

Nos ensaios de tração pretende-se determinar o valor máximo da carga de rotura do material soldado, de maneira a determinar os melhores valores para os parâmetros de soldadura. Foram realizados dois tipos de ensaios: tração de *Pull* e tração de *Peel*.

Para a realização dos ensaios de *Pull* e *Peel*, foi utilizada a máquina Shimadzu® *Autograph AG-X 1kN*, com uma célula de carga de $5kN$, e uma velocidade de deslocamento do travessão da máquina de 45 mm/min .

Durante a colocação dos provetes nas amarras da máquina de ensaios, foi realizada uma dobra nas pontas com um comprimento de 20 mm , de forma a que tivessem uma melhor fixação, conforme é mostrado na Figura 3.7.

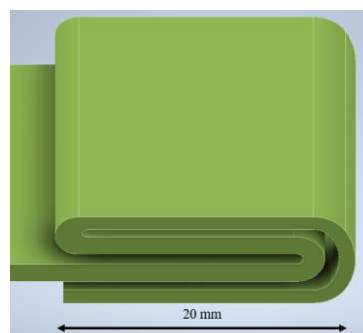


Figura 3.7. Dobra efetuada nas pontas dos provetes

3.4. Ensaio de fadiga

Para a realização dos ensaios de fadiga, foi utilizada a máquina servo-elétrica *Instron*® *ElectroPuls E10000*, com a capacidade de carga dinâmica de 10 kN.

Todo o processo é controlado por computador com recurso ao software *INSTRON WaveMatrix*, próprio para a geração de cargas cíclicas e aquisição de dados. O ensaio inicia-se com uma rampa de carga num tempo pré-definido (5 s) até ser atingido o valor da carga média, P_m . No passo seguinte é aplicada uma carga cíclica com a amplitude P_a , a qual é mantida até á rotura do provete ou a interrupção do ensaio. São também definidos limites de segurança, máximo e mínimo, para a carga e para o deslocamento.

Os ensaios foram realizados com uma frequência de 2 Hz e uma razão de carga $r = 0,05$. Na colocação dos provetes, de modo semelhante ao efetuado nos ensaios de tração, foi executada uma dobra nas extremidades do provete, para obter uma melhor fixação e a sua proteção do contacto direto com as mordças das amarras, como demonstrada na Figura 3.7.

Na Figura 3.8. está apresentada a máquina utilizada para a realização dos ensaios de fadiga.



Figura 3.8. Máquina de ensaios de fadiga Instron *ElectroPuls E10000*.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No presente capítulo, são apresentados os resultados obtidos ao longo do trabalho experimental efetuado, através de uma análise descritiva e interpretação dos mesmos. Foi, ainda, realizada uma caracterização da zona de fratura dos provetes com recurso a microscopia eletrónica de varrimento (MEV).

4.1. Comportamento à tração

Neste subcapítulo foram apresentados, analisados e interpretados os resultados obtidos nas duas primeiras fases dos ensaios mecânicos realizados.

Em ambas as fases, para cada um dos conjuntos de parâmetros variados, foram efetuados três ensaios de *Pull* e três de *Peel*, estando representados a progressão dos mesmos na Figura 4.1. (a) e 4.1. (b), respetivamente.

Nos ensaios *Pull* verifica-se a ocorrência do afastamento do tecido à volta da zona soldada (com uma largura de 25 mm), com o aumento da carga de tração. Este comportamento pode ser justificado pelo facto de este conter material não solicitado que se encontra em redor da área soldada (cerca de 2,5 mm de cada lado). A necessidade deste material extra, resultou da constatação, em testes preliminares, que o material base suporta uma carga de tração inferior à da zona soldada, ou seja, ocorria a rotura do material base em vez da rotura da zona soldada. Assim, foi adotada a largura de 30 mm para a largura dos provetes. Não foi efetuado um estudo sistemático para a análise da influência da relação entre a largura do provete e a largura da junta soldada na resistência à rotura.

No ensaio *Peel*, em alguns casos, após a rotura pela primeira linha do padrão, a rotura dá-se pela zona lateral do mesmo, acompanhada por uma redução acentuada de carga.

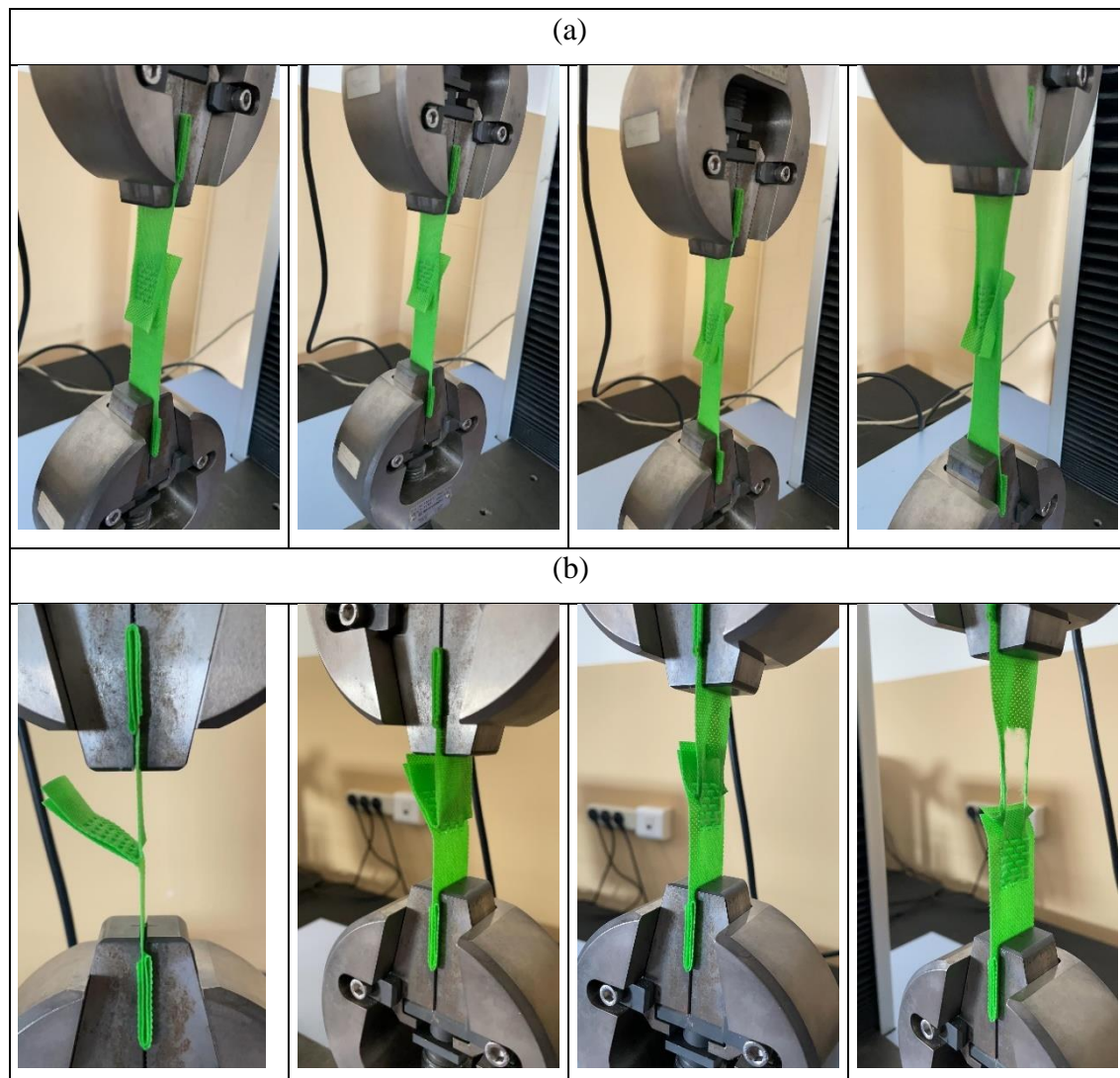


Figura 4.1. Progressão dos ensaios realizados: a) Ensaio *Pull* b) Ensaio *Peel*

4.1.1. Primeira fase dos ensaios

Na primeira fase dos ensaios, foram variadas apenas a geometria dos padrões e a distância de soldadura, em que, para cada distância, foram atribuídos diferentes valores de força de ativação das vibrações ultrassônicas.

A Tabela 4.1 , mostra os valores de cada um dos diferentes conjuntos de parâmetros.

Foi também anotado o valor de energia de soldadura obtido, de todos os ensaios para uma melhor análise e controlo de resultados.

Tabela 4.1. Valores dos parâmetros variados na primeira fase dos ensaios

Código	Padrão	Área de Soldadura [mm ²]	Distância	Valor da Distância [mm]	Força [N]	Energia Média [J]
E_AA	Padrao_A	102	Distancia_A	0,45	180	68,0
E_AB			Distancia_B	0,38	245	55,4
E_AC			Distancia_C	0,31	390	51,2
E_BA	Padrao_B	97,2	Distancia_A	0,45	180	62,8
E_BB			Distancia_B	0,38	245	55,2
E_BC			Distancia_C	0,31	390	47,4
E_CA	Padrao_C	108	Distancia_A	0,45	180	70,3
E_CB			Distancia_B	0,38	245	59,1
E_CC			Distancia_C	0,31	390	52,3

No gráfico presente na Figura 4.2. Valores médios da carga de rotura de cada conjunto de provetes na primeira fase dos ensaios *Pull* e *Peel*, podemos analisar os resultados dos ensaios de *Pull* e *Peel* obtidos nesta fase do estudo. Também é possível observar na Tabela 4.2 e Tabela 4.3, os respetivos valores médios de cada conjunto de parâmetros e respetivos desvios padrão dos ensaios de *Pull* e *Peel*, respetivamente.

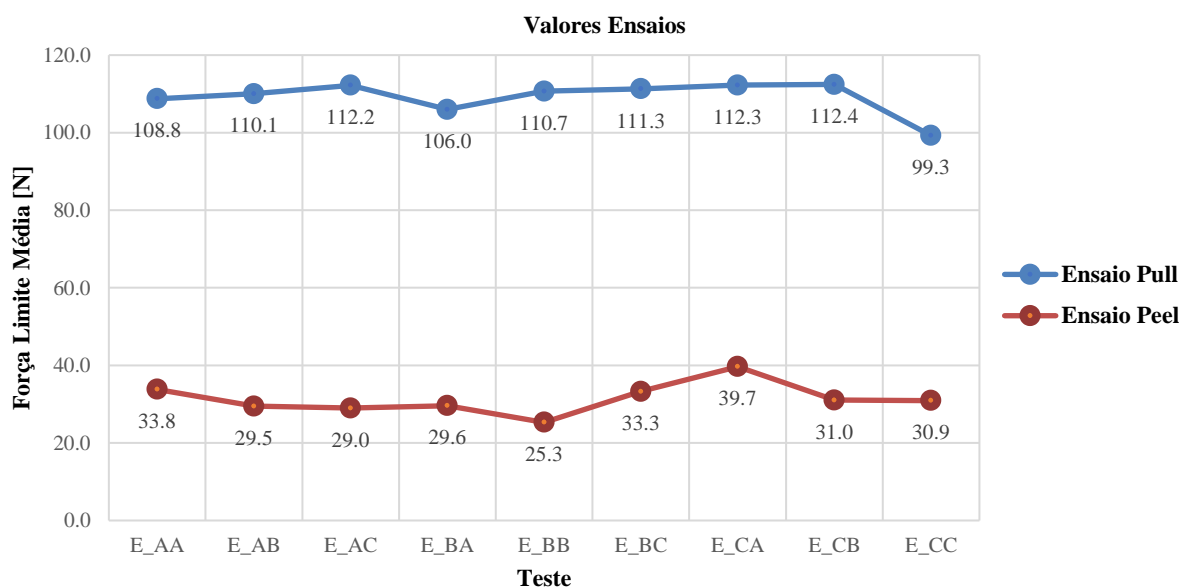


Figura 4.2. Valores médios da carga de rotura de cada conjunto de provetes na primeira fase dos ensaios *Pull* e *Peel*

Nos ensaios *Pull* observa-se um aumento ligeiro da resistência com a redução do valor da distância de soldadura, exceto no provete E_CC, onde ocorreu uma diminuição de aproximadamente 13 N em relação ao segundo valor mais baixo (E_CA). Esta diminuição

pode estar relacionada com vários fatores, como imperfeições no material, a face do padrão não estar perfeitamente paralela à face do sonotrodo, levando a regiões onde não ocorra uma fusão uniforme, ou os parafusos de ligação que seguram o padrão ao suporte não estivessem devidamente apertados. Com exceção das combinações BA e CC, pode afirmar-se que existe uma influência pouco significativa da distância e do padrão na resistência da soldadura nos ensaios *Pull* (menor que 3%). É necessário ter em consideração que os valores da força de pré-compressão foram ajustados para cada par padrão/distância durante o estudo preliminar referido no capítulo 3.

Nos ensaios *Peel*, em virtude de os valores médios de resistência serem muito inferiores, verifica-se uma maior dispersão dos resultados, variando os resultados entre o limite mínimo de 25,3 N (-20% em relação à média de 31,7 N) e máximo de 39,7 N (+25% em relação à média de 31,7 N). A resistência diminui com a redução da distância de soldadura nos padrões A e C. O padrão C foi o que permitiu obter a melhor resistência. No caso do padrão B, a tendência não é consistente, tendo-se obtido a melhor resistência para a distância de 0,31 mm. A resistência das soldaduras nos ensaios *Peel* é muito inferior à que foi obtida nos ensaios *Pull*, como seria de esperar. Em média, a resistência das soldaduras nos ensaios *Peel* é cerca de 29% da resistência obtida nos ensaios *Pull*. Para além das tensões aplicadas na junta soldada serem de tração em vez de corte, existe uma maior concentração de tensões sobre a primeira linha de soldadura no caso dos ensaios *Peel*.

Nos ensaios *Peel* o esforço de arrancamento é inicialmente suportado apenas pela primeira linha de soldadura. Portanto, seria de esperar que houvesse uma relação entre a resistência ao arrancamento e a área da primeira linha de cada padrão. Esta relação foi obtida nos resultados obtidos por Thanh-hai Nguyen *et al* (2020). Neste estudo, podemos observar que os padrões No.1, No.4 e No.6 têm geometrias dos pontos de soldadura semelhantes, sendo a única diferença a adição de mais uma linha no padrão No.4 e de duas linhas no padrão No.6 (Figura 2.12.). Analisando os resultados obtidos, existe uma diferença muito pequena na resistência destes três padrões (menor que 1%), comprovando a relação entre a resistência ao arrancamento com a área da primeira linha.

No estudo efetuado nesta dissertação, verifica-se que os valores médios de resistência são mais altos nos padrões cujos pontos de soldadura apresentam geometrias retangulares (padrão A e C), apesar do padrão A corresponder a uma área de primeira linha menor (7,4% menor), com 15 mm², em comparação com o padrão B, com 16,2 mm².

Tabela 4.2. Dados referentes aos resultados da primeira fase de ensaios *Pull*

Tipo de Teste	Código	Valor Médio de Força de Rotura [N]	Desvio Padrão [N]
PULL	E_AA	108,8	2,1
	E_AB	110,1	2,3
	E_AC	112,2	2,2
	E_BA	106	0,2
	E_BB	110,7	1,5
	E_BC	111,3	4,1
	E_CA	112,3	2,4
	E_CB	112,4	0,2
	E_CC	99,3	0,2

Tabela 4.3. Dados referentes aos resultados da primeira fase de ensaios *Peel*

Tipo de Teste	Código	Valor Médio de Força de Rotura [N]	Desvio Padrão[N]
PEEL	E_AA	33,8	0,2
	E_AB	32,9	3,4
	E_AC	28,9	1,1
	E_BA	29,6	1,8
	E_BB	25,3	1,1
	E_BC	33,3	1,8
	E_CA	39,7	1,8
	E_CB	31,0	0,9
	E_CC	30,9	0,03

Destes resultados podemos concluir que o aumento da distância de soldadura para a mesma força de ativação das vibrações, leva a uma ligeira melhoria na *performance* das juntas em solicitações do tipo *Peel*, e o inverso em solicitações do tipo *Pull*.

Nos ensaios *Pull* a ocorrência de um aumento do valor de resistência com a diminuição da distância de soldadura pode ser justificado pela diminuição de material fundido durante a soldadura (menores valores de energia, Tabela 4.1), levando a que na região da zona-soldada não haja a fusão completa das fibras. Daqui resulta uma maior complacência da junta e, conseqüentemente, uma melhor distribuição da carga por toda a área soldada; também haverá uma menor concentração de tensões na fronteira entre a zona soldada e o material base, mas ainda assim, uma união suficientemente forte entre os dois tecidos de material base.

É verificado o inverso no caso de solicitação do tipo *Peel*, podendo ser justificada por um aumento da fusão das fibras com o aumento da distância de soldadura. Nos ensaios do tipo *Peel* é determinante para a resistência da junta a resistência à tração das regiões soldadas que constituem a primeira linha do padrão. Por outro lado, a maior rigidez que se obtém com

uma maior energia de soldadura (maior distância percorrida) não afeta a resistência como nos ensaios *Pull*. Portanto, a distribuição de carga por toda a área soldada não é importante nos ensaios *Peel*.

Os padrões que contém uma geometria retangular de soldadura, como é o caso dos padrões A e C, têm uma melhor prestação em relação ao padrão B em ambos os ensaios, apesar de este último conter mais pontos de soldadura.

Não obstante o valor da área da primeira linha do padrão B ser superior à do padrão A, este último apresentou uma melhor prestação nos ensaios de *Peel*. Estes resultados de resistência ao arrancamento podem ser justificados pelo somatório dos comprimentos dos pontos de soldadura na primeira linha, que no caso do padrão A é de 15 mm, no padrão C é de 12 mm e no padrão B é de apenas 10,8 mm. Os padrões A e C foram os que tiveram melhores prestações, sendo os que apresentam um maior comprimento do pontos que constituem a primeira linha de soldadura.

Em comparação com os resultados obtidos por Thanh-hai Nguyen *et al* (2020) em ensaios de *Peel*, obtiveram-se valores de resistência muito baixos, tendo por base o padrão com maior semelhança (*No.1*), havendo um decréscimo de 81% entre os dois valores mais altos de ambos os estudos (aproximadamente 210 N e 39,7 N). Como foi justificado anteriormente, uma maior fusão durante a compressão das fibras, aumenta a prestação da soldadura quando solicitada por um esforço do tipo *Peel*. Na Figura 4.3., retirada de Thanh-hai Nguyen *et al* (2020), é possível verificar uma soldadura com uma maior fusão entre as fibras, semelhante aos pontos de soldadura losangulares obtidos durante a fabricação do tecido, quando em comparação com a soldadura realizada durante este estudo, na Figura 4.4., notando-se uma fusão incompleta e o espaçamento entre as fibras.

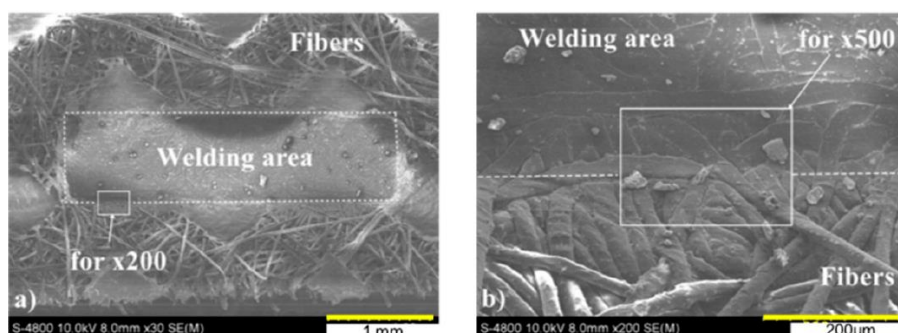


Figura 4.3. Zona soldada, retirada de Thanh-hai Nguyen (2020)

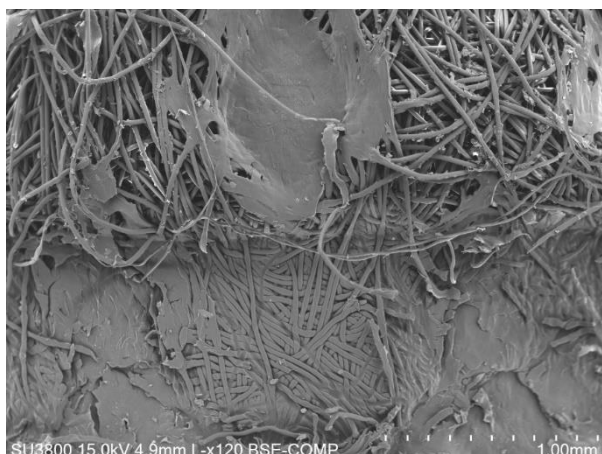


Figura 4.4. Zona Soldada com o padrão A

Apesar dos valores obtidos, em comparação com outros estudos, serem bastante inferiores, nos ensaios de *Pull* obtiveram-se valores de resistência semelhantes aos valores de rutura no material base (Tabela 3.1.), havendo casos onde foi ultrapassado (conjunto de parâmetros E_AC, E_BC; E_CA e E_CB), provando assim que, para o material estudado, as soldaduras realizadas têm uma resistência suficiente para a solicitação *Pull* mas não para a solicitação *Peel*.

Concluiu-se que a geometria do padrão, em conjunto com o aumento da área de ligação entre a zona soldada e o material base, leva a um aumento da resistência à rotura.

De forma a facilitar a escolha de qual o provete a ser estudado nos ensaios de fadiga, apresenta-se na Tabela 4.4. a classificação, por ordem decrescente de resistência, os provetes ensaiados na primeira fase nos testes *Pull* e *Peel*.

Tabela 4.4. Classificação dos provetes na primeira fase dos ensaios *Pull* e *Peel*

Código	Classificação <i>Pull</i>	Classificação <i>Peel</i>
E_AA	7°	3°
E_AB	6°	7°
E_AC	3°	8°
E_BA	8°	6°
E_BB	5°	9°
E_BC	4°	2°
E_CA	2°	1°
E_CB	1°	4°
E_CC	9°	5°

Na escolha do conjunto de parâmetros de soldadura a serem utilizados na segunda fase dos ensaios, foi dado mais importância à classificação nos ensaios *Peel*, pois o seu modo de solicitação é o mais desfavorável. **Assim foram escolhidas as combinações de parâmetros AA, BC e CA.** Apesar da condição AA estar entre os três últimos valores de resistência nos ensaios de *Pull*, este apresentou um valor de carga de rotura média aceitável (108,8 N), em comparação com o valor mais elevado (112,4 N), e tal como explicado anteriormente, apresentou uma boa prestação nos ensaios de *Peel* (3º lugar) em relação às restantes distâncias de soldadura ensaiadas com o padrão A (7º e 8º).

4.1.2. Segunda fase dos ensaios

No presente subcapítulo, foi realizado o estudo dos valores obtidos nos ensaios à tração dos diferentes conjuntos de parâmetros a fixar em cada um dos padrões.

Os diferentes parâmetros fixados estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Conjuntos de parâmetros a fixar escolhidos

Valores Conjuntos	Conjunto	Padrão	Distância	Valor da Distância [mm]
	Conjunto_A	Padrao_A	Distância_A	0,45
	Conjunto_B	Padrao_B	Distância_C	0,31
	Conjunto_C	Padrao_C	Distância_A	0,45

Após a determinação de quais os conjuntos a utilizar, foi variada a força de ativação das vibrações ultrassónicas, efetuando um aumento de 20% e uma diminuição de 10% em relação ao valor definido inicialmente. Na Tabela 4.6., estão indicados os valores de cada um dos conjuntos dos parâmetros de soldadura a serem ensaiados na segunda fase dos ensaios mecânicos.

Durante a realização destas soldaduras, tal como na primeira fase, foram anotados os valores médios de energia, de forma a realizar um controlo dos mesmos.

Tabela 4.6. Valores dos parâmetros variados na segunda fase dos ensaios

Código	Conjunto	Distância	Valor da Distância [mm]	Força [N]	Valores de Força [N]	Energia Média [J]
EF_A1	Conjunto_A	Distância_A	0,45	Força_A1	162	68,4
EF_A2				Força_A2	180	68,0
EF_A3				Força_A3	216	67,8
EF_B1	Conjunto_B	Distância_C	0,31	Força_B1	351	42,9
EF_B2				Força_B2	390	46,5
EF_B3				Força_B3	468	50,8
EF_C1	Conjunto_C	Distância_A	0,45	Força_C1	162	67,0
EF_C2				Força_C2	180	68,05
EF_C3				Força_C3	216	68,5

No gráfico presente na Figura 4.5., podemos analisar os valores dos ensaios de *Pull* e *Peel* obtidos da segunda fase dos ensaios, estando presentes na Tabela 4.7 e 4.8. os dados referentes aos valores médios de cada conjunto de parâmetros e respectivos desvios padrão dos ensaios de *Pull* e *Peel*, respetivamente.

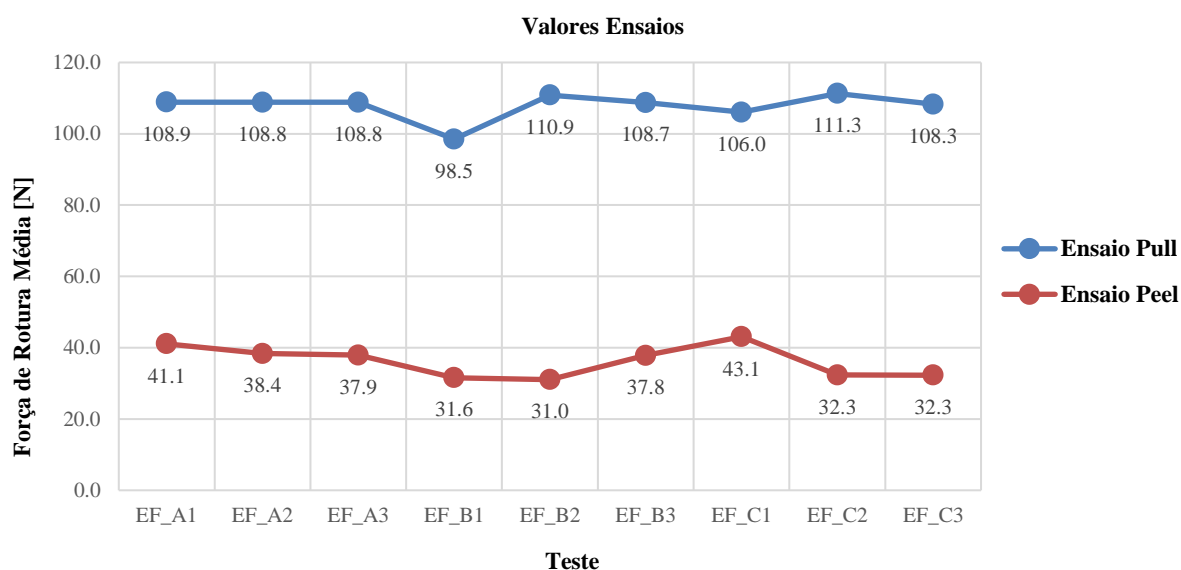


Figura 4.5. Valores médios da carga de rotura para cada conjunto de provetes na segunda fase dos ensaios *Pull* e *Peel*

Como pode ser observado Figura 4.5, os ensaios com os provetes EF_A2, EF_B2 e EF_C2, cujos parâmetros foram os mesmos da primeira fase dos ensaios, tiveram valores semelhantes aos obtidos anteriormente.

É possível verificar que nos ensaios de *Pull* a resistência diminui tanto com o aumento como com a diminuição da força de ativação das vibrações ultrassônicas para os padrões B e C, sendo a perda de carga média mais elevada quando se reduz a força de ativação das vibrações. Os conjuntos do padrão A não mantiveram a mesma tendência, verificando-se uma variação praticamente nula no valor médio da carga de rotura.

Em relação aos ensaios de *Peel*, há uma tendência semelhante para os padrões cujas distâncias de soldadura eram iguais (padrão A e C, com uma distância de soldadura de 0,45 mm). As condições A1 e C1 foram aquelas que conduziram às melhores resistências nos ensaios *Peel*.

Tabela 4.7.Dados referentes aos resultados da segunda fase de ensaios *Pull*

Tipo de Teste	Código	Valor Médio de Força de Rotura [N]	Desvio Padrão[N]
<i>PULL</i>	EF_A1	108,9	3
	EF_A2	108,9	1,2
	EF_A3	108,8	0,5
	EF_B1	98,5	1,4
	EF_B2	110,9	0,5
	EF_B3	108,7	0,5
	EF_C1	106,0	1,7
	EF_C2	111,3	0,2
	EF_C3	108,3	0,6

Tabela 4.8.Dados referentes aos resultados da segunda fase de ensaios *Peel*

Tipo de Teste	Código	Valor Médio de Força de Rotura [N]	Desvio Padrão[N]
<i>PEEL</i>	EF_A1	41,1	1,1
	EF_A2	38,4	2,6
	EF_A3	37,9	1,6
	EF_B1	31,6	1,1
	EF_B2	31,0	0,4
	EF_B3	37,8	1,3
	EF_C1	43,1	1,2
	EF_C2	32,3	1,2
	EF_C3	32,3	2,0

Nos ensaios *Pull*, a diminuição da força de ativação para o padrão C, diminuiu ligeiramente a resistência estática (entre 1% e 2%) em relação ao valor mais alto (111,3 N). No padrão B, a diminuição da força de ativação levou a uma redução acentuada da carga de rotura, sendo esta justificada pela conjugação de uma menor força de ativação e uma menor

distância de soldadura aplicada, levando a uma menor resistência de ligação entre as fibras. Por outro lado, um aumento das forças, por pouco que tenha sido a diferença em ambos padrões (também entre 1% e 2%), pode ser explicada pela elevada compressão dos materiais quando ocorre a ativação das vibrações, resultando num aumento da fusão das fibras, levando a um excesso de rigidez da zona soldada.

Em relação aos ensaios de *Peel*, no caso dos padrões A e C, cujas distâncias de soldadura eram de 0,45 mm, a diminuição da força de ativação das vibrações leva a um aumento da carga de rotura, devido a uma diminuição do material fundido, obtendo-se uma transição mais suave na fronteira entre a zona soldada e o material base, mantendo-se as propriedades elásticas das fibras e uma união entre as peças de tecido suficientemente resistente. A geometria dos padrões A e C, ambos com comprimento de geometria da primeira linha do padrão superior em relação ao padrão B, levam a que estes tenham uma melhor prestação em solicitações do tipo *Peel*. (um aumento de pelo menos 8,7% entre os valores mais elevados).

No caso do padrão B, as variações da força de ativação das vibrações ultrassónicas afetaram de uma forma positiva a resistência estática nos ensaios de *Peel*, principalmente com o aumento da força, onde se verifica um aumento de 6 N. O aumento da força, levou a que a ligação entre camadas fosse mais coesa, melhorando a sua prestação nos ensaios de *Peel*, compensando a sua baixa área de ligação ($97,2 \text{ mm}^2$), comprimento da geometria ($10,2 \text{ mm}^2$) e a menor distância de soldadura (0.31 mm).

Tal como na primeira fase dos ensaios, apesar dos valores obtidos nos ensaios de *Peel* terem algumas melhorias (melhoria de 8,5%), estes continuam muito baixos em relação aos obtidos por Thanh-hai Nguyen *et al* (2020) (decrécimo de 80%).

No estudo efetuado nesta dissertação, foi verificado que uma diminuição da força da soldadura, melhorou a prestação dos ensaios, provando que a força de 180 N já tinha ultrapassado o valor ideal, reduzindo a resistência quando se aumentava a força de pré compressão para 210 N.

Estes resultados estão de acordo com a investigação de Shi *et al*, onde concluiu que um aumento de tempo de soldadura e da força aplicada, leva a um aumento da resistência. Sendo assim, falta apenas, uma variação do tempo de soldadura, que não foi estudado nestes ensaios.

Na Tabela 4.9, está apresentada a classificação dos provetes da segunda fase de ensaios *Pull* e *Peel*.

Tabela 4.9. Classificação dos provetes na segunda parte dos ensaios *Pull* e *Peel*

Código	Classificação <i>Pull</i>	Classificação <i>Peel</i>
EF_A1	3°	2°
EF_A2	5°	3°
EF_A3	6°	4°
EF_B1	9°	8°
EF_B2	2°	9°
EF_B3	4°	5°
EF_C1	8°	1°
EF_C2	1°	6°
EF_C3	7°	7°

Tal como na primeira fase dos ensaios, foi dada uma maior importância à classificação dos ensaios *Peel*.

É de notar que o padrão C obteve as melhores classificações (EF_C2 em *Pull* e EF_C1 em *Peel*), contudo no geral, o padrão A obteve as restantes melhores classificações em ambos os ensaios.

Foi decidido a escolha do conjunto de parâmetros de soldadura do provete EF_A1 para a realização dos ensaios de fadiga, tendo este tido a 2ª melhor resistência em solicitações do tipo *Peel* e a 3ª melhor em solicitações do tipo *Pull*.

Podemos concluir desta segunda fase dos ensaios estáticos que, a força de ativação é um fator mais importante nos casos em que a distância de soldadura é reduzida (verificado no padrão B onde a distância era de 0,31 mm). Por outro lado, para os casos com distância de soldadura maior (0,45 mm), e para um mesmo valor de força de pré-compressão, a resistência da soldadura depende da geometria do padrão utilizado, do comprimento dos pontos de soldadura na primeira linha do padrão e da força de ativação, tendo diferentes tendências nos ensaios *Pull* e *Peel*.

4.2. Comportamento à fadiga

Para a realização dos ensaios de fadiga, foi escolhido a condição de soldadura EF_A1, por ser a que obteve a 2ª melhor resistência nos ensaios de arrancamento e 3ª melhor nos ensaios de tração. A solicitação aplicada nos ensaios de fadiga foi do tipo *Pull*.

Os resultados obtidos durante este ensaio de fadiga são representados graficamente sob a forma de uma curva S-N. O gráfico faz uso de uma escala logarítmica, de base 10, sendo a sua escolha fundamentada pelas grandes amplitudes dos dados de amostragem obtidos. Desta forma, torna-se mais fácil a visualização dos dados e a percepção da tendência dos mesmos.

Após o registo de todos os valores obtidos durante os ensaios, foi traçada uma linha de tendência característica da curva. No caso de resultados de fadiga, é normal a escolha de uma lei de potência:

$$y = a * x^b \quad (1)$$

Na equação apresentada, os valores de x e y correspondem à gama da carga aplicada e ao número de ciclos até à rotura do provete, respetivamente. Os coeficientes a e b são o coeficiente e o expoente de resistência à fadiga, respetivamente. É também obtido o coeficiente de determinação (R^2), que mede a dispersão, ou seja, o nível de aproximação dos valores em relação à linha de tendência podendo variar entre 0 e 1, sendo o melhor valor a obter, o mais próximo deste último.

Na Tabela 4.10 são indicados os valores de carga aplicados durante os ensaios, sendo replicados três ensaios para os valores de 35, 40, e 45 N , dois ensaios para a amplitude de 30 N e um ensaio apenas para a amplitude de 32,5 N .

Tabela 4.10. Valores de carga aplicados nos ensaios de fadiga

Código	Carga Máx. [N]	Carga Mín. [N]	Amplitude[N]	Carga Média [N]
EFA_CF[1-12]	63	3	30	33
	67,5	2,5	32,5	35
	74	4	35	39
	84	4	40	44
	94	4	45	49

Os ensaios foram limitados até uma vida inferior a 500000 ciclos, devido ao elevado tempo de ensaio requerido para uma frequência de 2 Hz. A máquina de ensaios não permitiu realizar ensaios com frequência superior a 2 Hz devido à baixa rigidez dos provetes. Os ensaios foram realizados com onda de carga sinusoidal e uma razão de carga $r=0,05$.

Na Tabela 4.11. estão presentes os resultados de todos os ensaios realizados, e comentários sobre a rotura dos provetes.

Tabela 4.11. Dados sobre os ensaios de fadiga realizados

Código	ΔP [N]	Ciclos	Comentários
EFA_CF1	60	448131	Apresentava Indícios de Rotura
EFA_CF2	60	420000	Não apresentava Indícios de Rotura
EFA_CF3	65	157000	Rotura
EFA_CF4	70	12354	Rotura
EFA_CF5	70	60756	Rotura
EFA_CF6	70	22838	Rotura
EFA_CF7	80	2308	Rotura
EFA_CF8	80	2057	Rotura
EFA_CF9	80	1822	Rotura
EFA_CF10	90	336	Rotura
EFA_CF11	90	788	Rotura
EFA_CF12	90	398	Rotura

Na Figura 4.6., apresenta-se um gráfico de escalas logarítmicas, mostrando a gama de carga aplicada, ΔP , em função do número de ciclos até à rotura, N_r .

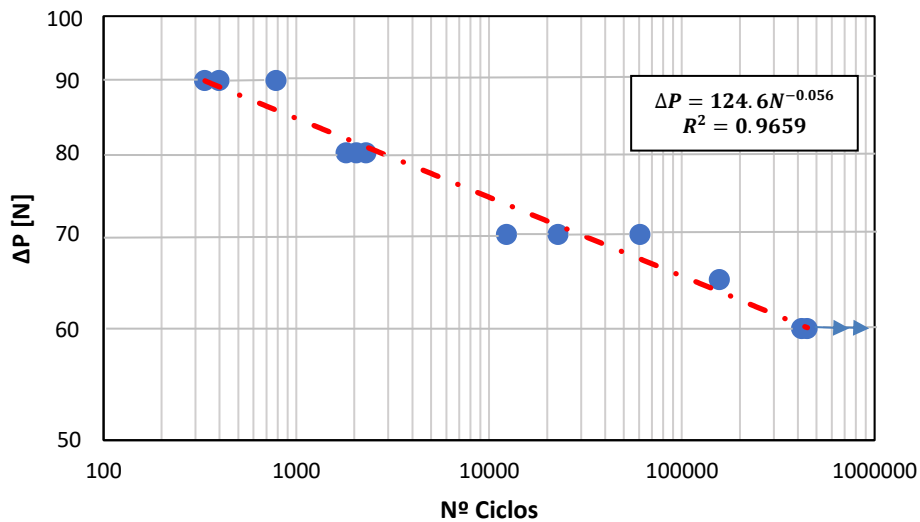


Figura 4.6. Gráfico de valores obtidos durante a realização dos ensaios de fadiga

À medida que a gama de carga aplicada é reduzida, aumenta a vida de fadiga, como é normal. A curva média encontra-se também representada, tendo sido obtido um valor para o coeficiente de determinação de 0.968, que indica uma dispersão normal para ensaios de fadiga. O expoente de fadiga com o valor de -0.056, pode ser considerado um valor baixo, indicando uma alta sensibilidade da vida em relação à carga aplicada. Para uma variação da gama de carga de 1,5x, entre 60 e 90 N, verificou-se uma variação de vida, expressa através de ciclos, de 1330x, entre 448000 e 336 ciclos. Para uma vida de 500000 ciclos a resistência à fadiga é cerca de 55% da carga de rotura estática. Para uma vida de 500 ciclos a resistência à fadiga é cerca de 80% da carga de rotura estática.

4.3. Análise das superfícies de rotura por MEV

Na Figura 4.7. está apresentado o material TNT após a realização da soldadura com o padrão A, sendo a Figura 4.7. (a) a vista frontal e (b) a vista de trás.

Podemos verificar que a superfície com maior profundidade de indentação corresponde à face do material que estava em contacto com o padrão (Figura 4.7. (a)), enquanto que a superfície com menor profundidade de indentação corresponde à face que estava em contacto com a o sonotrodo. (Figura 4.7. (b)).

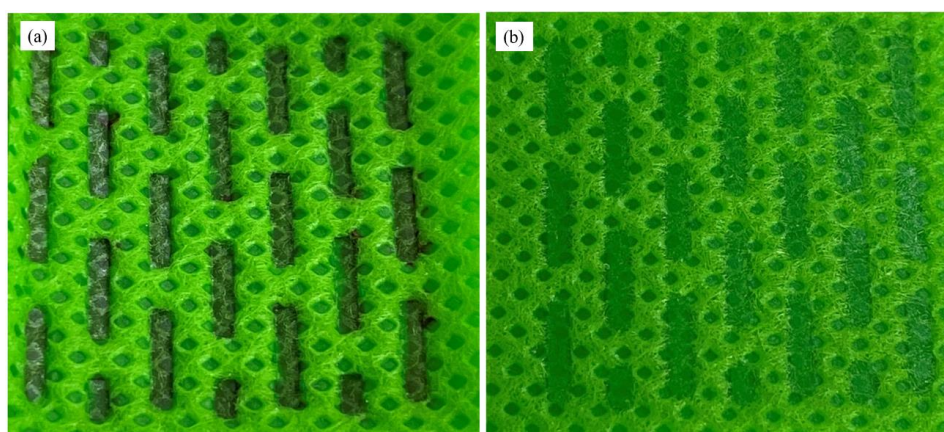


Figura 4.7. Tecido após realização de soldadura; (a) vista frontal, (b) vista de trás

De forma a compreender os mecanismos de rotura das soldaduras, foi realizada uma caracterização com recurso a imagens *SEM*, na fronteira entre o material base e a zona soldada, de um dos provetes EF_A1 utilizado num ensaio de arrancamento.

Na Figura 4.8. (a), podemos verificar as zonas soldadas com forma losangular realizadas durante o fabrico do tecido, enquanto a Figura 4.8. (b) mostra uma das regiões

com forma retangular resultante da soldadura com o padrão A. Como se pode observar, a zona onde ocorre a soldadura, encontra-se comprimida em relação ao restante material base, estando também presentes algumas zonas de sobreposição com as áreas de soldadura losangulares resultantes da fabricação do tecido. Na Figura 4.8. (c) mostra-se uma imagem de ampliação da Figura 4.8. (b) mostrando com maior detalhe as duas regiões referidas.

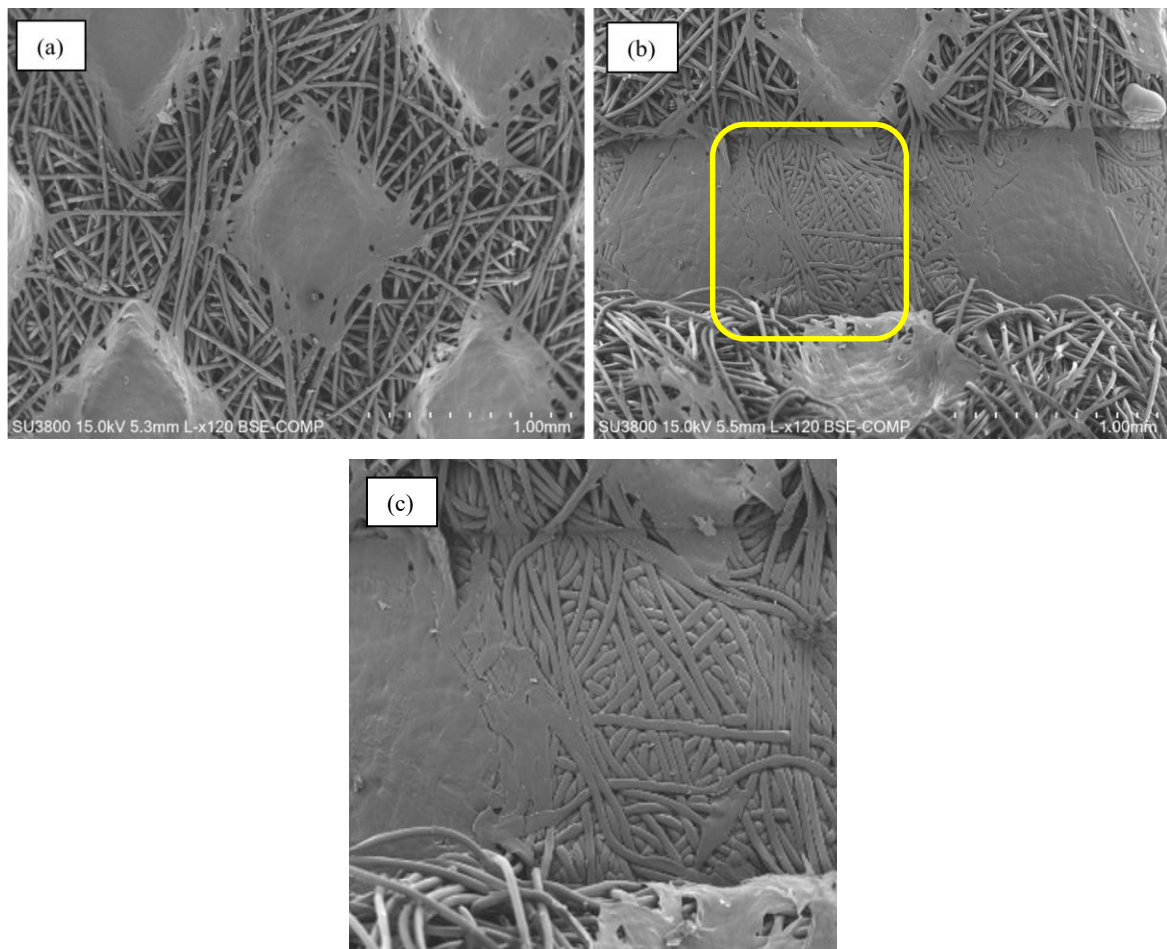


Figura 4.8. Material Base (a) ; Zona Soldada (b) ; ampliação da zona amarela (c)

Pode observar-se que nas zonas de sobreposição parece haver uma fusão quase completa dos filamentos constituintes do tecido; na restante área de soldadura a fusão dos filamentos é incompleta. Os filamentos encontram-se comprimidos uns sobre os outros, deformados plasticamente de modo mais intenso nas zonas de cruzamento, obtendo-se uma ligação com um nível de resistência na interface das peças de tecido inferior à que se obteria com fusão total. Como se verá mais tarde, a rotura ocorre quer na interface da soldadura, quer na fronteira entre as zonas soldadas e o material base.

Na Figura 4.9. (a) mostra-se uma imagem da zona de fratura de uma soldadura que ocorreu durante o ensaio de arrancamento EF_A1. Nas Figura 4.9. (b) e Figura 4.9. (c) apresentam-se detalhes dos dois modos de rotura principais. Na Figura 4.9. (b) observa-se o modo de rotura por separação entre filamentos na interface de soldadura entre as duas peças de tecido que participam na união. São claramente visíveis zonas com as impressões de deformação plástica, onde se encontravam justapostos os filamentos antes da sua separação. Este modo de falha ocorre em zonas de soldadura onde se sobrepõem zonas das duas peças de tecido sem pontos losangulares da soldadura prévia do tecido. Na Figura 4.9. (c) observa-se o modo de rotura numa zona onde há sobreposição da área de soldadura entre as peças de tecido com uma zona losangular de soldadura do tecido. Pode observar-se que neste caso ocorre a fratura dos filamentos da peça de tecido superior, na fronteira de ligação com a zona fundida da peça inferior (região de soldadura prévia do tecido) e ainda a fratura frágil dentro desta zona.

Podemos também verificar na Figura 4.9. (b) a presença de várias zonas onde não ocorreu a fusão total das fibras (zona marcada com círculo vermelho). Este fenómeno pode ser explicado pela espessura do tecido não ser uniforme, levando a que o calor transmitido resultante das vibrações, não seja distribuído igualmente. Também na Figura 4.9. (b), assinalado a laranja, mostra a presença de zonas marcadas pelas fibras devido à compressão, sendo estas zonas consequentes da fraca união entre fibras, levando a que se soltassem.

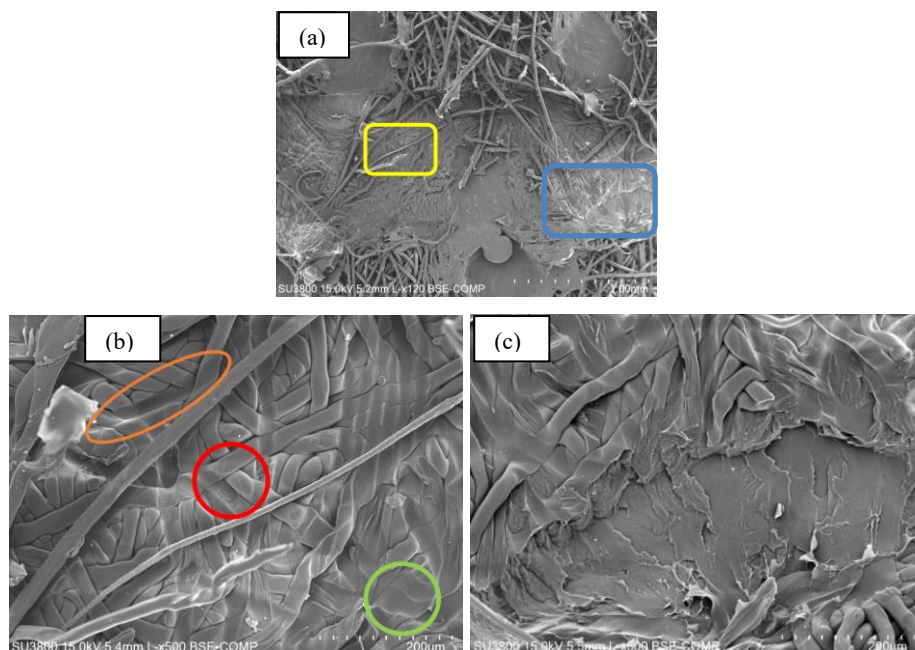


Figura 4.9. (a) Zona de Soldadura após rotura; (b)ampliação da zona a amarelo da Figura 4.7 (a) ; (c) ampliação da região a azul da Figura 4.7 (a)

Apesar da alteração da forma das fibras devido à compressão e calor gerado pelas vibrações ultrassónicas, quase todas se encontram em bom estado, permanecendo contínuas, mantendo as suas propriedades, o que origina uma junta soldada capaz de suportar níveis elevados de solicitações *Pull*.

5. CONCLUSÕES

Do presente trabalho realizado, foi possível contruir um conjunto de ideias principais. Sendo assim, podemos retirar que:

- ✓ De uma forma geral, em ambas as solicitações *Peel* e *Pull*, o padrão A foi o que teve melhor prestação;
- ✓ Em todos os tipos de geometria de padrão, um aumento da distância de soldadura é favorável em situações de solicitações do tipo *Peel*, e o inverso em solicitações do tipo *Pull*;
- ✓ Em comparação com o valor médio de rutura do material base, as soldaduras tiveram uma eficiência de no mínimo 87% nos ensaios de *Pull*;
- ✓ Os padrões de geometria com área de ligação maior, tiveram melhores prestações em ambos os ensaios;
- ✓ Nos ensaios de *Peel*, padrões com comprimento maior na primeira linha do padrão, tiveram melhores prestações;
- ✓ Nos ensaios *Pull*, a variação de resistência estática com a força de ativação é menor para distâncias de soldadura elevadas do que para distâncias de soldadura baixas;
- ✓ Em solicitações do tipo *Peel*, a diminuição da força de ativação das vibrações em relação ao valor de referência, aumenta a resistência estática para uma distância de soldadura maior (0.45 mm). No caso de uma distância menor (0.31 mm), esta variação não é tão acentuada. Com o aumento da força verifica-se o oposto;
- ✓ Os ensaios de fadiga apresentaram uma dispersão normal com um fator de determinação de 0.968;
- ✓ O valor baixo de -0,056 para o expoente de fadiga, indica uma alta sensibilidade da vida de fadiga em relação à carga aplicada.
- ✓ A razão de fadiga foi de 0,8 para uma vida de 500 ciclos e de 0,55 para 500000 ciclos.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Durante a realização desta dissertação, foram surgindo ideias sobre aspetos a serem investigados no futuro, alguns dos quais não foram concretizados nesta dissertação pela falta de tempo:

- ✓ Concretização dos ensaios de fadiga dos provetes EFA_CF1 e EFA_CF2;
- ✓ Estudo do comportamento mecânico de tecidos à base de outros polímeros;
- ✓ Aprofundamento do estudo paramétrico, incluindo também a energia de soldadura;
- ✓ Realização de outros tipos de testes de caracterização da resistência mecânica, entre eles, ensaios de fluência;
- ✓ Caracterização mecânica de soldaduras realizadas em prensas ultrassónicas de diferente modo de funcionamento, por exemplo, prensas pneumáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. Pourmohammadi (2013) “Nonwoven materials and joining techniques”, University of Payame Noor, Iran, DOI: 10.1533/9780857093967.4.565

American Welding Society, “Welding Handbook “8th Edition vol.2, Welding Processes.

A. Benatar & T. G. Gutowski (1989), “Ultrasonic welding of PEE K graphite APC-2 composites. “Polymer Engineering and Science, 29, 1705–1721.

E. de Vries (2004). Mechanics and mechanisms of ultrasonic metal welding. (Electronic Thesis or Dissertation). Retirado de <https://etd.ohiolink.edu/> a 4/04/2022

J. Devine (1998), “Ultrasonic bonding of plastics and textiles for medical and other devices. Proceedings, ICAWT ’98 International Conference on Advances in Welding Technology,” Columbus, OH: Edison Welding Institute.

Dukane Co. (2011) “Guide to Ultrasonic Plastics Assembly”.

A. Fernandes (2007). Desenvolvimento de Software de Controlo Estatístico de Qualidade e Análise Experimental das Ligações Realizadas por Soldaduras por Ultrassons e Cravamento em Cablagens para a Indústria Automóvel.

I. D. Froment (1999), “Ultrasonic Welding of Thermoplastics, Cambridge: TWI.”

Grewell D. e Benatar A. (2007) “Welding of Plastics: Fundamentals and New Developments”, Agricultural and Biosystems Engineering, Iowa State University, Ames, IA, USA

Grewell, D.A.; Benatar, A.; Park, J.B. Plastics and Composites Welding Handbook; Hanser Gardner Publications: Munich, Germany, 2013

H. Dubbel, W. Beitz, K.H. Kutner, (1994) “Handbook of mechanical engineering”, Springer-Verlag, pp. D25, F5, K84-K85, ISBN 0-387-19868-7

I. Jones, TWI Ltd, UK (2013) “11-The use of heat sealing, hot air and hot wedge to join textile materials”, DOI: 10.1533/9780857093967.3.355

I. Jones, TWI Ltd, UK (2013) “12 - Ultrasonic and dielectric welding of textiles” DOI: 10.1533/9780857093967.3.374

I. Jones, TWI Ltd, UK & A. Patil, Vascutek Ltd, UK (2013) “Laser seaming of fabrics”, DOI: 10.1533/978085709396.7.3.398.

J. Kumar, (2013) “Ultrasonic Machining - a comprehensive review”, *Machining Science and Technology: An International Journal*, Volume 17.

Jones I & Stylios GK. (2013) “Joining textile: Principle and application”, 1st edn. Philadelphia: Woodhead Publishing Series in Textiles.

M.J. Troughton, (2008), “Handbook of Plastics Joining: a practical guide “2^a Edição.

K. Mahmut, I. M. Suleyman “Analysing effect of the factors on ultrasonic seam tensile properties of nonwoven fabrics” by Nested Anova Design. *Inter. J. Cloth. Sci. Technol.* 2015, 27, 803–817

T. Marques (2014), “Desenvolvimento e melhoria dos processos de soldadura por ultrassons de fios de cobre “Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

S. F. Raza (2015), “Ultrasonic welding of thermoplastics” degree of Doctor of Philosophy to the University of Sheffield.

S. S. Volkov (2001) “Production of non-woven materials by fixing fibre lap rolls using ultrasonic welding”, *Welding International*, 15:9, 748-752, DOI: 10.1080/09507110109549437

S. Yadav & C. Doumanidis, (2005) “Thermomechanical Analysis of an Ultrasonic Rapid Manufacturing (URM) System”, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 7.

S.J. Russel & P.A. Smith (2016) “6. Technical fabric structures – 3. Nonwoven fabrics”, DOI:10.1016/B978-1-78242-458-1.00006-6

S.J. Russell, (2007) “Handbook of Nonwovens, Woodhead Publishing In Textiles, Woodhead Publishing Series.

M. Shakil, N.H. Tariq, M. Ahmad, M.A. Choudhary, J.I. Akhter, S.S Babu, (2014) “Effect of ultrasonic welding parameters on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints”, *Materials and Design*.

W. Shi, T. Little, “Ultrasonic Joining of Textile Materials.”, *Inter. J. Cloth. Sci. Technol.* 2000, 12, 331–350.

- M.N. Tolunay, P.R. Dawson, K.K. Wang, (1983), “Heating and bonding mechanisms in ultrasonic welding of thermoplastics”, *Polym Eng. Sci*1983, 23, 726
- T. Karthik, Prabha Karan C., R. Rathinamoorthy, (2017) “Nonwovens: Process, Structure, Properties and Applications.”
- J. Valente (2011), “Caracterização e Desenvolvimento da Soldabilidade por Ultra-Sons de Cablagens Multifilares de Secção Fina”, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica Instituto Superior Técnico.
- W. Albrecht, H. Fuchs, W. Kittelmann, (2006) “Nonwoven Fabrics: Raw Materials, Manufacture, Applications, Characteristics, Testing Processes”
- S. Weijua, L. Trevor, (2000), “Mechanisms of ultrasonic joining of textile materials.” *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, 12, 331–350
- A. Yussuf, I. Sbarski, M. Solomon, N. Tran & J. Hayes (2007), “Sealing of polymeric-microfluidic devices by using a high frequency electromagnetic field and screen-printing technique.” *Journal of Materials Processing Technology*, 189(1–3), 401–408.

ANEXO A

Thermoplastic 20kHz Amplitude Reference					
Amorphous Resins	Microns	Thousandths	Semi-Crystalline Resins	Microns	Thousandths
ABS (Cyclocac)	30-70	1.2-2.8	Acetal (Delrin, Celcon)	75-125	3.0-5.0
ABS/Polycarbonate (Cyclooy, Pulse)	50-125	2.0-5.0	Liquid Crystal Polymers (Xydar)	60-125	2.4-5.0
Phenylene-Oxide (Noryl)	50-90	2.0-3.6	Polyamide (Nylon, Zytel)	60-125	2.4-5.0
Polycarbonate (Lexan)	50-100	2.0-4.0	Polyester PBT (Celanex, Valox)	60-125	2.4-5.0
Polycarbonate/Polyester (Xenoy Macroblend)	50-100	2.0-4.0	Polyester PET (Rynite)	60-125	2.4-5.0
Polyetherimide (Ultem)	60-125	2.4-5.0	Polyetherether Ketone (PEEK)	60-125	2.4-5.0
Polymethyl Methacrylate (Acrylic, Plexiglass)	40-70	1.6-2.8	Polyethylene P/E	70-125	2.8-5.0
Polystyrene	60-65	1.2-2.6	Polymethylpentene (TPX)	70-125	2.8-5.0
Polysulfone (Udel)	65-100	2.6-4.0	Polyphenylene Ether/Oxide (Prevex)	60-125	2.4-5.0
Polyvinylchloride (Rigid PVC)	40-75	1.6-3.0	Polyphenylene Sulfide PPS (Ryton)	80-125	3.2-5.0
SAN/NAS	30-65	1.2-2.6	Polypropylene P/P	70-125	2.8-5.0
Styrene Block Copolymers (K-Resin)	40-90	1.6-3.6			
Trademarked names appear in parentheses. NOTE: The information in this table is for reference only. Contact your material supplier or Dukane regarding your individual project.			Applications	Microns	Thousandths
			Welding	30-125	1.2-5.0
			Staking	75-125	3.0-5.0
			Swaging	75-125	3.0-5.0
			Inserting	25-65	1.0-2.6
			Spot Welding	50-125	2.0-5.0
			Degating	75-125	3.0-5.0

ANEXO B

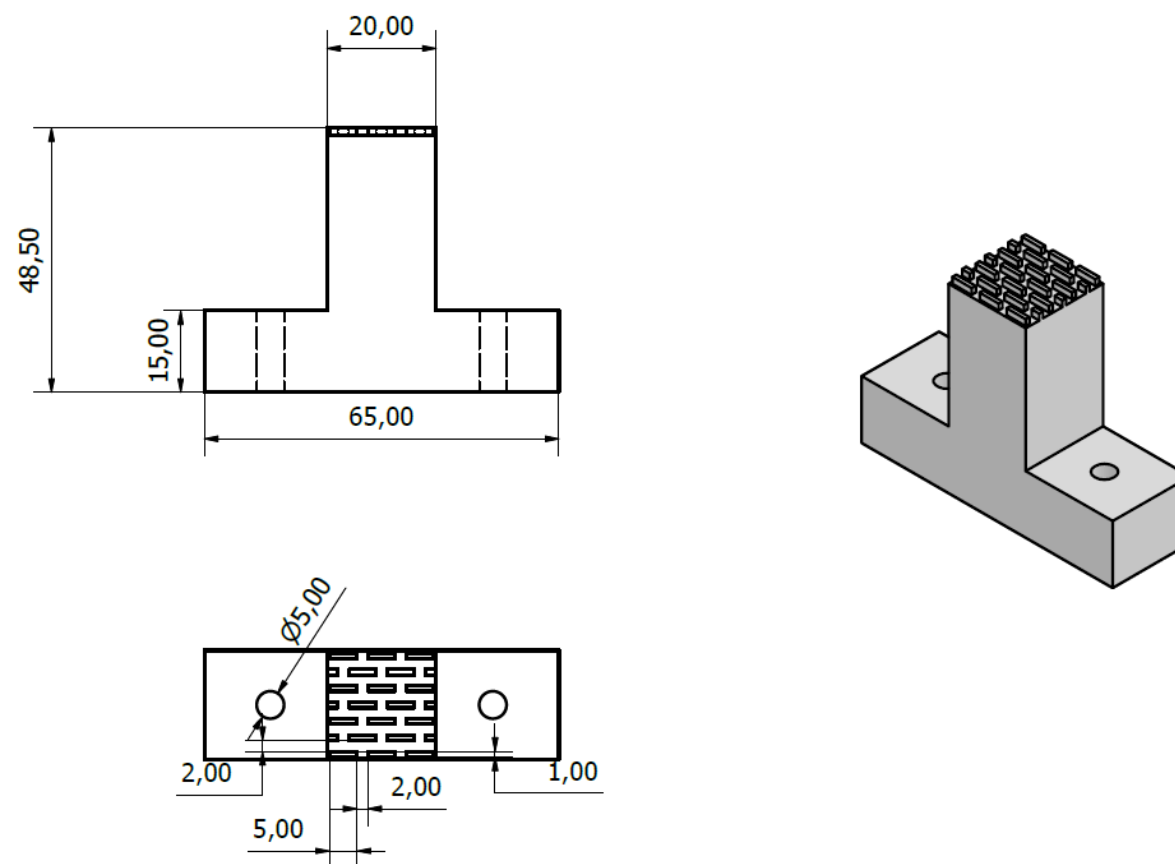


Figura 5.1 Características Geométricas do padrão A

ANEXO C

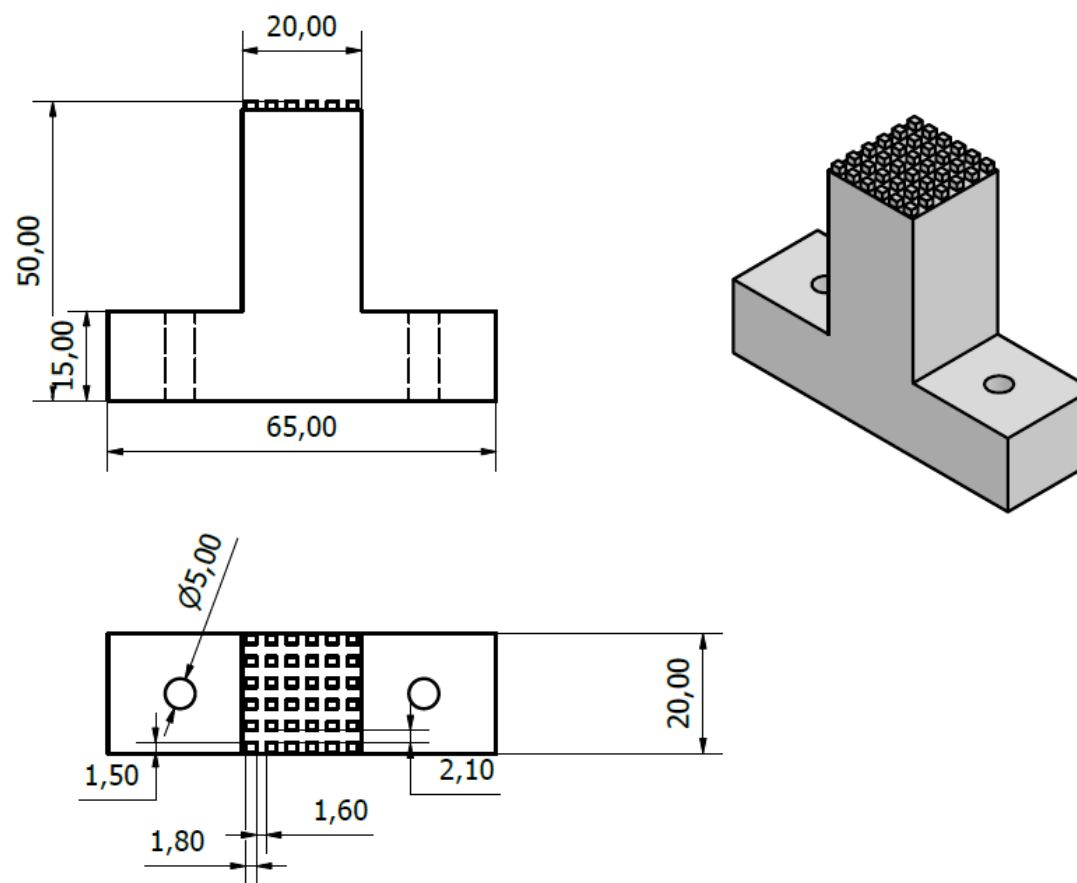


Figura 5.2 Características Geométricas do padrão B

ANEXO D

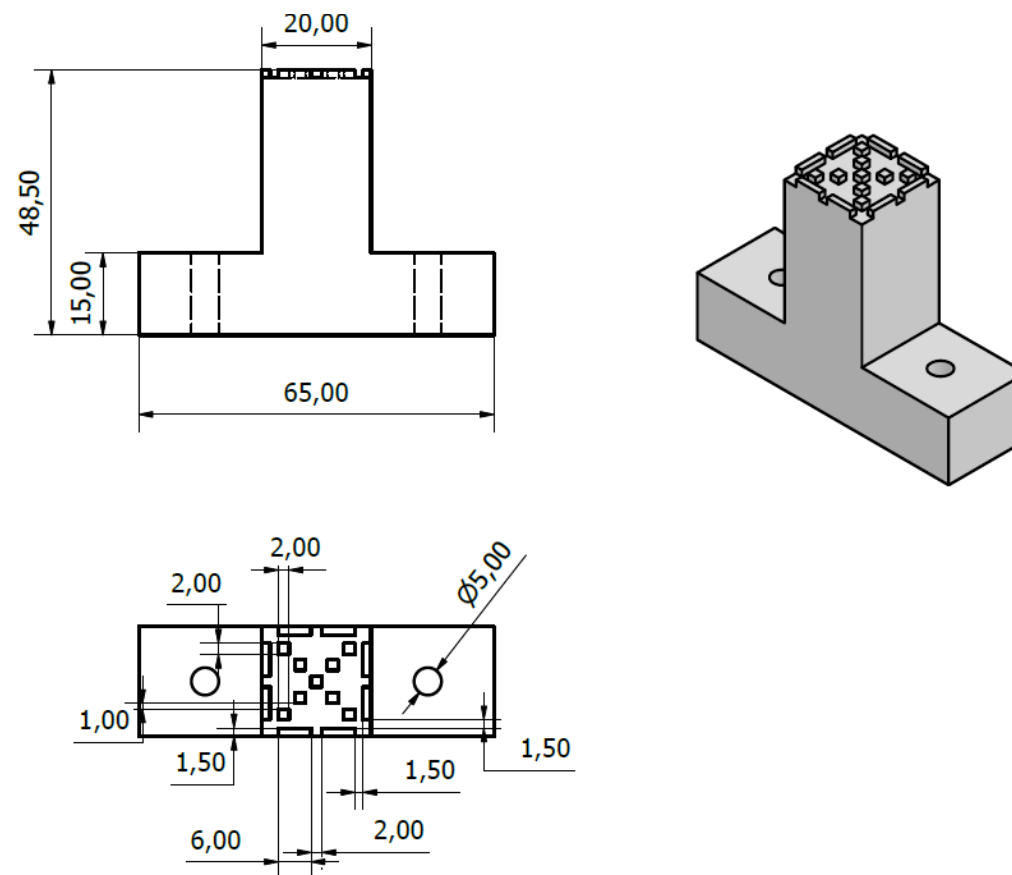


Figura 5.3. Características Geométricas do padrão C

