



Diamantino Gato Brás

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Soldadura de cabos multifilares de metais dissimilares
(cobre e alumínio) através de ultra-sons**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda,
Professora Associada com Agregação,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Eng. Filipe Anuniação, Delphi

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira
Vogais: Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos
Eng. Filipe Anuniação

Soldadura de cabos multifilares de metais dissimilares (cobre e alumínio) através de ultrasons

“Copyright” Diamantino Gato Brás, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou em forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedico este trabalho aos meus pais
Diamantino e Stela, à minha irmã
Márcia, aos meus avós
Manuel e Lucília, a toda a minha família e amigos.

Dedicatória especial a uma pessoa que ainda viu o início desta caminhada mas infelizmente não
está mais entre nós, minha bisavó Maria.
Sei o quanto valorizavas a formação académica por isso, esta é para ti!

Possunt quia posse videntur
(eles conquistaram porque acreditaram que eram capazes de conquistar)
Públio Virgílio Maro, “Eneida”, séc. I a.C.

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Rosa Miranda, em primeiro lugar por me ter aceitado neste projecto, e depois pela disponibilidade e acessibilidade demonstradas ao longo deste percurso. Agradecer também todas as revisões e dicas dadas de maneira a melhorar esta tese, que não seria possível sem o seu empenho e contributo. Um muito obrigado do fundo do coração.

Ao meu co-orientador, Engenheiro Filipe Anunciação, obrigado pelo apoio diário dado, assim como pelas reuniões semanais de seguimento das actividades executadas. Mesmo com uma agenda tão preenchida, nunca negar um esclarecimento a uma dúvida, quer pessoalmente, quer via e-mail. Um muito obrigado do fundo do coração.

À Delphi, a casa que me acolheu de braços abertos durante quatro meses, onde todas as pessoas se mostraram bastante hospitaleiras, levando a uma integração excepcional. Particularizar a equipa dos ultra-sons e do cravamento, com quem trabalhei directamente, pelo à vontade em me delegar tarefas com um elevado grau de responsabilidade, demonstrando assim a sua confiança em mim e no meu trabalho, disponibilizando sempre o apoio e orientações adequadas. Uma experiência do mundo do trabalho que sinceramente não esperava ter, mas que felizmente aconteceu e não poderia estar mais grato por tal, saindo enriquecido tanto a nível profissional como a nível pessoal, com novas amizades. Um muito obrigado do fundo do coração.

Um agradecimento ao grupo de alunos da FCT que se encontravam a fazer o seu estágio PIPP (Programa de Introdução à Prática Profissional) na Delphi, com a duração de um mês, coincidente com o meu primeiro mês de estágio na empresa, em particular ao Jaime Fidalgo, colega de curso que trabalhou comigo durante o seu estágio. Pela seu entusiasmo, dedicação e disponibilidade, o meu braço direito durante esse mês que me ajudou a dar o impulso no início deste estudo. Um muito obrigado do fundo do coração.

Fora as variáveis que vão mudando consoante as diferentes etapas que vamos enfrentando, o que nos dá a confiança e a coragem de enfrentar os novos desafios e de os ultrapassar são as constantes que temos na nossa vida, e a essas agradeço, mais uma vez, o carinho e o apoio incondicional...obrigado por tudo minha família e amigos. Sozinho seria impossível, e venha o próximo desafio que estamos cá para o enfrentar juntos, mais uma vez. Um muito obrigado do fundo do coração.

Resumo

Com este trabalho pretendeu-se estudar a soldadura por ultra-sons dos cabos de alumínio e cobre para substituir os terminais de cravamento usados actualmente. A obtenção de um processo fiável e reprodutível permite uma poupança económica, pois não só evita a necessidade da produção dos terminais, como diminui o peso das cablagens.

Assim, foi estudada a soldadura de cabos multifilares de metais dissimilares por ultra-sons, nomeadamente cabos de cobre com cabos de alumínio.

Na execução das soldaduras foi utilizada um protótipo de uma máquina dedicada à soldadura de cabos com um software específico para a soldadura de cabos dissimilares que ainda não se encontra disponível no mercado.

Identificaram-se os parâmetros operatórios mais preponderantes na qualidade das soldaduras, bem como o efeito da degradação do isolamento e consequente contaminação dos fios na força de rotura das soldaduras.

A soldadura de cabos de cobre com cabos de alumínio por ultra-sons é um processo rápido, estável e mais económico que a utilização dos terminais de cravamento.

A máquina utilizada tem uma boa fiabilidade e sensibilidade à falta de material nos cabos.

A contaminação dos fios devido à degradação do isolamento é preponderante para a qualidade das soldaduras (medida pelas forças de corte das juntas soldadas), pelo que são fundamentais as condições de armazenamento das bobinas de cabo.

Palavras-Chave: soldadura por ultra-sons, ligação dissimilar, cobre, alumínio, soldadura de multifilares

Abstract

This study was intended to investigate the ultrasonic welding of aluminum and copper cables to replace the crimping terminals currently used. Obtaining a reliable and reproducible process provides cost savings because not only it avoids the need of production of the terminals as it also decreases the weight of the wiring harness.

Thus, the welding of dissimilar metals multiwire cables by ultrasound , in particular copper cable with aluminum wires, was studied.

For the execution of the welding was used a prototype of a machine that is dedicated to the cable welding running a specific software for welding dissimilar cables which is not yet available on the market.

The most prevalent operating parameters in weld quality and the degradation of the insulation effect and consequent contamination of the yarn breaking strength of the welds were identified.

The welding of copper cables with aluminum cables by ultrasound is a faster, more stable and economical process than the use of the crimping terminal.

The machine that was used has a good reliability and sensitivity to the lack of material in cables.

The contamination of the wires due to insulation degradation is preponderant in the weld quality (as measured by shear forces welded joints) , for which the storage conditions of the cable reels are fundamental.

Key words: ultrasonic welding, dissimilar lead, copper, aluminum, multiwire welding

Índice

Agradecimentos.....	VII
Resumo.....	IX
Abstract	XI
Índice de Figuras	XV
Índice de tabelas	XVII
1. Introdução	1
1.1. Motivação.....	2
1.2. Objectivos	2
1.3. Estrutura da dissertação.....	3
2. Estado da arte	5
2.1. Soldadura por ultra-sons.....	5
2.1.1. Princípios físicos	6
2.1.2. Vantagens e desvantagens	8
2.2. Parâmetros do processo de soldadura.....	11
2.3. Soldadura de materiais dissimilares	15
2.3.1. Características do alumínio	16
2.3.2. Características do cobre	17
2.4. Defeitos de soldadura.....	18
2.5. Aplicações	19
3. Procedimento experimental.....	21
3.1. Materiais.....	21
3.2. Relação de secções transversais cobre/alumínio	22
3.3. Equipamentos utilizados	25
3.3.1. Máquina de soldadura	25
3.3.2. Máquinas de tracção uniaxial	28
3.4. Monitorização	28
3.5. Optimização	29
3.5.1. Sistema de posicionamento	29
3.5.2. Parâmetros de soldadura.....	30
3.6. Validações	33

3.7.	Ensaio realizado	34
3.7.1.	Ensaio de tracção uniaxial	34
3.7.2.	Degradação do isolamento	34
4.	Resultados	37
4.1.	Monitorização	37
4.2.	Sistema de posicionamento	41
4.3.	Optimização de parâmetros de soldadura	42
4.4.	Validações	53
4.5.	Degradação do isolamento	54
5.	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	57
6.	Bibliografia	61

Índice de Figuras

Figura 2.1- <i>Splice</i> de 26 mm ² de secção: (a) vista lateral sem manga retráctil de isolamento; (b) vista de um corte do <i>splice</i> com manga retráctil de isolamento.	6
Figura 2.2-Potência de soldadura: (a) exemplos de curvas de potência eléctrica de soldadura; (b) curva de potência representativa [3].....	13
Figura 2.3-Sistema de soldadura por ultra-sons	14
Figura 2.4-Cabo de cobre espelhado devido a entrega energética excessiva	18
Figura 2.5-Presença de loops no cabo de alumínio causados por amplitude excessiva durante a soldadura	19
Figura 2.6-Esmagamento dos cabos devido a excesso de pressão e/ou energia.....	19
Figura 3.1-Máquina de soldadura por ultra-sons utilizada no estudo	25
Figura 3.2-Gerador de ultra-sons: (1) conversor; (2) amplificador; (3) sonótrodo [14].....	26
Figura 3.3-Componentes da zona de soldadura: (4) garra deslizante; (5) placa de superfície com encaixe [15].....	27
Figura 3.4-Componentes da zona de soldadura: (6) bigorna [14].....	27
Figura 3.5-Máquina de tracção uniaxial para secções mais pequenas (Máquina B).....	28
Figura 3.6-Máquina de tracção uniaxial para secções grandes (Máquina C).....	28
Figura 4.1-Ausência de 5 % de material nos <i>splices</i> de 16 mm ² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.	38
Figura 4.2-Ausência de 6 % de material nos <i>splices</i> de 16 mm ² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.	38
Figura 4.3-Ausência de 7 % de material nos <i>splices</i> de 16 mm ² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.	38
Figura 4.4-Ausência de 5 % de material nos <i>splices</i> de 26 mm ² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.	39
Figura 4.5-Ausência de 6 % de material nos <i>splices</i> de 26 mm ² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.	39
Figura 4.6-Ausência de 5 % de material nos <i>splices</i> de 60 mm ² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.	40
Figura 4.7-Ausência de 6 % de material nos <i>splices</i> de 60 mm ² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.	40
Figura 4.8-Ausência de 5 % de material nos <i>splices</i> de 85 mm ² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.	40
Figura 4.9-Lado esquerdo exemplo de soldadura com cabos desalinhados; lado direito exemplo de soldadura com cabos alinhados	41
Figura 4.10-Optimização dos parâmetros iniciais	43

Figura 4.11-Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados	44
Figura 4.12- Gráfico de contorno da força de ruptura consoante a amplitude e energia utilizadas durante a soldadura	44
Figura 4.13-Optimizador de parâmetros	45
Figura 4.14-Optimização dos parâmetros pré-definidos	45
Figura 4.15-Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados	46
Figura 4.16-Gráfico de cubo para forças de ruptura	47
Figura 4.17-Optimizador de parâmetros	47
Figura 4.18-Optimização dos parâmetros pré-definidos	48
Figura 4.19-Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados	49
Figura 4.20-Gráfico de contorno da força de ruptura consoante a pressão e energia utilizadas durante a soldadura	49
Figura 4.21-Optimizador de parâmetros	50
Figura 4.22-Optimização dos parâmetros pré-definidos	51
Figura 4.23-Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados	52
Figura 4.24-Gráfico de cubo para forças de ruptura	52
Figura 4.25-Optimizador de parâmetros	53
Figura 4.26- <i>Splices</i> com <i>loops</i> devido a contaminação do alumínio.	55

Índice de tabelas

Tabela 2.1-Soldabilidade dos materiais através de ultra-sons [3]	16
Tabela 2.2-Sistema de designação de liga para as ligas de alumínio [9]	17
Tabela 2.3-Classificação do cobre e das ligas de cobre [9].....	18
Tabela 3.1-Características dos cabos de cobre utilizados [11].....	21
Tabela 3.2-Características dos cabos de alumínio utilizados [10]	22
Tabela 3.3-Características do alumínio e cobre constituintes das cablagens [10-11]	22
Tabela 3.4-Dados da máquina de soldadura [12]	25
Tabela 3.5-Tabela de optimização de parâmetros utilizada	31
Tabela 3.6-Parâmetros de soldadura iniciais para a secção de 16 mm ²	32
Tabela 3.7-Parâmetros de soldadura pré-definidos para a secção de 26 mm ²	32
Tabela 3.8-Parâmetros de soldadura pré-definidos para a secção de 60 mm ²	33
Tabela 3.9-Parâmetros de soldadura pré-definidos para a secção de 85 mm ²	33
Tabela 4.1-Detectabilidade de falta de filamentos da máquina utilizada.....	41
Tabela 4.2-Valores de força de tracção e desvio padrão para soldaduras semelhantes com e sem alinhamento dos cabos	42
Tabela 4.3-Parâmetros optimizados para K2	45
Tabela 4.4-Parâmetros optimizados para K2	47
Tabela 4.5-Parâmetros optimizados para K2	50
Tabela 4.6-Parâmetros optimizados para K2	53
Tabela 4.7-Comparação de dados relativos às soldaduras fio-com-fio e fio com terminal equivalentes.....	54
Tabela 4.8-Valores das forças de ruptura das soldaduras após a primeira semana	55

1.Introdução

Os automóveis actuais estão cada vez mais amigos do utilizador, mais seguros, mais confortáveis, mais ecológicos e mais eficientes enquanto as suas performances são, também elas, cada vez mais elevadas. Grande parte desta evolução deve-se à introdução de alta tecnologia (desde actuadores, a sensores, até sistemas de gestão dos motores e de apoio à condução) que apenas é possível se tivermos uma rede de cabos que permita a alimentação eléctrica destes sistemas bem como a comunicação entre todos eles de forma a permitir o seu correcto funcionamento.

Em 1960 os sistemas eléctricos dos veículos eram constituídos por cerca de 30-40 cabos que faziam todas as ligações necessárias e contavam com apenas um módulo electrónico que era o auto-rádio. Hoje em dia é comum um automóvel de classe média ter cerca de 1000-1500 cabos e 75-100 controladores electrónicos. Problemas que vão desde preocupações ambientais, sistemas de infoentretenimento cada vez mais completos e elaborados e uma nova onda de sistemas inovadores de segurança estão a motivar esta expansão. Muitos sistemas mecânicos e hidráulicos estão a ser substituídos por sistemas eléctricos/electrónicos como por exemplo o sistema de travagem, a direcção assistida e o acelerador. Isto conduz a um complexo “sistema nervoso” do automóvel constituído por quilómetros de cabo e dezenas de módulos electrónicos.

1.1. Motivação

A crescente complexidade das cablagens nos automóveis leva a um aumento do peso das mesmas. Dado que o peso é um tema muito sensível na indústria automóvel, a substituição do cobre por alumínio já está em curso, uma vez que o alumínio é mais barato e uma cablagem de alumínio é cerca de 40 % mais leve do que uma equivalente de cobre.

Dado que todos os componentes num automóvel estão preparados para cablagens de cobre, a substituição não pode ser directa, pois é necessário fazer um excerto de cobre antes do cabo de alumínio chegar ao componente de forma a conseguir fazer a ligação com o mesmo.

Neste momento este excerto é realizado recorrendo a terminais de cravamento. Estes terminais têm duas extremidades. O alumínio é soldado ao terminal através de ultra-sons numa das extremidades, enquanto o cobre, na outra extremidade, é cravado, ocorrendo assim a ligação dos dois cabos através do terminal. Isto implica a produção de terminais específicos para cada tipo de fio, aumento de peso por adição de mais este componente e, em alguns casos, dificuldade na instalação dos mesmos devido ao reduzido espaço disponível.

A soldadura de cabos de cobre através de ultra-sons já é uma tecnologia bastante usada na indústria e com resultados excelentes, e o objectivo é conseguir desenvolver esta tecnologia para a soldadura de cabos dissimilares (cobre-alumínio) de forma a eliminar a necessidade de terminais nestas ligações.

1.2. Objectivos

O principal objectivo deste estudo foi a optimização e validação de parâmetros na soldadura por ultra-sons de cabos de metais dissimilares (alumínio e cobre neste caso) de quatro secções distintas.

As soldaduras foram feitas numa máquina experimental, em fase final de desenvolvimento. Em colaboração com o fabricante da máquina foi também desenvolvido um processo de optimização da máquina e, identificados os aspectos susceptíveis de melhoria.

1.3. Estrutura da dissertação

Este documento está dividido em cinco capítulos. O primeiro é um capítulo introdutório onde se faz uma contextualização dos objectivos do trabalho desenvolvido.

No segundo capítulo aborda-se o estado da arte, onde são apresentados os princípios físicos do processo de soldadura por ultra-sons, vantagens e desvantagens, e os parâmetros do processo. Por fim, é abordada a soldadura de metais dissimilares, os problemas de soldabilidade observados neste processo e algumas aplicações actuais deste.

O terceiro capítulo descreve o procedimento experimental, onde se apresentam os materiais, a justificação das secções de fio escolhidas, os equipamentos utilizados neste estudo, bem como os ensaios realizados.

No quarto capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados e finalmente no quinto capítulo as conclusões retiradas deste estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2.Estado da arte

2.1. Soldadura por ultra-sons

O som pode ser dividido consoante a sua frequência. Entre 0 e 20 Hz corresponde à gama dos infra-sons, entre os 20 Hz e 20 kHz corresponde à gama dos sons audíveis (frequência de sons que o nosso ouvido é capaz de captar), entre 20 kHz e 1 GHz corresponde à gama dos ultra-sons e daí para a frente temos os híper-sons [1].

Já há vários anos que a aplicação da energia dos ultra-sons em processos de junção de materiais existe. Em 1930's era usado para refinamento de grão dos metais fundidos utilizados na brasagem, optimização da resistência das soldaduras e em simultâneo com a soldadura por arco eléctrico em 1940's. Apenas em 1950's começaram a ser usados os ultra-sons para a junção de plásticos. A soldadura de metais por ultra-sons foi pela primeira vez demonstrada também em 1950's. Foi descoberto que as vibrações ultra-sónicas eram capazes de criar uma ligação entre partes metálicas sem a necessidade de fundir os materiais base [2].

O processo de soldadura de metais por ultra-sons é um processo onde as duas partes a soldar são fixas uma contra a outra, sob pressão, onde as vibrações ultra-sónicas aplicadas criam um movimento relativo entre as superfícies que estão em contacto. As superfícies são plasticamente deformadas, sendo eliminada a rugosidade presente nas superfícies. Também os óxidos e contaminantes presentes na interface são eliminados durante este processo,

promovendo assim a sua junção. O processo ocorre no estado sólido, não havendo fusão de nenhum dos metais [1,7].

A soldadura por ultra-sons é um processo que tem uma extensa aplicabilidade em várias áreas como na electrónica, indústria automóvel, aeroespacial, equipamentos para a medicina, entre outros. Apesar de ser possível utilizar este processo em praticamente todos os metais, é sobretudo utilizado em ligas de cobre, alumínio, magnésio e ligas mais macias como o ouro e a prata. Algumas combinações de metais dissimilares já são soldadas recorrendo a ultra-sons (e.g. cobre e níquel) [3].

A soldadura por ultra-sons é utilizada para soldar placas, fitas ou chapas de metal (superfícies planas) assim como para a junção de vários cabos multifilares quando convergem todos num ponto de uma cablagem automóvel, por exemplo. É crescente a aplicação deste processo também em componentes estruturais nas indústrias automóvel e aeronáutica [3].

O principal foco deste trabalho foi a soldadura por ultra-sons de metais dissimilares, mais especificamente a soldadura de cabos multifilares de cobre com cabos multifilares de alumínio utilizados em cablagens automóveis. *Splice* é a designação dada à zona onde ocorre a junção dos dois cabos, após a soldadura. Os cabos ficam sobrepostos e com uma configuração paralelepédica, como podemos observar na figura 2.1.

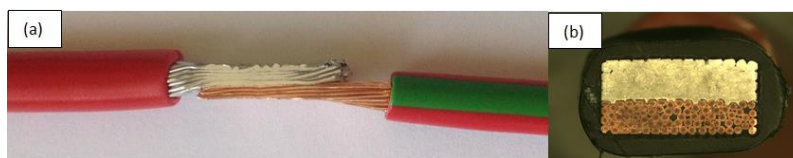


Figura 2.1-*Splice* de 26 mm² de secção: (a) vista lateral sem manga retráctil de isolamento; (b) vista de um corte do *splice* com manga retráctil de isolamento.

2.1.1. Princípios físicos

Apesar das primeiras demonstrações da soldadura de metais por ultra-sons terem ocorrido nos anos 1950's, foi no final dos anos 1940's que, durante uma investigação na Aeroprojects Company of West Chester na Pensilvânia, Estados Unidos da América, se verificou este fenómeno pela primeira vez. Ao serem aplicadas vibrações ultra-sónicas ao equipamento tradicional de soldadura por pontos, com o objectivo de diminuir a resistência superficial do alumínio na zona a soldar, verificou-se que os ultra-sons sozinhos conseguiam criar uma ligação entre as peças [2].

Os primeiros equipamentos usavam uma vibração longitudinal às peças a soldar, igual ao que se usa actualmente para soldar plásticos. Estudos mais avançados mostraram que os componentes do sonótrodo que vibravam transversalmente às peças a soldar eram, na realidade, as responsáveis pela pequena adesão que as peças demonstravam após serem sujeitas à vibração [2].

O processo de soldadura de metais através de ultra-sons pode ser dividido em três fases.

A junção das duas superfícies a soldar corresponde à primeira fase do processo de soldadura. Nesta fase é aplicada longitudinalmente uma pressão que junta as duas superfícies. Com as peças sob essa pressão, é então aplicada transversalmente à interface da ligação vibração ultra-sónica. A combinação da pressão a que as peças estão sujeitas com a vibração ultra-sónica elimina a rugosidade das superfícies a soldar. Ao eliminar esta rugosidade a área de contacto entre as superfícies está sempre a aumentar até chegar a um ponto em que começa a existir uma ligação física entre as superfícies. Essa ligação física acontece devido às forças de van der Waals. As forças de van der Waals (nome dado em homenagem ao cientista holandês Johannes Diderik van der Waals) são o resultado da soma de todas as forças atractivas e repulsivas, que não estejam relacionadas com ligações covalentes entre moléculas ou forças devido à interacção electrostática entre iões [4-7].

Isto é válido quando estamos a soldar dois metais iguais ou com características semelhantes. Caso um dos metais tenha uma dureza muito mais baixa que o outro esse metal vai sofrer uma deformação mais severa, o que conduzirá a problemas no processo e dificuldade em juntar os dois [4-7].

Impurezas, como por exemplo óxidos do metal ou partículas presentes na interface, são eliminadas pelas forças provocadas pelas vibrações [4-7].

A deformação plástica nas superfícies é bastante severa, levando a um aumento da temperatura nessas áreas que, contudo, não é suficiente para levar o metal até ao seu ponto de fusão [4-7].

Na segunda fase deste processo, devido ao cada vez maior número de átomos que entram em contacto uns com os outros nas superfícies a soldar, formam-se ligações metálicas. Os átomos das superfícies encontram-se a uma distância de apenas 4 a 5 Å, o que conduz a trocas de electrões e a ligações químicas entre eles. As deformações plásticas das superfícies a soldar levam a deformações elásticas dos grãos, que estão na origem do início da terceira fase deste processo. A combinação de metais a soldar influencia bastante a duração desta segunda fase. Quando os metais são muito semelhantes a primeira fase é imediatamente sucedida pela terceira fase, não existindo esta segunda fase. Quando os metais são semelhantes ambas as

superfícies se deformam em simultâneo, pois ambos têm uma dureza parecida. Caso os metais tenham uma dureza muito diferente é mais difícil a deformação da superfície do metal mais duro. Para que isso ocorra é necessário que o calor gerado pela fricção consiga ser suficiente para que aumente a ductilidade do metal mais duro e, eventualmente, provoque uma mudança de fase no mesmo que aumente a sua deformabilidade [4-7].

A terceira fase (que ocorre imediatamente a seguir às ligações metálicas se formarem na zona soldada) consiste na interação que existe entre os metais na interface. A deformação plástica afecta os grãos dos metais presentes nesta interface. Adjacente a esta zona plasticamente deformada existe uma zona elasticamente deformada onde se acumulam tensões residuais. Passado algum tempo, estas tensões residuais começam a desaparecer devido às temperaturas que se registam na zona de soldadura. A razão deste relaxamento é a mudança de posição de alguns átomos na estrutura cristalina dos grãos que estão sob tensão, potenciado pelas temperaturas geradas (difusão atómica). Todos os fenómenos enumerados ocorrem simultaneamente (a deformação plástica devido às vibrações ultra-sónicas aplicadas em conjunto com a pressão, que provoca o aumento de temperatura derivado da fricção entre as peças, calor esse que irá promover o relaxamento das sub-camadas que foram elasticamente deformadas e estão sob tensões residuais). A difusão atómica tem uma influência muito baixa na formação da ligação, no entanto é muito importante para a sua resistência [4-7].

2.1.2. Vantagens e desvantagens

De uma forma sucinta são as seguintes as vantagens e desvantagens da soldadura por ultra-sons:

2.1.2.1. Vantagens

- **Processo de soldadura no estado sólido** - na interface (zona de contacto entre as peças onde ocorre a ligação) existe uma deformação plástica, resultando numa distorção local da estrutura de grão, mas com ausência de fusão do material. Isto faz com que a alteração da estrutura cristalina seja muito pequena na interface e nula fora dessa zona, que por si só já é uma zona muito pequena (no máximo, na ordem dos micrómetros) [3].
- **Excelente para soldar materiais condutores térmicos** – por princípio, praticamente todos os materiais, e muitas combinações de diferentes materiais

(soldadura de materiais dissimilares) podem ser soldados através da energia dos ultra-sons. Contudo, e devido às características do próprio processo, os metais mais macios, como é o caso do alumínio ou o cobre, são os materiais preferenciais para a aplicação deste processo. Estes metais têm uma condutividade térmica elevada o que os torna muito difíceis de soldar através dos processos mais tradicionais, como por exemplo soldadura por pontos ou por arco eléctrico, onde a entrega térmica é elevada. A vantagem de utilizar este processo está naturalmente relacionada com o facto da soldadura de metais por ultra-sons ser um processo de soldadura no estado sólido e não estar relacionada com elevadas temperaturas [3].

- **Óxidos e contaminantes** – devido à elevada fricção existente entre as superfícies a soldar, provocada pela combinação da pressão estática e vibração com frequência ultra-sónica, os óxidos e outros contaminantes presentes nesta interface são desintegrados e dispersados, sendo desta forma eliminados. Por exemplo, alguns resíduos de óleos que possam estar presentes nas superfícies são rapidamente vaporizados e os óxidos são dispersados para a periferia da soldadura ou até envolvidos pelo pequeno volume de material plasticamente deformado. Apesar do processo de soldadura por ultra-sons ser tolerante a superfícies contaminadas, o nível de contaminação tolerado é limitado. Algumas variações começam a ser detectadas quando estamos na presença de superfícies contaminadas, desde um aumento no tempo de soldadura até, no limite, uma grande degradação na qualidade da soldadura, como por exemplo uma grande diminuição na resistência mecânica da junção (como será demonstrado mais à frente neste trabalho) [3].
- **Seguro e ecológico** – uma vez que, na grande maioria dos casos, não é necessário a adição de metais ou de gases no processo, não existe a emissão desses mesmos gases que podem ser nocivos tanto para o operador como para o ambiente. Só em casos muito raros, em que seja necessário soldar dois materiais dissimilares difíceis de juntar é necessário adicionar uma fina camada de um terceiro material na interface. A adição de um gás inerte ao processo poderá ser necessário caso estejamos perante um ambiente perigoso (e.g. fechar explosivos em recipientes metálicos) de forma a reduzir os riscos de explosão [3].

- **Baixo consumo energético** – este é um processo que em termos energéticos é bastante comedido, tornando-se por isso mesmo um processo económico, e por isso de grande interesse para a indústria em geral. Quando comparado com soldadura por pontos o consumo energético é de cerca de um sexto e quando comparado com soldadura por arco eléctrico é de cerca de um décimo, para soldaduras equivalentes [3].

2.1.2.2. Desvantagens

- **Limitado a juntas sobrepostas** – esta configuração é a única que permite aplicar vibração transversal na interface, de forma a provocar fricção entre as superfícies (vibração ultra-sónica que vai ser a responsável pela junção das peças). Esta vibração também é limitada pela quantidade de massa que consegue movimentar, o que obriga o componente da máquina que aplica as vibrações na peça (sonótrodo) a estar próximo da interface [3].
- **Limitado pela espessura e dureza do material** – como já foi referido no ponto anterior, a espessura das peças é crítica pois as vibrações têm um máximo de espessura de material que conseguem mover, que está também relacionado com a sua dureza. Por exemplo para alumínios das séries 5000 ou 6000, uma junta com cerca de 2 mm de espessura está próxima do limite de soldabilidade (para sistemas que funcionam com 20 kHz de frequência), enquanto que para o titânio (metal com uma dureza muito superior à do alumínio) o limite de soldabilidade já se encontra numa espessura de junta de cerca de 0.1 mm [3].
- **Deformação na superfície da peça** - após a soldadura, as superfícies exteriores onde o sonótrodo (peça móvel responsável por transmitir as vibrações ultra sónicas à peça) e a bigorna (peça que aplica a pressão estática que junta as duas superfícies) encostam, apresentam marcas que variam com a energia aplicada naquela soldadura, com a pressão aplicada pela bigorna e com as diferentes geometrias, tanto do sonótrodo como da bigorna. Normalmente as marcas presentes do lado onde a bigorna encosta à peça são as menos severas [3].

- **Ruído** – por ser um processo que utiliza “ultra-sons” seria de esperar que fosse um processo silencioso, uma vez que se encontra fora da gama dos sons audíveis. Existem dois motivos que fazem desta presunção falsa. Primeiro é o facto de a frequência da vibração de 20 kHz, ou superior, induzir outras peças numa vibração de frequência menor, e já numa gama audível. O segundo motivo é o facto de alguns sistemas funcionarem com frequências abaixo das ultra-sónicas e já dentro da gama das frequências audíveis (15-16 kHz), mais comuns em sistemas de maior energia. Por estes motivos os operadores têm sempre de utilizar protecções para os ouvidos para evitar lesões [3].

2.2. Parâmetros do processo de soldadura

Em qualquer processo de soldadura, a qualidade das ligações está relacionada com as condições em que são feitas, com a aplicabilidade do processo aos materiais que se pretende unir e, sobretudo, com os parâmetros definidos para cada processo. No caso da soldadura por ultra-sons existem vários parâmetros, que se enumeram a seguir:

- Frequência de vibração
- Amplitude de vibração
- Força estática
- Energia
- Potência
- Tempo de soldadura
- *Tooling*

Dos parâmetros acima enunciados, alguns apresentam uma dependência entre si, logo a definição de certos parâmetros por parte do operador fixa os valores de outros indirectamente. Existem vários sistemas de soldadura por ultra-sons e em cada um deles os parâmetros variáveis são diferentes. Na máquina utilizada neste estudo os parâmetros variáveis (controláveis pelo operador) eram a energia, a pressão, a amplitude, a largura do *splice* e a geometria do *tooling*.

- **Frequência de vibração** – os diferentes sistemas estão preparados para funcionar em níveis de frequência distintos consoante as aplicações. Pode variar entre 15 kHz e 300 kHz. A maioria dos sistemas de soldadura de metais por

ultra-sons opera na gama dos 20, 30 ou 40 kHz com as frequências maiores, como 60 ou 120 kHz a serem utilizadas em micro ligações, por exemplo, na electrónica. O sistema utilizado neste estudo funcionava com uma frequência de 20 kHz [3,8].

- **Amplitude de vibração** – a amplitude de vibração é um parâmetro que está intimamente ligado à energia entregue à zona de soldadura, sendo mesmo em alguns sistemas de soldadura uma variável dependente da energia. As amplitudes de vibrações ultra-sónicas são muito pequenas, na ordem de 10 a 50 μm , muito raramente excedendo os 100 μm (como referência de grandeza o diâmetro de um cabelo humano varia entre 75 e 100 μm) [3,8].
- **Força estática** – é a força que é aplicada nas duas peças a soldar e que as mantem em contacto sob pressão. Esta força é aplicada entre a bigorna e o sonótrodo. Quando a vibração é aplicada às peças, a combinação da mesma com a força que junta as superfícies dá origem a elevadas forças de fricção responsáveis pela ligação na zona de soldadura, como já foi referido antes. No equipamento utilizado este parâmetro é expresso em unidades de pressão (bar) pois a bigorna (que aplica a força) é actuada por um cilindro pneumático, e a pressão é controlado pela pressão do ar introduzida no interior do cilindro [3,8].
- **Energia, potência e tempo de soldadura** – apesar de serem listados como três parâmetros diferentes, é mais lógico analisá-los no mesmo ponto uma vez que estão relacionados entre si. Quando uma soldadura é realizada, a diferença de potencial e a corrente eléctrica resultam num fluxo de potência eléctrica para o conversor que varia no tempo durante o período da soldadura. A curva potência/tempo pode assumir várias formas consoante as características dos materiais, dimensões e acabamentos superficiais do material, outros parâmetros do processo (como por exemplo a amplitude ou a força estática) e as características do próprio sistema de soldadura utilizado [3,8].

Na figura 2.2 (a) estão representadas várias curvas possíveis que podem ocorrer durante um processo de soldadura, mas para simplificar a análise deste tipo de curvas pode-se utilizar um caso simples e ilustrativo, como o da figura 2.2 (b), que ilustra as relações existentes entre potência, energia e tempo de soldadura que também se aplicam às curvas mais complexas.

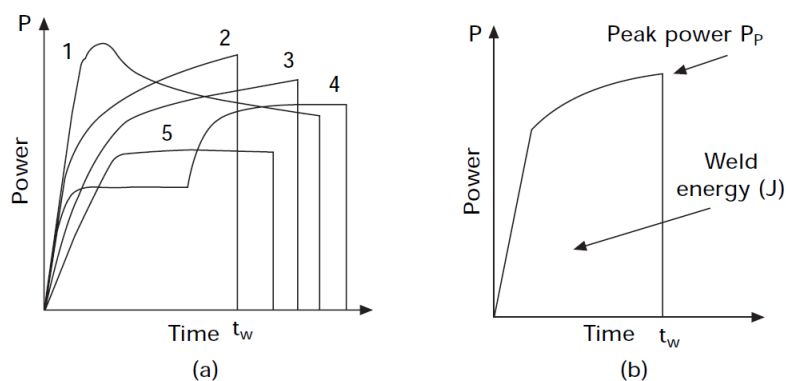


Figura 2.2-Potência de soldadura: (a) exemplos de curvas de potência eléctrica de soldadura; (b) curva de potência representativa [3]

Na curva da figura 2.2 (b) pode-se observar a sua potência máxima (P_p) e o tempo de soldadura (t_w). A área abaixo da curva corresponde à energia eléctrica que chega ao conversor durante um ciclo de soldadura.

É impossível um sistema ter todos estes três parâmetros independentes. Nalguns sistemas a potência máxima é a variável independente, e após definir um valor para este parâmetro a máquina irá trabalhar até atingir esse valor. Assim a energia e o tempo de soldadura neste caso são variáveis dependentes. Outro exemplo (correspondente ao tipo de sistema utilizado neste estudo) é a definição da energia (variável independente neste caso) e a soldadura ocorrerá até se atingir o nível de energia definido.

A energia eléctrica que é entregue ao conversor é transformada em vibração durante a soldadura. Contudo, entre a entrega da energia eléctrica ao conversor e a transmissão das vibrações às peças através do sonótrodo, acontecem várias transformações e transmissões. A energia que realmente chega às peças está dependente de vários factores: (a) a eficiência de conversão da energia eléctrica em vibração, através dos materiais piezoeléctricos presentes no conversor; (b) perdas durante a transmissão da vibração nas interfaces conversor-amplificador-sonótrodo; (c) energia dissipada durante a entrega

energética à zona de soldadura. Conhecendo aproximadamente as perdas referidas acima consegue-se estimar com elevado grau de precisão a energia entregue durante um processo de soldadura.

Também o tempo de soldadura pode ser uma variável dependente ou independente, consoante o sistema utilizado. No sistema utilizado neste estudo o tempo de soldadura era uma variável dependente. Independentemente, o tempo de soldadura assume sempre valores muito baixos, bem inferiores a 1 segundo (normalmente de 0.2 a 0.5 segundos). Tempos de soldadura mais elevados normalmente são sinal de desadequação dos outros parâmetros de soldadura ou contaminação do material [3,8].

- **Tooling** – o *tooling* é constituído pela bigorna e pelo sonótrodo. As peças a soldar são colocadas entre a bigorna e o sonótrodo sob uma força estática que obriga as superfícies onde ocorrerá a ligação a ficarem juntas, como se pode observar a seguir na figura 2.3.

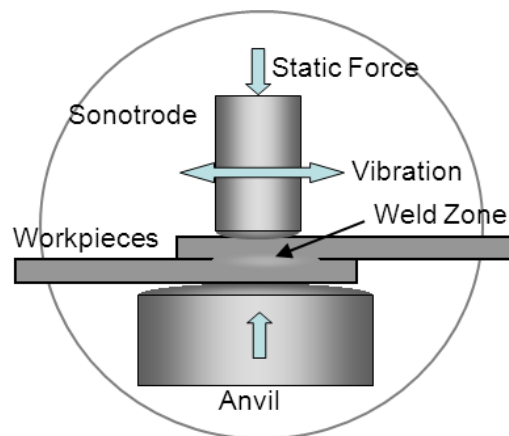


Figura 2.3-Sistema de soldadura por ultra-sons

Na maioria dos casos as pontas do sonótrodo e da bigorna são peças de fácil e rápida substituição, de forma a poderem ser trocadas quando apresentam sinais de elevado desgaste e porque, consoante o material que queremos soldar existem diferentes geometrias e texturas de sonótrodo e bigorna que se adaptam

melhor às características dos mesmos. Desta forma podemos utilizar o mesmo equipamento para soldar vários materiais diferentes [3].

2.3. Soldadura de materiais dissimilares

Conhecendo os fundamentos físicos da soldadura por ultra-sons e as características dos materiais, a questão “que materiais é possível soldar através da energia dos ultra-sons?” surge naturalmente. Ao longo dos anos foram feitos vários estudos com vários materiais e combinações de materiais diferentes. Na tabela 2.1 podemos observar, de forma resumida e simplificada, vários metais e combinações dos mesmos possíveis de soldar através da energia dos ultra-sons. Os metais soldáveis através da energia dos ultra-sons estão listados no topo da tabela, e vão do Alumínio até ao Zircónio. Os mesmos materiais, ou ligas dos mesmos, estão listados na diagonal da tabela. A maioria dos metais é soldável consigo mesmo, ou com uma liga própria. Existem apenas dois metais que não têm esta característica, que são o Germânio e o Silício. O alumínio demonstrou ser extremamente soldável, sendo compatível com todos os metais presentes neste estudo. As ligas de cobre, assim como os metais preciosos (ouro, prata e platina) também demonstraram um comportamento excelente quando submetidos a este processo de soldadura. Por outro lado, o Ferro e as suas ligas incluindo os Aços, e metais refractários como o Molibdénio e o Tungsténio, apesar de soldáveis, apenas é possível utilizar a soldadura por ultra-sons para ligações em que a espessura da zona de soldadura seja pequena. Concluiu-se então que a soldabilidade de um material através da energia dos ultra-sons está intimamente ligado à facilidade com que o material é deformado plasticamente, logo a dureza e a ductilidade de um material são determinantes para a sua soldabilidade através da energia dos ultra-sons [3].

Tabela 2.1-Soldabilidade dos materiais através de ultra-sons [3]

	Al	Be	Cu	Ge	Au	Fe	Mg	Mo	Ni	Pd	Pt	Si	Ag	Ta	Sn	Ti	W	Zr
Al Alloys	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Be Alloys	●	●			●											●		
Cu Alloys	●		●	●	●	●	●	●	●	●			●	●		●	●	●
Ge		●									●							
Au	●	●						●	●	●	●	●				●	●	●
Fe Alloys	●							●	●	●	●		●	●		●	●	●
Mg Alloys							●						●			●		
Mo Alloys								●	●		●			●		●	●	●
Ni Alloys									●	●	●			●		●	●	
Pd									●				●	●				
Pt Alloys										●	●			●		●	●	
Si												●	●					
Ag Alloys													●	●				●
Ta Alloys														●		●	●	
Sn															●			
Ti Alloys																●	●	
W Alloys																	●	
Zr Alloys																		●

Apesar do foco aqui ser na soldabilidade dos metais, de referir que a soldadura por ultra-sons tem sido também utilizada na junção de materiais não metálicos, por exemplo ligações entre metais e cerâmicos [3].

A soldadura dos cabos de cobre com os de alumínio é feita em duas fases, em que a primeira consiste numa compactação e soldadura apenas do cabo de cobre, de forma a unir os seus multifilares e assim formar uma base sólida, e na seguinte é então soldado o cabo de alumínio ao cabo de cobre compactado. Na gíria industrial estas fases são frequentemente designadas por K1 e K2, respectivamente. É necessária esta divisão do processo em duas fases devido à grande diferença de densidades do cobre e do alumínio, que leva a comportamentos muito diferentes dos materiais durante a soldadura. Fazendo esta divisão consegue-se adaptar melhor os parâmetros para as características de cada material.

2.3.1. Características do alumínio

As ligas de alumínio têm como principais características a sua baixa densidade, elevada resistência à corrosão, boa condutividade eléctrica, facilidade de fabricação (a sua manipulação é fácil) e boa aparência [9].

Começaram a ganhar relevância na segunda metade da década de 70 devido à poupança de peso que proporcionam na indústria automóvel. Esta poupança de peso traduz-se em automóveis mais económicos, ecológicos e com uma dinâmica mais apurada. Hoje em dia já

existem carroçarias de automóveis ou mesmo motores de automóveis integralmente construídos com alumínio [9].

O sistema de designação de liga para as ligas de alumínio forjado está resumido na tabela 2.2.

Tabela 2.2-Sistema de designação de liga para as ligas de alumínio [9]

Numerais	Principais elementos de liga
1XXX	Nenhum ($\geq 99,00\%$ Al)
2XXX	Cu
3XXX	Mn
4XXX	Si
5XXX	Mg
6XXX	Mg e Si
7XXX	Zn
8XXX	Outros elementos

Os alumínios das séries 2XXX e 7XXX, são utilizados na indústria aeronáutica, devido à elevada resistência mecânica, aliada a uma baixa densidade e à facilidade de conformação e maquinação. Actualmente, os principais desenvolvimentos têm sido sobre as ligas da série 8XXX, envolvendo Li (Lítio) como principal elemento de liga. Esta liga Al-Li oferece uma densidade especialmente baixa e uma superior rigidez (quando comparada com as outras ligas de alumínio) [9].

As cablagens de alumínio utilizadas neste estudo são de alumínio da série 1XXX que se caracteriza por ter uma elevada condutividade térmica e eléctrica e baixa dureza e resistência mecânica [9].

2.3.2. Características do cobre

O cobre tem uma excelente condutividade eléctrica (é o principal material de instalações eléctricas) e térmica (muito utilizado em permutadores de calor), bem como elevada ductilidade e uma excelente resistência à corrosão, mesmo em alguns ambientes marinhos, que são especialmente rigorosos [9].

As principais famílias de ligas de cobre são apresentadas na tabela 2.3 de acordo com os seus principais elementos de liga. Os Latões, em que o Zinco é o principal elemento de liga, são as ligas de cobre mais comuns. Os latões são utilizados, por exemplo, na produção de

invólucros de cartuchos, instrumentos musicais e radiadores de automóveis. Os bronzes são ligas de cobre que envolvem elementos como o estanho, alumínio, silício e níquel. Estas ligas oferecem uma resistência mecânica maior, aliada à resistência à corrosão associada aos latões [9].

Tabela 2.3-Classificação do cobre e das ligas de cobre [9]

Família	Elemento de liga principal	Solubilidade sólida (% at) ^a	Números SNU ^b
Cobre, ligas de alto cobre	^c		C10000
Latões	Zn	37	C20000, C30000, C40000, C66400–C69800
Bronze fosforados	Sn	9	C50000
Bronze com alumínio	Al	19	C60600–C64200
Bronze com silício	Si	8	C64700–C66100
Níquel–cobre, níquel–prata	Ni	100	C70000

^a A 20 °C (68 °F).
^b Ligas forjadas.
^c Vários elementos com menos de 8% at de solubilidade sólida a 20 °C (68 °F).

Os cabos de cobre utilizados neste estudo eram constituídos por ligas de alto cobre (cobre com elevado grau de pureza). A elevada condutividade eléctrica é a característica mais importante para esta aplicação (cablagens automóvel).

2.4. Defeitos de soldadura

Os defeitos observados na soldadura por ultra-sons ocorrem devido a parâmetros de soldadura inadequados ou más condições do material base ou da máquina de soldadura e podem ser dos seguintes tipos na indústria de cablagens:

- Cobre azulado ou alumínio “espelhado” são causados por uma entrega energética excessiva ao *splice*.



Figura 2.4-Cabo de cobre espelhado devido a entrega energética excessiva

- Presença de *loops* é normalmente associado a uma amplitude excessiva, mas pode também ser originada pela combinação de uma entrega energética excessiva com baixa pressão.

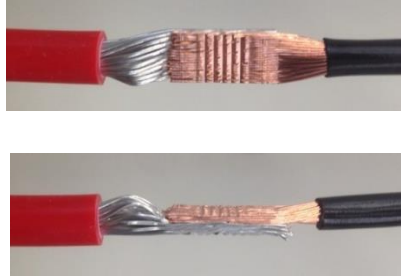


Figura 2.5-Presença de loops no cabo de alumínio causados por amplitude excessiva durante a soldadura

- O excesso de pressão leva ao esmagamento do *splice* que pode ser observado na zona de transição do *splice* com o resto do cabo onde se consegue identificar um vinco pronunciado, em casos limite levando mesmo à quebra de alguns multifilares do cabo. Também é possível observar no *splice*, na ponta dos cabos que não é compactada pelo sonótrodo, o levantamento exagerado dessas pontas criando uma superfície irregular e abrasiva, inapropriada para a posterior aplicação de, por exemplo, uma manga retráctil de isolamento.



Figura 2.6-Esmagamento dos cabos devido a excesso de pressão e/ou energia

2.5. Aplicações

A soldadura de metais através de ultra-sons é um processo que já é utilizado em várias indústrias actualmente, principalmente quando envolve ligações eléctricas, como por exemplo as indústrias automóvel, aeronáutica e electrónica [3].

A utilização deste processo em ligações microscópicas na indústria electrónica continua a ser a utilização com maior expressão [3].

Produtores de baterias e células de combustível também recorrem a este processo de soldadura para realizar várias ligações que envolvam espessuras pequenas de chapa,

normalmente de cobre, níquel ou alumínio. É um processo muito interessante pois não envolve altas temperaturas nem, conseqüentemente, fusão dos materiais base, então é muito utilizado quando é necessário selar recipientes que contenham alguma substância inflamável [3].

Na indústria das cablagens é um processo com grande expressão nas soldaduras monometal (na grande maioria nas ligações de multifilares de cobre).

A tendência no futuro será a aplicação da soldadura de metais por ultra-sons à parte estrutural nas indústrias automível e aeronáutica. Outra tendência é a soldadura de materiais dissimilares de forma a conseguir produzir uma peça com diferentes características ao longo da mesma, consoante o material que a constitui [3].

3.Procedimento experimental

3.1. Materiais

Neste estudo foram utilizados cabos de cobre com diâmetros de secção de fio de: 6, 10, 25 e 35 mm² constituídos por multifilares com revestimento/isolamento em PVC de acordo com os requisitos da norma DIN EN13602.

Tabela 3.1-Características dos cabos de cobre utilizados [11]

Secção de fio [mm ²]	Nº de filamentos	Diâmetro MAX do filamento [mm]	MAX resistência @ 20° [mΩ/m]	Diâmetro do condutor [mm]	Espessura do isolamento [mm]		Diâmetro do cabo [mm]	
					MIN	NOM	MIN	MAX
6	84	0,31	3,1	3,4	0,64	0,8	4,4	5
10	80	0,41	1,82	4,5	0,8	1	5,9	6,5
25	196	0,41	0,743	7,8	1,04	1,3	9,7	10,4
35	276	0,41	0,527	9	1	1,3	11,1	11,6

Nos cabos de alumínio, os filamentos são da série AA1000 e cumprem os requisitos da norma VW 60306-2. Destes cabos foram também utilizadas 4 secções de fio: 10, 16, 35 e 50 mm² (a secção de fio corresponde à soma das áreas de todos os filamentos do cabo, ou seja, é a área efectiva de metal).

Tabela 3.2- Características dos cabos de alumínio utilizados [10]

Secção de fio [mm ²]	Nº de filamentos	Diâmetro MAX do filamento [mm]	MAX resistência @ 20° [mΩ/m]	Diâmetro MAX do condutor [mm]	Espessura do isolamento [mm]		Diâmetro do cabo [mm]	
					MIN	NOM	MIN	MAX
10	50±1	0,52	3,03	4,5	0,48	0,6	5,4	5,8
16	78*	0,52	1,93	5,5	0,52	0,65	6,5	7
35	172*	0,52	0,878	8,3	0,64	0,8	9,8	10,4
50	247*	0,52	0,613	9,8	0,72	0,9	11,5	12,2

* Um desvio no número de filamentos (± 5 %) é aceitável se a resistência eléctrica e o diâmetro máximo dos filamentos for respeitado.

3.2. Relação de secções transversais cobre/alumínio

O cobre é um material com uma resistência à tracção muito maior que o alumínio e com uma condutividade eléctrica também superior, como se pode observar na tabela 3.3. Para ser possível substituir as cablagens de cobre por cablagens de alumínio nas diferentes aplicações é necessário garantir a equivalência no desempenho das mesmas para um correcto funcionamento do equipamento.

Tabela 3.3- Características do alumínio e cobre constituintes das cablagens [10-11]

	Condutividade eléctrica [Sm/mm ²]	Tensão máxima de tracção [MPa]
Alumínio	35,5	70 - 120
Cobre	61,7	220

Tendo em conta que o alumínio tem menor condutividade eléctrica e menor resistência à tracção, essa diferença tem de ser compensada na junção dos cabos com uma diferença entre as secções dos fios de cobre e alumínio. Logicamente o fio de alumínio é o de maior secção, como é demonstrado a seguir, igualando a condutância dos dois cabos equivalentes (o comprimento dos cabos é o mesmo):

$$G = \frac{\sigma * A}{l}$$

G – Condutância dos cabos

σ – Condutividade do material

A – Área de secção do fio

l – Comprimento do fio

$$\frac{\sigma_{cobre} * A_{fio\ de\ cobre}}{l} = \frac{\sigma_{alumínio} * A_{fio\ de\ alumínio}}{l} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \sigma_{cobre} * A_{fio\ de\ cobre} = \sigma_{alumínio} * A_{fio\ de\ alumínio} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{A_{fio\ de\ cobre}}{A_{fio\ de\ alumínio}} = \frac{\sigma_{alumínio}}{\sigma_{cobre}}$$

Considerando a condutividade eléctrica, o cobre tem um desempenho 74 % superior ao alumínio, como se pode verificar dividindo a condutividade do cobre pela condutividade do alumínio.

$$\frac{61.7}{35.5} * 100 \approx 174 \%$$

Agora, observando a tensão máxima de ruptura dos materiais, e de forma a poder seguir a lógica anterior, considerando o menor valor da tensão máxima de tracção para o alumínio (70 MPa), pois assim garantimos de certeza que a resistência do alumínio é igual ou superior ao cobre, e nunca inferior. Dividindo a tensão máxima de tracção do cobre pelo menor valor da tensão máxima do alumínio verificamos que o cobre é 214 % mais resistente (mais de três vezes a resistência do alumínio).

$$\frac{220}{70} * 100 \approx 314 \%$$

Desta forma, se se tiver um fio de alumínio que compense totalmente a menor tensão máxima de tracção com uma secção maior, temos também a certeza que a menor condutividade eléctrica é excedida.

As cablagens nunca são projectadas para funcionarem sob qualquer tensão mecânica, ou seja, os fios apenas têm que ter resistência mecânica suficiente para resistirem às forças a que são sujeitos aquando da sua instalação. Após correctamente instalados têm a função de passar corrente eléctrica correctamente sem sobreaquecerem.

Para cabos de calibres menores, as forças a que são submetidos na sua instalação podem ser preocupantes, pois podem não aguentar e partir. Como neste caso se tratam de cabos de elevado calibre isso não é preocupante, uma vez que o cabo mais frágil utilizado neste estudo, por exemplo, foi o de 10 mm² de secção de alumínio e, mais uma vez, considerando o pior caso possível que é a tensão máxima de tracção do fio ser apenas 70 MPa, isso quer dizer que o fio aguenta uma força de 700 N. Pode-se concluir que a partir de uma certa secção o aumento de resistência mecânica que daí advém não traz benefício.

Ou seja, a característica que é tida em conta é a diferença de condutividades entre os dois materiais, e não a diferença de resistência mecânica (no caso dos cabos de elevado calibre).

As secções de fio utilizadas nas soldaduras dissimilares vêm confirmar esta abordagem teórica, pois a secção do fio de alumínio nunca é suficientemente superior à secção do fio de cobre de forma a compensar a maior resistência mecânica do mesmo. Já em termos de condutividade eléctrica os valores aproximam-se substancialmente, como podemos observar nos cálculos seguintes.

As combinações de cabos estudados neste trabalho foram:

- 6 mm² Cu x 10 mm² Al

$$\frac{10}{6} * 100 \approx 167 \%$$

- 10 mm² Cu x 16 mm² Al

$$\frac{16}{10} * 100 \approx 160 \%$$

- 25 mm² Cu x 35 mm² Al

$$\frac{35}{25} * 100 = 140 \%$$

- 35 mm² Cu x 50 mm² Al

$$\frac{50}{35} * 100 \approx 143 \%$$

O facto de os valores observados anteriormente (relação entre as secções dos fios estudados) não alcançarem o valor teórico de 174 % verificado quando comparadas as condutividades eléctricas dos dois materiais, deve-se ao facto de existirem calibres fixos de fio juntamente com um sobredimensionamento do cobre.

Não sendo possível produzir um fio de alumínio com uma secção personalizada e optimizada (que cumpra a tal relação de 174 % com a secção do fio de cobre) para cada fio de cobre, tem de se recorrer aos calibres de fio existentes e chegar a um compromisso que cumpra com os requisitos da aplicação.

Em todas as combinações de fio se verifica uma relação abaixo da relação óptima, o que indica que a secção do fio de alumínio é menor que a ideal. Consequentemente, e uma vez que o

alumínio não consegue conduzir a totalidade da corrente que o cobre conduz podemos concluir que para estas ligações funcionarem sem sobreaquecer o cobre se encontra sobredimensionado.

3.3. Equipamentos utilizados

3.3.1. Máquina de soldadura

As soldaduras por ultra-sons foram efectuadas num equipamento de soldadura por ultra-sons, a Máquina A, que se pode ver na figura 3.1.



Figura 3.1-Máquina de soldadura por ultra-sons utilizada no estudo

Esta é uma máquina de teste não disponível ainda no mercado. Assim, o estudo realizado foi interessante para o seu desenvolvimento uma vez que este trabalho foi feito em colaboração com o fabricante. Todos os aspectos identificados como possíveis de melhorar foram indicados ao fornecedor para que fossem analisados e eventualmente incorporados na próxima geração de equipamentos.

Este protótipo é indicado para soldadura de cabos multifilares de metais não ferrosos. O sistema completo compreende o sistema gerador de ultra sons, bem como a bigorna e a garra deslizante.

A tabela 3.4 apresenta algumas características da máquina.

Tabela 3.4-Dados da máquina de soldadura (dados do fornecedor)

Dados da máquina	
 Protecção por fusível	3 x 400 V / 32 A
Frequência de funcionamento	20 kHz
Output	Gerador = 9000 W
Aplicação	Soldadura de cabos
Secção do <i>splice</i>	20 mm ² - 200 mm ²

Apesar das especificações da máquina indicarem que a menor secção de *splice* permitida era 20 mm², realizaram-se *splices* de 16 mm² de secção.

Os componentes enumerados de seguida estão presentes em todas as máquinas de soldadura de metais por ultra-sons, podendo variar em dimensão ou geometria, mas com as mesmas funções:

3.3.1.1. Gerador de ultra-sons

Este é o principal componente, responsável por gerar ultra-sons com frequências superiores a 20 kHz e transmitir a energia à zona dos cabos a soldar, sob a forma de vibração.

É constituído por 3 componentes ligados entre si por pinos roscados, que são:

- O conversor (1), responsável por converter a corrente eléctrica que alimenta a máquina em vibração mecânica através de cristais piezoeléctricos.
- O amplificador (2), adjacente ao conversor, que tem como função a transmissão e amplificação da vibração que recebe do conversor e transmite ao sonótrodo.
- O sonótrodo (3) que está em contacto com os cabos e entrega a energia na forma de vibração mecânica à zona a soldar. A aplicação de pressão em simultâneo com a entrega da vibração dá origem aos *splices*. Existem duas geometrias diferentes de sonótrodos, consoante os materiais e as aplicações visados.

Na figura 3.2 observa-se a disposição dos três componentes.

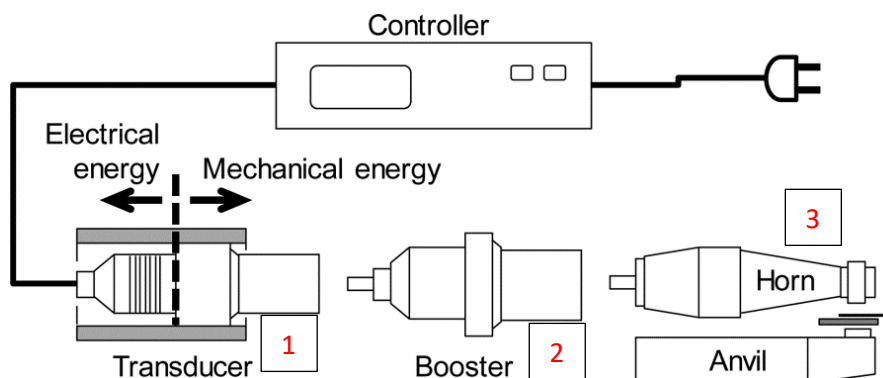


Figura 3.2-Gerador de ultra-sons: (1) conversor; (2) amplificador; (3) sonótrodo [14]

3.3.1.2. Garra deslizante

A garra deslizante (4) tem a função de definir a largura do *splice*. Este assume o valor da distância entre a garra deslizante (4) e a placa de superfície com encaixe (5) que se encontra fixa.

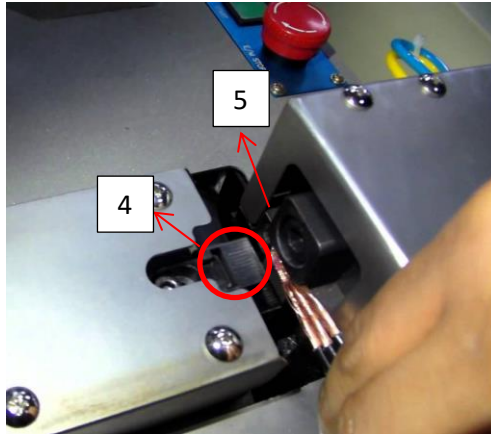


Figura 3.3-Componentes da zona de soldadura: (4) garra deslizante; (5) placa de superfície com encaixe [15]

3.3.1.3. Bigorna

A bigorna aplica a pressão nos cabos durante a soldadura (6). Esta desliza sobre a placa de superfície com encaixe (5) e de seguida desce sobre os cabos aplicando a pressão pré-definida pelo operador.

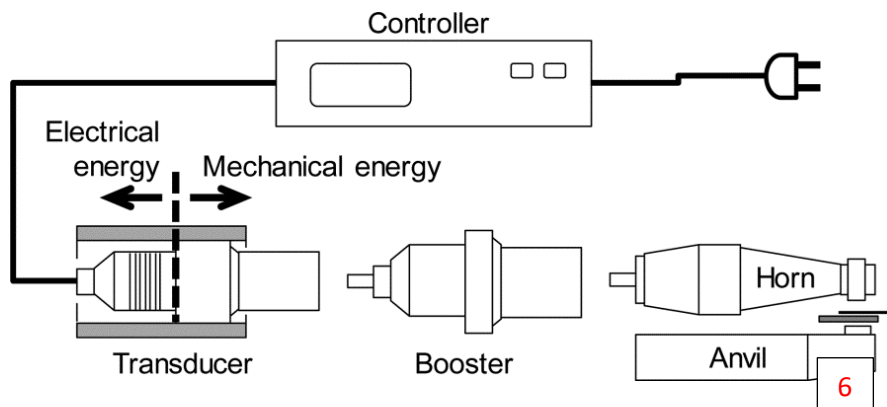


Figura 3.4-Componentes da zona de soldadura: (6) bigorna [14]

3.3.2. Máquinas de tracção uniaxial

Na realização destes ensaios foram utilizadas duas máquinas de tracção uniaxial distintas, devido às diferentes forças necessárias para a tracção das soldaduras: uma máquina (Máquina B) com uma célula de carga de 2 kN (figura 3.5) e a Máquina C com uma célula de carga de 10 kN (figura 3.6).

A primeira foi utilizada nos ensaios de tracção uniaxial para as secções de *splice* de 16 e 26 mm² e a segunda nas secções maiores.



Figura 3.5-Máquina de tracção uniaxial para as secções de 16 e 26 mm² (Máquina B).



Figura 3.6-Máquina de tracção uniaxial para as secções de 60 e 85 mm² (Máquina C).

3.4. Monitorização

Caso os parâmetros de soldadura estejam bem definidos as variações das características dos *splices*, na maioria das ocorrências, são muito pequenas e são imperceptíveis à própria máquina. É então necessário saber qual a sensibilidade da máquina à detecção dos erros.

Foi então realizado o teste de monitorização na Máquina A para a falta de filamentos.

Para a realização deste estudo foi utilizada a distribuição normal de valores para analisar os resultados obtidos e definir qual a sensibilidade da máquina à ausência de filamentos.

O primeiro passo foi produzir uma amostra de 10 *splices* a partir de cabos em perfeitas condições (com todos os filamentos), de forma a recolher os dados da máquina referentes à sua altura de compactação e altura de soldadura. Estes dados foram organizados segundo uma distribuição normal.

De seguida, de forma a investigar se a ausência de material era detectada através de menores alturas de compactação e/ou soldadura, foi retirado o equivalente a 5 % da área de secção do *splice* removendo apenas filamentos do cabo com secção de fio mais pequena (na soldadura de cabos de metais dissimilares Cu/Al corresponde sempre ao cabo de cobre). Foram produzidos 10 *splices* nestas condições e retirados os registos da máquina referentes à altura de compactação e soldadura dos mesmos. Novamente, organizando os dados segundo uma distribuição normal e agora colocando esta distribuição lado-a-lado com a anterior Podemos verificar se se sobrepõem (nesse caso quer dizer que o erro é indetectável para a máquina) ou, caso contrário, se aparecem separadas (a máquina consegue detectar a maioria dos casos).

Aumentou-se progressivamente a percentagem de material retirado à secção do *splice* até que se conseguissem separar as distribuições normais.

Este processo foi replicado para todas as secções.

3.5. Optimização

3.5.1. Sistema de posicionamento

Um aspecto crucial na soldadura de cabos multifilares é o seu alinhamento. Para isso desenvolveu-se um sistema de posicionamento que consiste em colocar os fios contra dois batentes fixos empurrando-os através de dois cilindros pneumáticos activados por pedal.

O facto de os batentes serem fixos significa que para qualquer diâmetro de fio e largura de *splice* que sejam utilizados a sua posição nunca se altera, o que conduz a desalinhamentos naturais entre os dois cabos e até em relação ao centro do *splice*.

Se os batentes forem móveis e se ajustarem em função dos diâmetros dos cabos e da largura do *splice*, podemos fazer coincidir os três eixos (os dois eixos dos cabos e o eixo de simetria do *splice*) que, desta forma, alinham perfeitamente os três elementos.

De forma a saber exactamente quanto é que os batentes terão de se mover para que os cabos e o *splice* fiquem alinhados (D), para qualquer combinação de diâmetros de cabos e larguras de *splices*, desenvolveu-se a seguinte expressão.

$$D = \frac{\textit{largura do splice} - \textit{diâmetro do cabo}}{2} + \textit{distância entre o batente e o splice}$$

Este aspecto do posicionamento não era contemplado na máquina utilizada, que não tinha qualquer mecanismo que permitisse o ajuste preciso dos batentes de forma a alinhar os cabos para uma soldadura correcta, pelo que foi necessário desenvolver um sistema simples que permitisse ter resultados reprodutíveis.

Os batentes foram montados numa estrutura metálica aparafusada à parte exterior da máquina. De forma a ajustar os batentes foram utilizadas anilhas calibradas aplicadas nos parafusos, num sistema muito simples mas eficaz.

3.5.2. Parâmetros de soldadura

O processo de optimização de parâmetros para as ligações em estudo foi semelhante, sofrendo algumas modificações consoante as características de cada secção e os resultados obtidos ao longo do processo. O objectivo era maximizar os valores da tensão de corte da ligação.

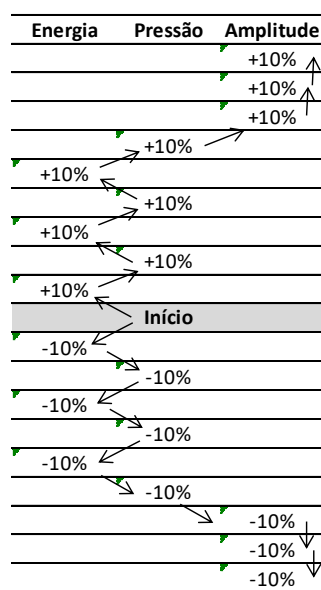
Os parâmetros operatórios iniciais foram sempre os pré-definidos na máquina, à excepção dos parâmetros para a secção de 16 mm² que não existiam.

Como já referido anteriormente, o processo de soldadura de cabos de metais dissimilares (cobre e alumínio neste caso) é realizado em duas fases, K1 e K2. Uma vez que o comportamento do cobre na soldadura por ultra-sons é muito estável e está bem estudado, a primeira fase K1 deste processo não é crítica e a definição de parâmetros para a mesma é imediata. K2 é a fase crítica deste processo, pois o alumínio tem um comportamento mais instável, e dado o pouco conhecimento existente sobre o alumínio neste tipo de processo, a optimização de parâmetros é o grande desafio.

Assim, na máquina utilizada é possível controlar os seguintes parâmetros: energia, pressão, amplitude e largura do *splice*. A largura do *splice* está limitada devido às proporções geométricas que tem de respeitar (a largura tem de ser aproximadamente o dobro da altura).

Na tabela seguinte apresenta-se um esquema de optimização de parâmetros proposta pela Daimler AG e utilizada pela Delphi para soldaduras de cabos de cobre. Como primeira abordagem decidiu-se utilizar o mesmo método, sendo feitas as adaptações necessárias, conforme os resultados obtidos ao longo da optimização.

Tabela 3.5-Tabela de optimização de parâmetros utilizada



Após cada soldadura era feita uma inspeção visual, e baseado nos resultados desta a optimização era feita sentido ascendente ou descendente.

A inspeção visual permite identificar erros proibitivos nos *splices*, que se enumeram a seguir: aspecto da ligação, dimensões do *splice*, sinais de oxidação do material e sinais de filamentos partidos.

Para optimizar os parâmetros de soldadura recorreu-se ao Desenho de Experiências utilizando para isso um *software* disponível na Delphi, Minitab.

Introduziram-se os valores de cada parâmetro (energia, pressão, largura do *splice* e amplitude) de cada um dos *splices* visualmente bons de modo a que o *software* permitisse fazer as combinações necessárias dos quatro parâmetros. Foram então produzidos os *splices* com as combinações de parâmetros definidos através do Minitab. De seguida, todos os *splices* foram traccionados e os respectivos valores da força foram registados.

Finalmente, introduzindo os valores máximos da força obtidos para cada *splice* e simulando uma experiência factorial conseguiu-se obter a combinação óptima de parâmetros para cada secção.

3.5.2.1. 6 mm² Cu x 10 mm² Al

Não existindo parâmetros pré-definidos para esta secção, obtiveram-se valores aproximados por regressão linear dos parâmetros pré-definidos para secções maiores, para o mesmo material e para uma largura de *splice* de 6 mm que correspondia à menor largura permitida pela máquina para esta secção.

Os parâmetros iniciais para a optimização foram:

Tabela 3.6-Parâmetros de soldadura iniciais para a secção de 16 mm²

Etapa	Energia [W.s]	Pressão [bar]	Amplitude [%]	Largura [mm]
K1	199	1,62	80	6
K2	230	1,65	90	6

3.5.2.2. 10 mm² Cu x 16 mm² Al

Para esta secção já existiam parâmetros pré-definidos na máquina. Os parâmetros pré-definidos para K1 revelaram-se muito satisfatórios e foram mantidos. Os parâmetros iniciais foram os seguintes:

Tabela 3.7-Parâmetros de soldadura pré-definidos para a secção de 26 mm²

Etapa	Energia [W.s]	Pressão [bar]	Amplitude [%]	Largura [mm]
K1	200	1,5	80	6
K2	900	1,8	100	6

3.5.2.3. 25 mm² Cu x 35 mm² Al

Tal como aconteceu anteriormente com a secção de 26 mm², para esta secção já existiam parâmetros pré-definidos na máquina. Os parâmetros iniciais foram:

Tabela 3.8-Parâmetros de soldadura pré-definidos para a secção de 60 mm²

Etapa	Energia [W.s]	Pressão [bar]	Amplitude [%]	Largura [mm]
K1	575	2	100	12
K2	2000	2,7	100	12

3.5.2.4. 35 mm² Cu x 50 mm² Al

Para o *splice* de maior secção que será estudado neste trabalho, o ponto de partida da optimização foi também ele dado pela máquina. Os parâmetros pré-definidos para K1 e K2 foram:

Tabela 3.9-Parâmetros de soldadura pré-definidos para a secção de 85 mm²

Etapa	Energia [W.s]	Pressão [bar]	Amplitude [%]	Largura [mm]
K1	500	1,5	100	16,5
K2	3500	3	100	16,5

3.6. Validações

Para as validações dos parâmetros, após alcançados os parâmetros óptimos, foram produzidas 125 soldaduras para cada combinação de secções. Essas 125 amostras de cada secção de *splice* foram traccionados e os valores das forças máximas de cada um registadas.

Com os valores das forças registados foram calculados os índices de capacidade e desempenho do processo (Cpk e Ppk, respectivamente), que são uma forma simples de avaliar o processo. O valor mínimo de 1.67 para estes valores foi fixado, pois é um valor a partir do qual o processo é considerado bom e estável o suficiente para ser aplicado industrialmente. Quanto maior forem os valores destes índices melhor [13].

Uma vez que o estudo foi feito em ambiente laboratorial com cuidados que não se verificam a nível fabril numa linha de produção, o valor mínimo exigido a estes índices foi de 2. Ao assumir este valor mínimo de 2 estamos a garantir uma margem de segurança.

A capacidade de um processo é definida como uma razão entre a distância da média dos valores registados ao limite especificado mais próximo e uma medida da variação do processo

(desvio padrão). O cálculo do desempenho do processo é semelhante, apenas variando na forma como o desvio padrão é calculado [13].

3.7. Ensaios realizados

3.7.1. Ensaios de tracção uniaxial

Uma vez que a aplicação da soldadura de metais dissimilares por ultra-sons tem como objectivo a eliminação dos actuais terminais entre os cabos de cobre e alumínio, o objectivo é alcançar valores semelhantes ou melhores que os terminais no teste de tracção uniaxial.

Seguindo a especificação, os ensaios de tracção uniaxial às soldaduras foram feitos a uma velocidade de 100 mm/min. Os excertos de cabo de cobre e alumínio soldados, e posteriormente traccionados tinham todos 300 mm de comprimento e 20 mm de estripado.

3.7.2. Degradação do isolamento

Os cabos podem ser divididos em três grandes grupos, consoante o seu isolamento. Esses três grupos correspondem a cabos com isolamentos de PVC, XLPE e PPE. Estes três tipos de isolamento correspondem a cerca de 96 % do total de cabos existente, sendo que 76 % são cabos com isolamento em PVC. Todos os cabos utilizados neste estudo tinham isolamento de PVC.

É sabido que o isolamento de PVC degrada-se com o tempo e temperatura, contaminando os filamentos de cobre, diminuindo a soldabilidade dos mesmos. Os isolamentos de XPLE e PPE não apresentam qualquer sinal de degradação nem contaminação dos filamentos que isolam. De referir que os cabos com os três tipos de isolamento foram sujeitos às mesmas condições de teste.

Para determinar o efeito da contaminação dos fios devido ao seu isolamento, durante o processo de soldadura, foi feito um teste ao longo de 4 semanas. Foram utilizados cabos com fio de 6 mm² de secção de cobre e fio de 10 mm² de secção de alumínio. Foi calculada a quantidade necessária de cada cabo e foram cortados em bobinas e colocados numa estufa a 70 °C.

O objectivo era de semana a semana retirar as bobinas dos cabos de cobre e alumínio da estufa para cortar amostras com cerca de 300 mm de comprimento cada (comprimento

normalizado para os ensaios de soldadura por ultra-sons) e com essas amostras produzir 30 *splices* com as seguintes configurações:

1. 10 *splices* com cabos de cobre da estufa e cabos de alumínio bom
2. 10 *splices* com cabos de cobre e cabos de alumínio da estufa
3. 10 *splices* com cabos de cobre bom e cabos de alumínio da estufa

A numeração dada facilita a identificação do tipo de *splice* a que se refere mais à frente, nos resultados deste estudo.

O processo foi repetido todas as semanas, até completar as 4 semanas de teste.

4. Resultados

4.1. Monitorização

Mesmo com parâmetros fixos, bem definidos e condições bastante semelhantes, dois *splices* produzidos consecutivamente podem sair bastante diferentes, isto é, é impossível garantir, numa produção, a homogeneidade dos *splices*, pois existem sempre pequenos factores que introduzem variações difíceis de controlar, como a precisão da máquina (desde a entrega energética, à pressão aplicada), a composição dos cabos que pode variar e originar *splices* com características díspares, falta de filamentos no cabo, entre outros.

A falta de filamentos é um dos aspectos mais importantes por razões óbvias e analisou-se a % máxima de filamentos em falta que conduzia a um sinal de erro na máquina de soldadura.

Para a menor secção (16 mm²) verificou-se que a máquina não detecta filamentos em falta para a ausência de 5 e 6 % de área da secção transversal do *splice*, apresentando as distribuições normais de valores dos *splices* bons e dos *splices* com falta de filamentos com grande sobreposição para a altura de compactação (*pre-height*) ou para a altura de soldadura (*final height*) como podemos observar a seguir nas figuras 4.1 e 4.2.

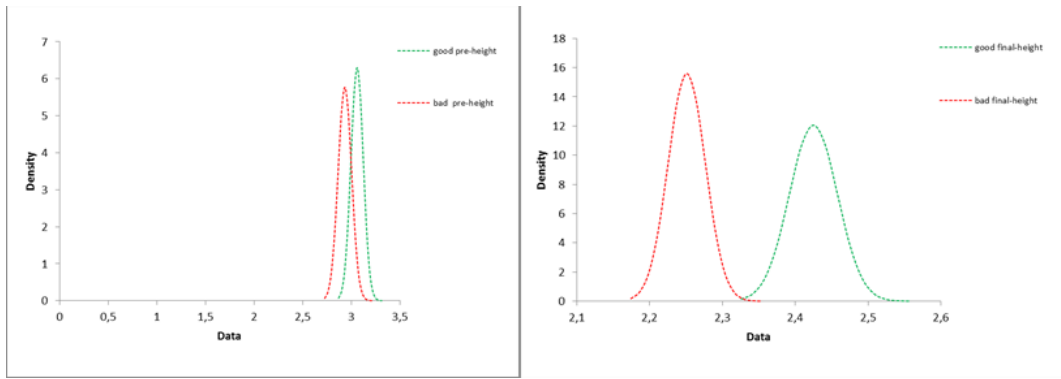


Figura 4.1-Ausência de 5 % de material nos *splices* de 16 mm² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.

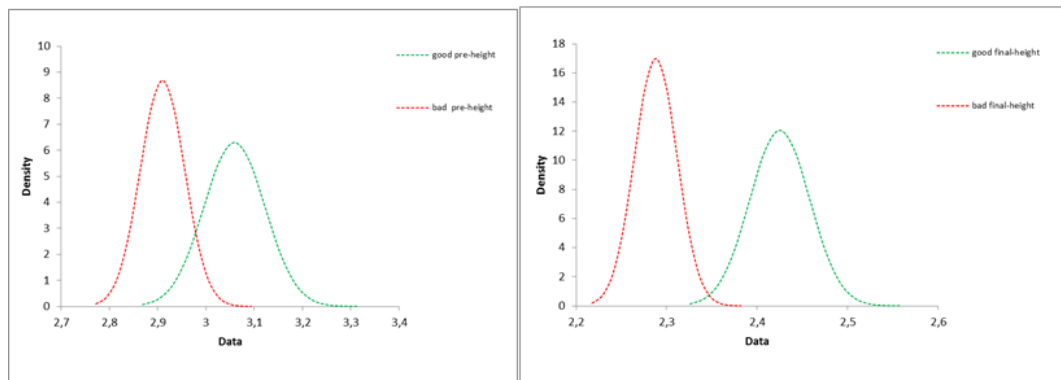


Figura 4.2-Ausência de 6 % de material nos *splices* de 16 mm² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.

Apesar de ainda apresentar uma pequena sobreposição das distribuições normais na altura final, na ausência de 7 % da área da secção transversal do *splice*, essa sobreposição corresponde a uma parte muito pequena das amostras. Podemos, então, fixar nos 7 % o valor a partir do qual a máquina consegue detectar ausência de material com segurança.

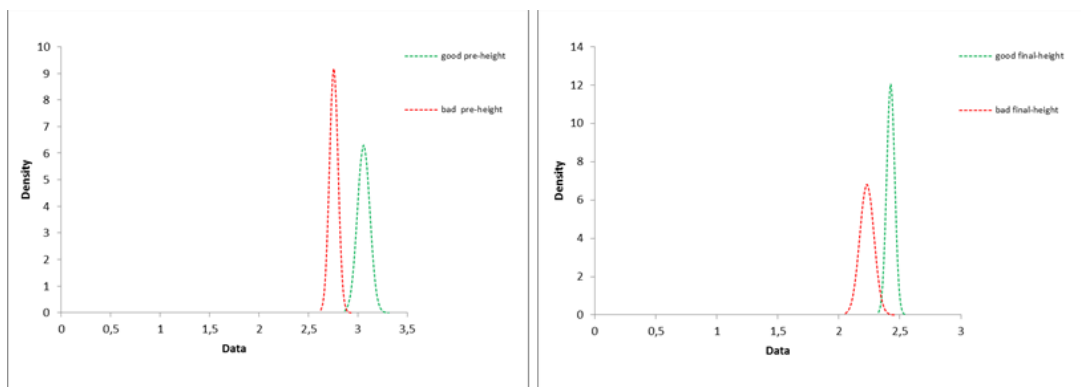


Figura 4.3-Ausência de 7 % de material nos *splices* de 16 mm² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.

Para a secção seguinte (26 mm²) a máquina também é insensível a uma ausência de 5 % da área da secção transversal do *splice*, como se pode observar nos gráficos da figura 4.4.

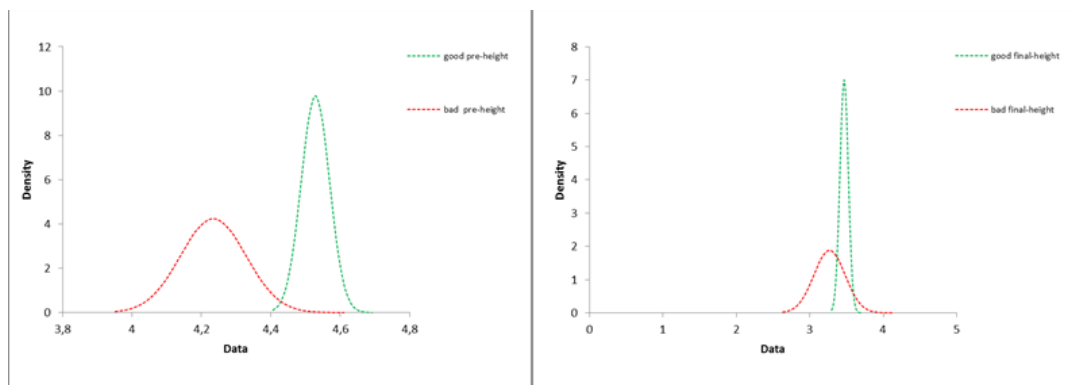


Figura 4.4-Ausência de 5 % de material nos *splices* de 26 mm² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.

Já para uma falta de 6 % de área da secção transversal do *splice*, consegue-se detectar o erro com segurança.

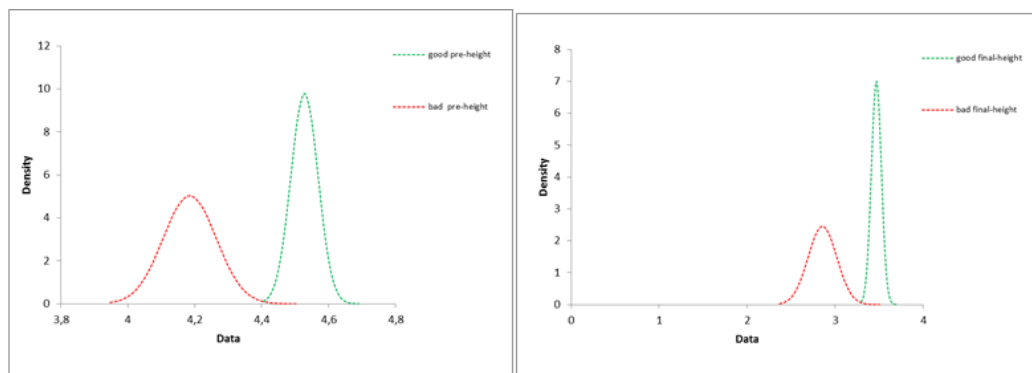


Figura 4.5-Ausência de 6 % de material nos *splices* de 26 mm² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.

Para a secção de 60 mm² o resultado é semelhante ao obtido para a secção de 26 mm². A máquina apenas identificou o erro para uma ausência de 6 % de área da secção transversal do *splice*.

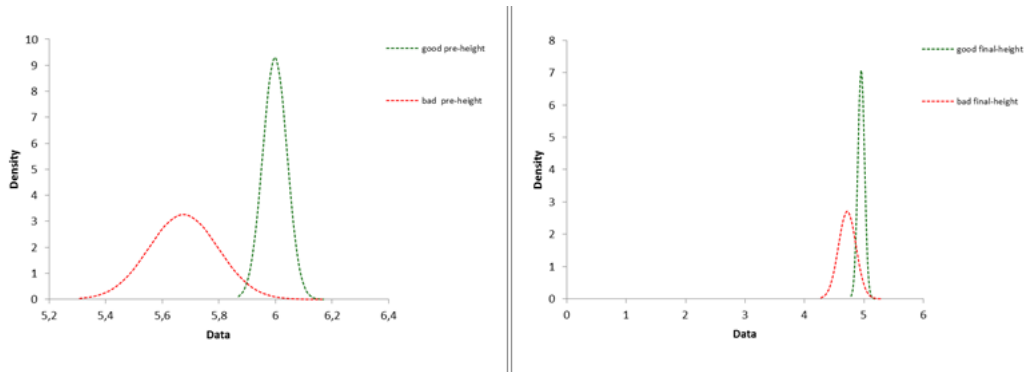


Figura 4.6-Ausência de 5 % de material nos *splices* de 60 mm² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.

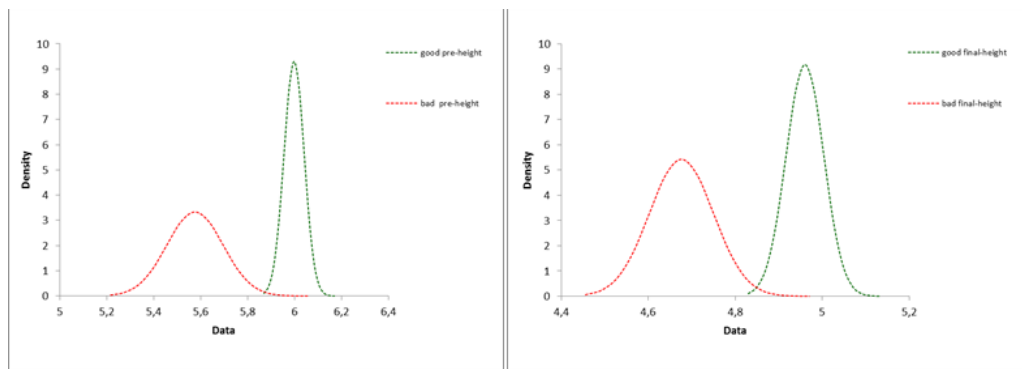


Figura 4.7-Ausência de 6 % de material nos *splices* de 60 mm² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.

A máquina identificou o erro para uma ausência de 5 % de área da secção transversal do *splice* na secção de 85 mm², como podemos observar nos gráficos seguintes.

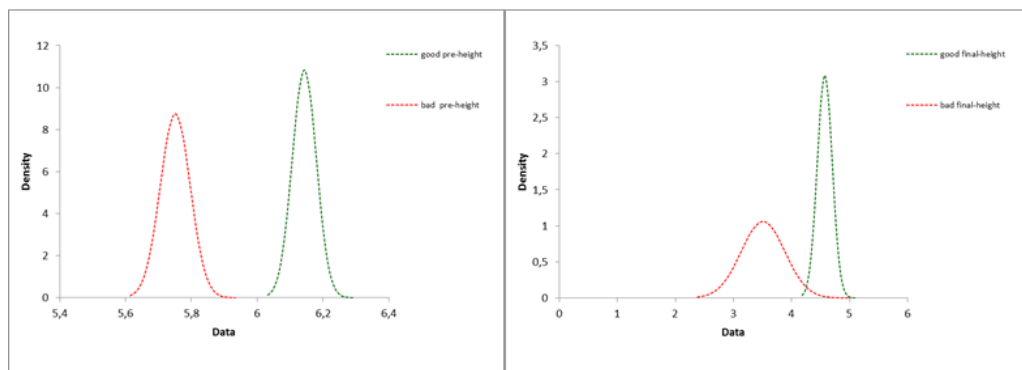


Figura 4.8-Ausência de 5 % de material nos *splices* de 85 mm² com defeito. Alturas de compactação no gráfico à esquerda e alturas finais no gráfico à direita.

Na tabela 4.1, que se apresenta a seguir, podemos observar a detectabilidade da falta de multifilares da Máquina A para as diferentes secções estudadas.

Tabela 4.1-Detectabilidade de falta de filamentos da máquina utilizada

Secção fio de cobre [mm ²]	Secção fio de alumínio [mm ²]	Secção total do <i>splice</i> [mm ²]	% de material em falta	Filamentos em falta no fio de cobre
6	10	16	7	16
10	16	26	6	17
25	35	60	6	27
35	50	85	5	34

4.2. Sistema de posicionamento

As melhorias obtidas após o alinhamento dos cabos no processo de soldadura não se limitaram a melhorias em termos visuais, mas também se traduziram numa melhoria dos valores de força máxima obtidos nos ensaios de tracção uniaxial para secções maiores.

Em relação ao aspecto visual do *splice*, podemos verificar através da figura 4.9 a considerável melhoria. Os filamentos dos cabos ficam alinhados (1), levando inclusive ao desaparecimento da inclinação observada nas pontas dos filamentos (2).

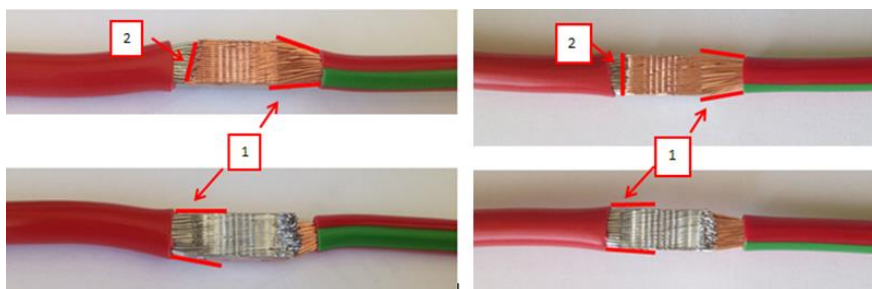


Figura 4.9-Lado esquerdo exemplo de soldadura com cabos desalinhados; lado direito exemplo de soldadura com cabos alinhados

Relativamente à força de tracção uniaxial, nas secções mais baixas de *splice* (16 mm² e 26 mm²) as diferenças nos valores foram insignificantes, se bem que o desvio padrão dos valores foi sempre superior nos fios desalinhados.

A partir da secção de 60 mm², a diferença entre os valores da força nos ensaios de tracção uniaxial dos cabos alinhados e dos cabos desalinhados já é significativa (diferença de cerca de 10 %). O desvio padrão continua a ser superior nos fios desalinhados.

Foram produzidos 30 *splices* de cada secção sem qualquer tipo de ajustamento dos batentes de forma a poder chegar a valores que depois foram comparados com os valores dos *splices* produzidos com ajustamento dos batentes.

De seguida pode-se observar na tabela 4.2 a diferença dos valores médios da força máxima registada nos ensaios de tracção uniaxial para os cabos alinhados e desalinhados, assim como a diferença dos respectivos desvios padrão (para o *splice* de secção 60 mm²).

Tabela 4.2-Valores de força de tracção e desvio padrão para soldaduras semelhantes com e sem alinhamento dos cabos

	Cabos alinhados	Cabos desalinhados
Média [N]	2262	2080
Desvio padrão	185,87	189,36

4.3. Optimização de parâmetros de soldadura

Os resultados das análises factoriais realizadas no Minitab vêm na forma de gráficos tal como referido no capítulo 3. Por facilidade de análise apresentam-se e discutem-se os resultados para cada uma das combinações de secções estudadas nas soldaduras dissimilares.

4.3.1.1. 6 mm² Cu x 10 mm² Al

Este *splice* apresentava um aspecto visual mau, uma vez que apresentava *loops* muito pronunciados.

Como referido antes, o processo de optimização não seguiu o seu normal desenvolvimento, devido às características do *splice*. Em vez de aumentar a energia em 10 % como primeiro passo, o primeiro parâmetro a ser ajustado foi a amplitude, devido à formação de *loops*.

O gráfico seguinte mostra os paços dados na optimização dos parâmetros para esta secção:

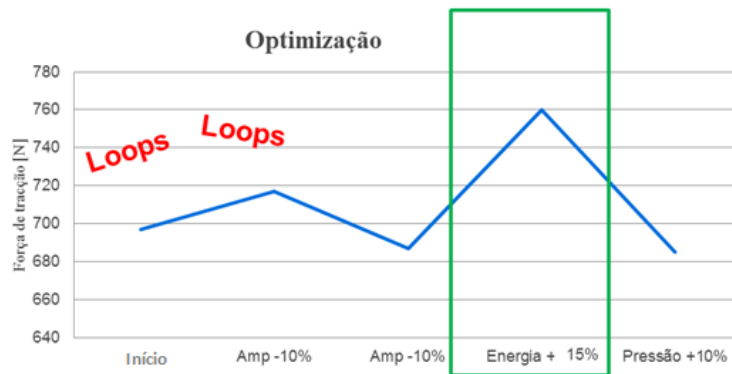


Figura 4.10-Optimização dos parâmetros iniciais

Analisando o gráfico também se pode observar que, quando se aumentou a energia, em vez de 10 % aumentou-se 15 %. Isto deve-se ao facto de os valores de energia para esta secção serem tão baixos que uma variação de 10 % não produziria uma alteração suficiente no *splice*.

Quando se aumentou a pressão, verificaram-se alguns filamentos partidos e isso conduziu a um valor da força de tração cerca de 10 % menor do que a anterior. Fixou-se então o valor da pressão em 1.65 bar enquanto o valor da largura do *splice* já estava fixo em 6 mm devido à limitação da máquina.

Os parâmetros óptimos para K2 eram uma combinação entre estes valores:

- Energia: 230 ou 270 W.s
- Pressão: 1.65 bar
- Amplitude: 70 ou 80 %
- Largura do *splice*: 6 mm

Após análise factorial, o resultado são os parâmetros que maximizam a força de tração suportada pela soldadura.

Observando o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados podemos observar que ambos os parâmetros são importantes, uma vez que ultrapassam a linha de referência no gráfico. De entre os dois parâmetros, a energia é o mais influente.

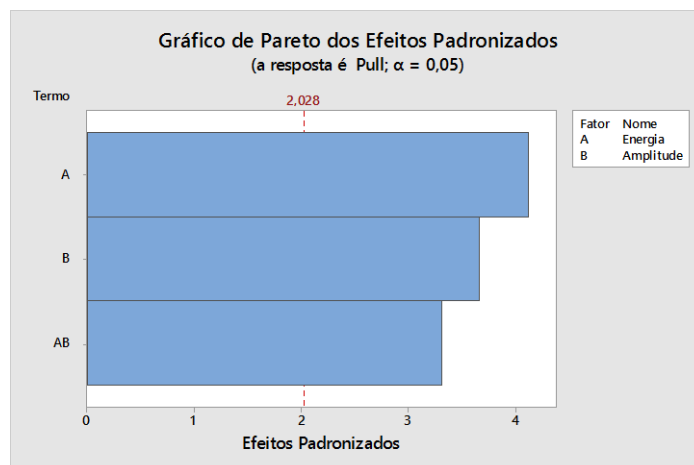


Figura 4.11-Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados

No gráfico seguinte pode-se observar a influência que a variação dos parâmetros tem no valor da força máxima de tracção que as soldaduras suportam. Quanto maior a energia e a amplitude, dentro dos valores estudados, maior a força de tracção da soldadura (a zona verde escura corresponde a valores da força de tracção mais altos e a zona azul escura aos mais baixos). De notar que existe uma escala no gráfico indicativa das forças que a soldadura aguenta dependendo dos parâmetros utilizados.

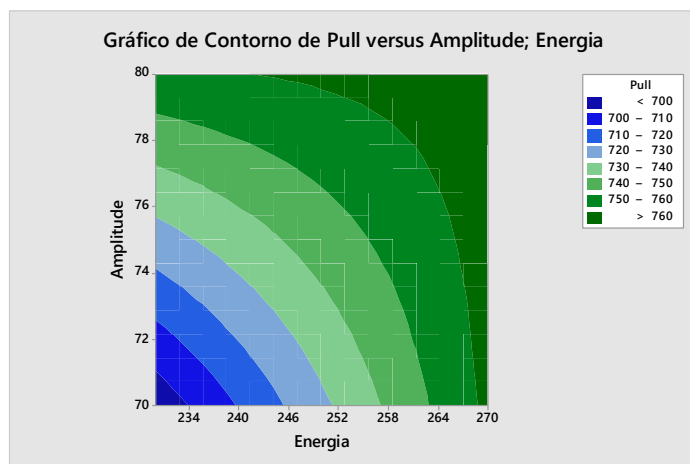


Figura 4.12-- Gráfico de contorno da força de ruptura consoante a amplitude e energia utilizadas durante a soldadura

É fácil concluir que os parâmetros óptimos são 270 W.s de energia e 80 % de amplitude, pois é com estes que se atinge a força máxima de tracção.

Para confirmar estes resultados, recorrendo ao optimizador do Minitab, obteve-se o seguinte resultado:

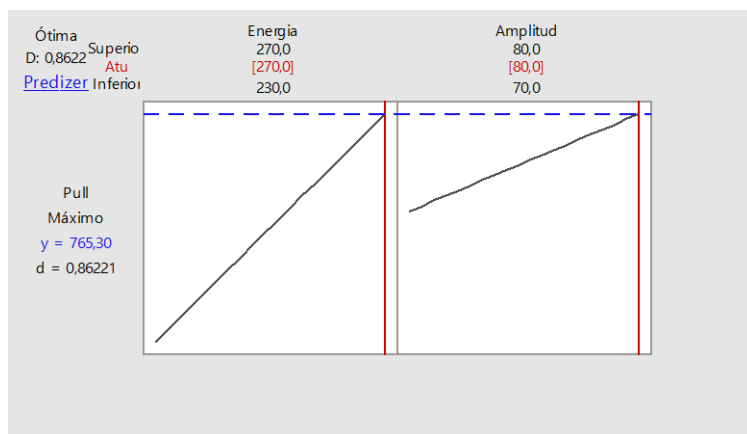


Figura 4.13-Optimizador de parâmetros

Então os parâmetros ótimos para o *splice* de secção 16 mm² em K2 são:

Tabela 4.3-Parâmetros otimizados para K2

Etapa	Energia [W.s]	Pressão [bar]	Amplitude [%]	Largura [mm]
K2	270	1,65	80	6

4.3.1.2. 10 mm² Cu x 16 mm² Al

Como ponto de partida os parâmetros de K2 também se revelaram bastante satisfatórios apresentando um bom aspecto visual. Foi então o primeiro *splice* a ser traccionado sendo de seguida guardado o valor da força máxima suportada pelo mesmo, assim como os seus parâmetros de produção.

Agora, foi seguido o esquema da figura 4.14 para a optimização, mais uma vez com as adaptações necessárias.

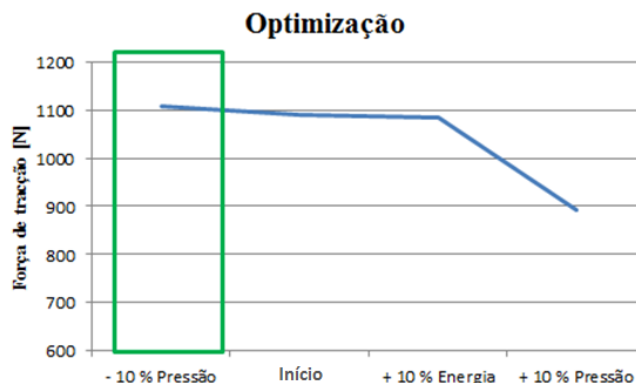


Figura 4.14-Optimização dos parâmetros pré-definidos

Na subida de 10 % no valor da pressão, apesar de não se verificar uma degradação visual muito severa o valor da força máxima de tracção que o *splice* aguentou foi bem abaixo, e por isso esse *splice* foi rejeitado. Também é de notar que, seguindo o esquema da tabela 3.5, dever-se-ia ter reduzido primeiro a energia e só depois a pressão. Mas, uma vez que o *splice* não apresentava sinais de energia a mais, o mais correcto foi reduzir a pressão.

Para além da alteração dos valores de energia e pressão foi também alterado o valor da largura do *splice* para 7 mm. Visualmente deu origem a um *splice* bom e respeita a proporção aproximada aconselhada de 2:1 (largura:altura). Naturalmente que, ao alterar a largura do *splice* para 7 mm alterará este parâmetro não apenas em K2, mas também em K1, uma vez que, apesar de serem dois passos distintos, trata-se de apenas um *splice*, logo, apenas uma largura. Neste caso a amplitude foi o único parâmetro a manter-se inalterado.

Então os parâmetros óptimos eram uma combinação dos seguintes valores:

- Energia: 900 ou 990 W.s
- Pressão: 1.6 ou 1.8 bar
- Amplitude: 100 %
- Largura do *splice*: 6 ou 7 mm

Após análise factorial, o resultado são os parâmetros que maximizam a força de tracção suportada pela soldadura.

Observando o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados podemos observar que o parâmetro mais influente neste caso é a largura do *splice*, sendo o único a atingir um valor superior ao valor de referência.

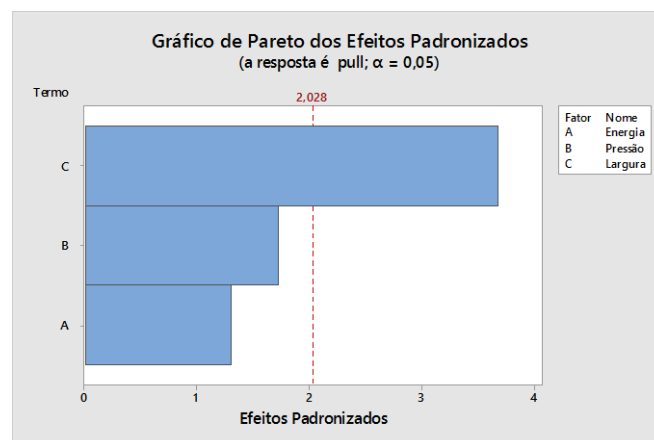


Figura 4.15-Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados

No gráfico de cubo, cada vértice do cubo apresenta uma combinação possível dos três parâmetros e a respectiva força de tracção máxima da soldadura obtida com esses parâmetros.

Analisando o gráfico de cubo seguinte é fácil concluir que os parâmetros que maximizam os valores da força de tracção uniaxial das soldaduras (parâmetros óptimos) são 900 W.s de energia, 1.6 bar de pressão e uma largura de 7 mm.

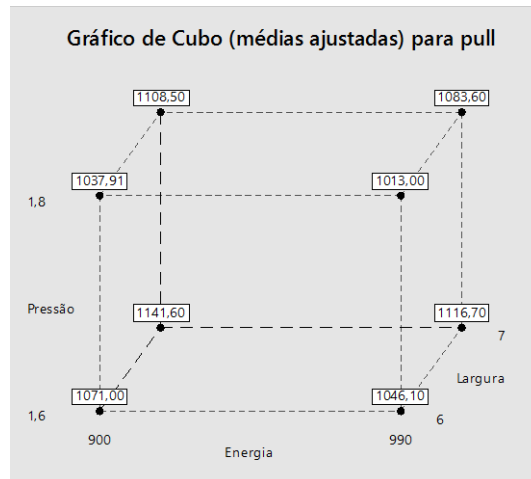


Figura 4.16-Gráfico de cubo para forças de ruptura

O otimizador do Minitab confirma estes valores como os parâmetros óptimos para o *splice* de secção 26 mm².

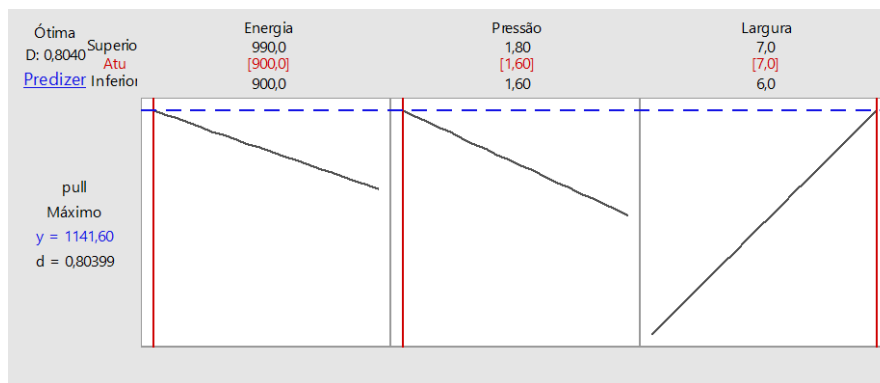


Figura 4.17-Optimizador de parâmetros

Então os parâmetros óptimos para o *splice* de secção 26 mm² em K2 são:

Tabela 4.4-Parâmetros otimizados para K2

Etapa	Energia [W.s]	Pressão [bar]	Amplitude [%]	Largura [mm]
K2	900	1,6	100	7

4.3.1.3. 25 mm² Cu x 35 mm² Al

Como ponto de partida os parâmetros de K2 revelaram-se insatisfatórios, apresentando um aspecto visual um pouco deteriorado com alguns filamentos partidos, querendo dizer que a optimização seguiria o esquema da tabela 3.5 no sentido descendente, diminuindo a energia e a pressão progressivamente. Apesar de não ser visualmente aceitável, o valor máximo da força de tracção foi bom.

No gráfico seguinte ilustra-se o caminho da optimização em estudo:

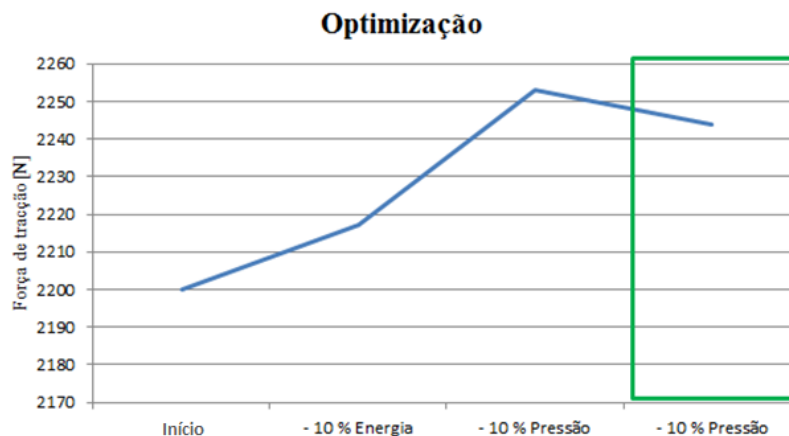


Figura 4.18-Optimização dos parâmetros pré-definidos

Partindo dos parâmetros iniciais, apenas se conseguiu obter um aspecto visual bom (sem filamentos partidos) após diminuir um patamar (corresponde a diminuir 10 % do valor) na energia e dois patamares na pressão. Diminuiu-se dois patamares de pressão seguidos, pois o *splice* não apresentava sinais de entrega energética excessiva, apesar de continuar com alguns filamentos partidos.

Então os parâmetros óptimos seriam uma combinação dos seguintes valores:

- Energia: 1800 ou 2000 W.s
- Pressão: 2.2 ou 2.7 bar
- Amplitude: 100 %
- Largura do *splice*: 12 mm

Mais uma vez, após análise factorial o resultado são os parâmetros que maximizam a força de tracção suportada pela soldadura.

Observando o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados podemos observar que nenhum dos parâmetros individualmente tem uma influência significativa, uma vez que nenhum ultrapassa o valor de referência. A linha de referência apenas é ultrapassada pela combinação de ambos os parâmetros.

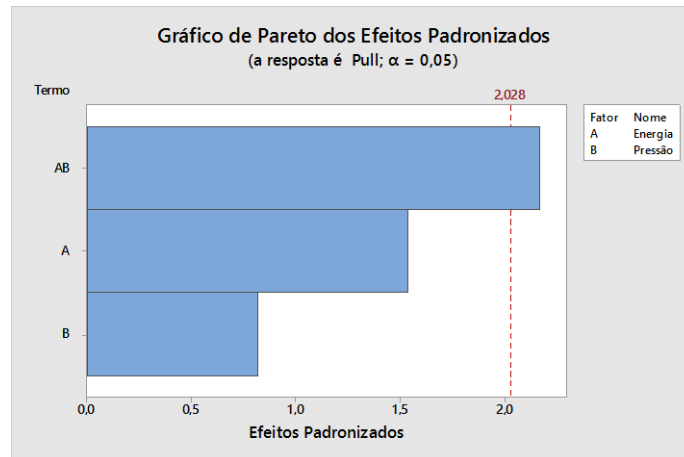


Figura 4.19-Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados

Analisando o gráfico de contorno seguinte é fácil concluir que os parâmetros que maximizam os valores da força de tracção uniaxial destas soldaduras (parâmetros óptimos) são 2000 W.s de energia e 2.2 bar de pressão, pois correspondem à zona verde-escuro. O gráfico tem uma escala de cores de forma a ser possível analisar a força de tracção suportada pelas soldaduras produzidas com os diferentes parâmetros, que vai de verde-claro (menor força de tracção) para verde escuro (maior força de tracção), progressivamente.

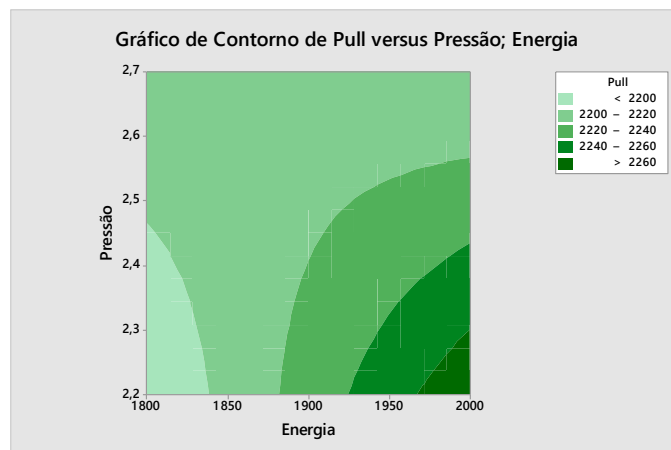


Figura 4.20-Gráfico de contorno da força de ruptura consoante a pressão e energia utilizadas durante a soldadura

O otimizador do Minitab confirma estes valores como os parâmetros ótimos para o *splice* de secção 60 mm².

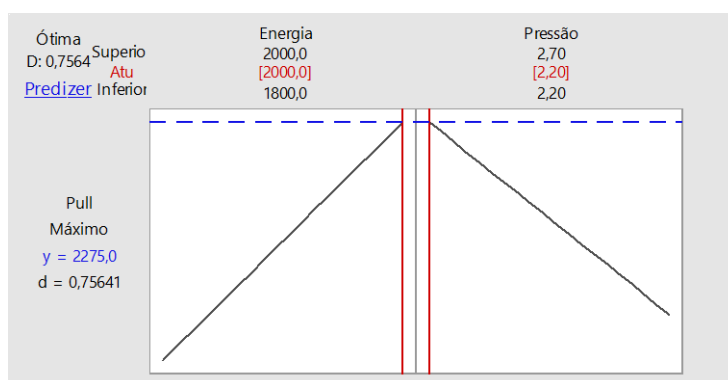


Figura 4.21-Optimizador de parâmetros

Então os parâmetros ótimos para o *splice* de secção 60 mm² em K2 são:

Tabela 4.5-Parâmetros otimizados para K2

Etapa	Energia [W.s]	Pressão [bar]	Amplitude [%]	Largura [mm]
K2	2000	2,2	100	12

4.3.1.4. 35 mm² Cu x 50 mm² Al

Como ponto de partida os parâmetros de K2 revelaram-se aceitáveis, apresentando um aspecto visual sem defeitos críticos, querendo dizer que a otimização seguiria o esquema da tabela 3.5 no sentido ascendente.

No gráfico seguinte ilustra-se o caminho da otimização em estudo:

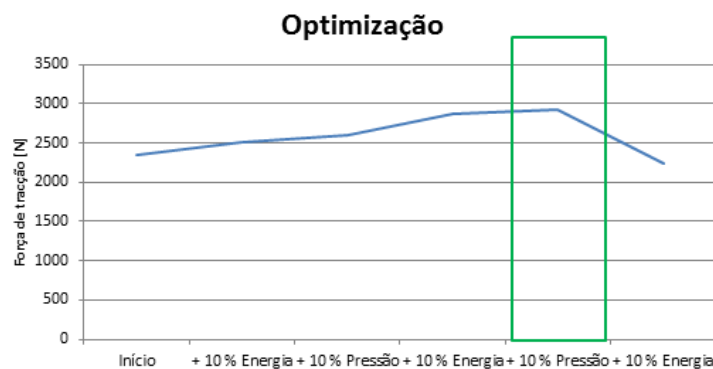


Figura 4.22-Optimização dos parâmetros pré-definidos

Partindo dos parâmetros iniciais, e subindo sucessivamente os valores de energia e pressão, os valores da força máxima de tração foram também eles sempre subindo. O aspecto visual, apesar de naturalmente mudar a cada alteração de parâmetros, apresentou sempre boas características.

Apenas à quinta alteração de parâmetros (terceira subida de 10 % de energia) é que houve uma queda no valor de força de tração, levando à paragem do processo.

Então os parâmetros óptimos serão uma combinação dos seguintes valores:

- Energia: 3850 ou 4235 W.s
- Pressão: 3.3 ou 3.6 bar
- Amplitude: 100 %
- Largura do *splice*: 15 ou 16.5 mm

Mais uma vez, após análise factorial o resultado são os parâmetros que maximizam a força de tração suportada pela soldadura.

Observando o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados podemos observar que, mais uma vez, de entre os três parâmetros que variaram, a largura foi o parâmetro que mais influencia teve sobre o valor de força máxima de tração que as soldaduras aguentaram.

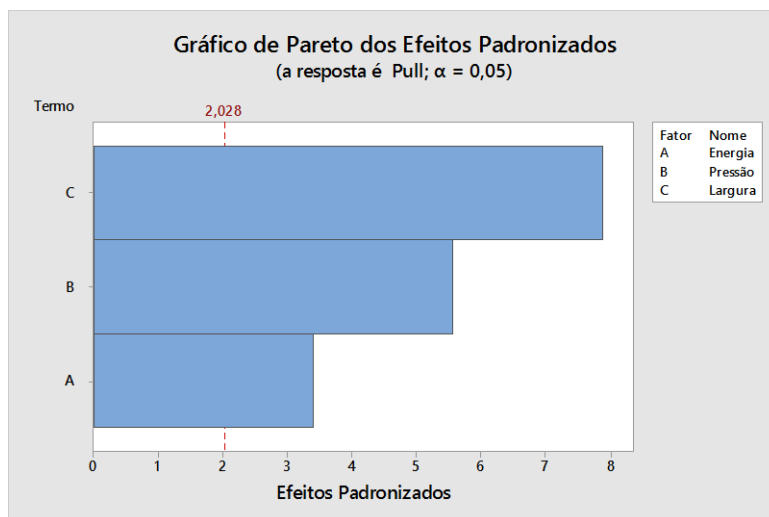


Figura 4.23-Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados

Analisando o gráfico de cubo seguinte e identificando a força máxima de tracção presente no gráfico (2962 N) é fácil concluir que os parâmetros 4235 W.s de energia, 3.60 bar de pressão e 16.5 mm de largura correspondem ao vértice onde se encontra este valor e, por isso, são os parâmetros óptimos.

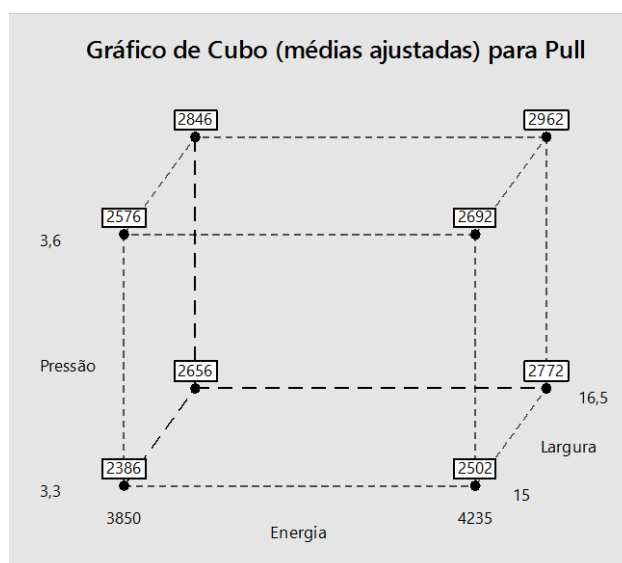


Figura 4.24-Gráfico de cubo para forças de ruptura

O otimizador do Minitab confirma estes valores como os parâmetros óptimos para o *splice* de secção total 85 mm².



Figura 4.25-Optimizador de parâmetros

Então os parâmetros ótimos para o *splice* de secção 80 mm² em K2 são:

Tabela 4.6-Parâmetros otimizados para K2

Etapa	Energia [W.s]	Pressão [bar]	Amplitude [%]	Largura [mm]
K2	4235	3,6	100	16,5

4.4. Validações

Uma vez que este estudo teve como principal objectivo verificar a viabilidade de substituir os actuais terminais por soldaduras por ultra-sons entre os fios de cobre e os fios de alumínio, foi interessante também comparar os valores de Cpk e Ppk dos dois processos.

Na tabela 4.7 pode-se observar alguns dados importantes. Estão reunidos os valores das validações das soldaduras fio com fio e das soldaduras fio com terminal, facilitando assim a comparação entre os valores correspondentes. Os LSL (limite inferior especificado) utilizados nas validações das soldaduras de fio com terminal foram os mesmos utilizados agora nas validações das soldaduras fio com fio, de forma a que a comparação entre valores de Cpk e Ppk dos dois processos seja justa e coerente.

Não existe nenhuma validação de soldadura de fio de 10 mm² de alumínio com terminal, por isso não existem valores para comparação com a soldadura fio com fio (6 mm² Cu x 10 mm² Al).

Tabela 4.7-Comparação de dados relativos às soldaduras fio-com-fio e fio com terminal equivalentes

	Soldadura fio-com-fio (6 mm ² Cu x 10 mm ² Al)	Soldadura fio com terminal (16 mm ² Al)	Soldadura fio-com-fio (10 mm ² Cu x 16 mm ² Al)	Soldadura fio com terminal (35 mm ² Al)	Soldadura fio-com-fio (25 mm ² Cu x 35 mm Al)	Soldadura fio com terminal (50 mm ² Al)	Soldadura fio-com-fio (35 mm ² Cu x 50 mm ² Al)
σ (n-1)	20,43	59,62	43,5	149,89	70,46	313,46	106,51
σ (n)	20,35	59,38	43,32	149,29	70,18	312,2	106,08
LSL (Lower Specification Limit) [N]	600	750	750	1200	1200	1200	1200
\bar{X} (Média) [N]	760	1286,66	1146,11	2473,8	2263	3022,6	2892,08
Ppk	2,59	3	3,04	2,83	5,03	2,09	5,3
Cpk	2,7	3,04	4,14	2,91	5,07	1,94	5,55

Analisada a tabela, e comparando sempre os valores equivalentes correspondentes aos dois processos, podemos verificar que os valores médios da força máxima de tracção (\bar{X}) são sempre maiores nas soldaduras fio com terminal, no entanto os Cpk e Ppk das soldaduras fio com fio são sempre muito superiores aos valores correspondentes das soldaduras fio com terminal. Isto acontece devido aos desvios padrão muito menores nas soldaduras fio com fio, indicando um processo muito mais estável.

4.5. Degradação do isolamento

Após a primeira semana de permanência das bobinas de cabo de cobre e alumínio na estufa, e analisando os tempos de soldadura dos *splices* (dados retirados dos registos da máquina), assim como os valores da força máxima de tracção, foi possível verificar que nos *splices* em que temos a presença de cobre vindo da estufa (*splices* do tipo 1 e 2) o tempo de soldadura aumenta bastante em relação aos *splices* produzidos recorrendo a cabos bons. Esse aumento de tempo de soldadura é assinalado pelo erro 210 (tempo de soldadura irregular) na máquina durante a execução das soldaduras, sinal de que os cabos estão contaminados. Também

as forças máximas de tracção alcançadas nestas soldaduras ficaram aquém das registadas nas soldaduras dos cabos bons.

Já na produção dos *splices* 3 não se verificou nenhuma alteração em relação aos *splices* produzidos recorrendo a cabos bons. Podemos concluir que os cabos de alumínio não contaminaram. Esta conclusão é ainda apoiada pelo facto de os resultados obtidos nos *splices* 1 e 2 serem muito parecidos, confirmando que é o cobre da estufa que faz a diferença nos resultados.

Podemos observar os resultados obtidos na primeira semana na seguinte tabela.

Tabela 4.8-Valores das forças de ruptura das soldaduras após a primeira semana

Semana 1					
Code	Pull [N]	Code	Pull [N]	Code	Pull [N]
1	724	2	627	3	761,5
1	598,5	2	675	3	816,5
1	685,5	2	667	3	791
1	686,5	2	648	3	826,5
1	706,5	2	670	3	804
1	696,5	2	661	3	764
1	698,5	2	667,5	3	768,5
1	632,5	2	704	3	761
1	669	2	715,5	3	797
1	636,5	2	639,5	3	805,5
\bar{X}	673,4	\bar{X}	667,45	\bar{X}	789,55
σ	39,1598	σ	26,9686	σ	24,2904

Nas três semanas seguintes os resultados foram bastante semelhantes, com os valores dos ensaios de tracção a serem muito parecidos para todos os tipos de *splice*, assim como os tempos de soldadura.

A única diferença foi a presença de *loops* nos *splices* 2 e 3. Este resultado mostra que o alumínio a partir da segunda semana parece contaminar e provocar o aparecimento de *loops*, como se pode observar a seguir na figura 4.26.

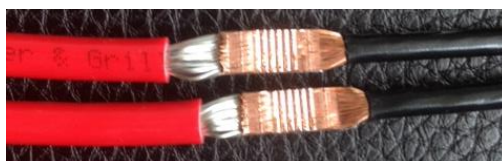


Figura 4.26-*Splices* com *loops* devido a contaminação do alumínio.

5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

O trabalho realizado em soldaduras dissimilares Cu/Al de multifilares para a indústria de cablagens incidiu em três aspectos mais significativos:

- Na monitorização do equipamento de soldadura, mais especificamente na capacidade da máquina detectar a falta de filamentos e quantificar para cada combinação de secções estudadas a falta de filamentos.
- Na optimização do procedimento de soldadura para as ligações dissimilares em estudo, considerando-se neste aspecto o posicionamento dos cabos e os parâmetros de processo a controlar.
- O efeito da degradação do revestimento em PVC na qualidade das soldaduras avaliada pela força máxima em ensaios de tracção.

Assim, as conclusões organizam-se nesta sequência.

Relativamente à monitorização do equipamento verificou-se que a máquina é mais sensível à detecção de filamentos quanto maior for a área da secção do *splice*, obtendo-se no caso particular deste estudo os seguintes valores:

- Na secção de 16 mm² de *splice* a detecção ocorre para uma falta de 7 % de material.
- Nas secções de 26 e 60 mm² de *splice* a detecção ocorre para uma falta de 6 % de material.
- Na secção de 85 mm² de *splice* a detecção ocorre para uma falta de 5 % de material.

De uma maneira geral, este equipamento é fiável na detecção deste problema.

O posicionamento dos cabos revelou-se preponderante para a qualidade das soldaduras, afectando o aspecto visual destas, a força de ruptura e a estabilidade do processo.

Um alinhamento adequado conduz a um bom aspecto visual do *splice*, a forças de ruptura das soldaduras superiores (cerca de 10 %) às obtidas sem alinhamento e a um desvio padrão dos valores das forças de ruptura menor para os cabos alinhados, revelando uma maior estabilidade do processo.

Desenvolveu-se um procedimento semi-empírico para o posicionamento que provou ser eficaz e reprodutível para qualquer calibre de cabos soldados nesta máquina.

Comparando os resultados obtidos para a soldadura por ultra-sons fio-com-fio de metais dissimilares com os dados relativos às soldaduras fio com terminal, podemos concluir que a soldadura fio-com-fio, além de ser um processo mais barato do que a utilização dos terminais, a sua aplicação na indústria automóvel conduz a uma redução significativa no peso final do produto. Para além disso, é um processo mais rápido e mais estável. Analogamente os índices de capacidade e desempenho do processo, Cpk e Ppk, respectivamente, são sempre superiores quando comparados com os obtidos em soldaduras equivalentes fio-terminal.

Relativamente à contaminação dos fios, ficou provado que é determinante para a qualidade final da soldadura. Neste estudo verificou-se que o isolamento de PVC degrada-se e contamina os fios de cobre após uma semana, quando sujeitos às condições extremas de temperatura reproduzidas nos ensaios em estufa. O alumínio apresenta sinais de contaminação a partir da segunda semana de ensaio.

Esta contaminação do cobre traduz-se numa redução dos valores das forças de ruptura das soldaduras e num aumento no tempo de soldadura aquando da sua produção. Ao contrário do cobre, a contaminação do alumínio não afecta as forças de ruptura das soldaduras e não afecta o tempo de soldadura na produção dos mesmos, o que torna a detecção da contaminação do alumínio impossível. No entanto, o efeito desta contaminação é detectável a partir de uma inspecção visual pois os *splices* apresentam *loops*.

Podemos então concluir que o controlo das condições de armazenamento dos cabos de cobre e alumínio é crucial para garantir soldaduras de qualidade com as características alcançadas aquando das suas validações.

Em futuros trabalhos seria interessante conseguir executar o processo de soldadura de cabos dissimilares sem a necessidade de fazer as soldaduras em duas fases. Isso passaria pelo desenvolvimento de um novo *software* que controlasse o faseamento da entrega energética, por exemplo. Também no *tooling* se identificam necessidades de desenvolvimento, nomeadamente, na sua geometria de modo a adequá-la aos diferentes materiais neste tipo de soldadura.

6. Bibliografia

- [1] Silva, A., "USW Alu Training Manual". Lisboa: Delphi.
- [2] Johns, J., DePrisco, C., "The Application of Ultrasonic Energy to Cold Welding of Metals", Research report n. 53-77, Aeroprojects Inc. Novembro, 1953.
- [3] "New developments in advanced welding". Edited by Nasir Ahmed, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2005.
- [4] Wodara, J., "Joint formation in the Ultrasonic welding of Metallic Substances", ZIS Mitteilungen, v.28, n.1, pp.102-108, 1986.
- [5] Mitskevich, A., Ginzburg, S., Kholopov, Y., "Mechanism of the Ultrasonic welding of metals", Ul'trsvuk. Tekh., n.2, p.7, 1966.
- [6] Xin Wu, T. L., "Microstructure, welding mechanism, and failure of Al/Cu ultrasonic welds". Journal of Manufacturing Processes, v.20, pp.321-331, 2015.
- [7] Karakosow, E.S., "Joining of Metals in the Solid State", Publisher metallurgy, 1976.

- [8] Harthoorn J., 1978. "Ultrasonic Metal Welding", PhD Dissertation, Technical University Eindhoven
- [9] Shackelford, J. F, "Ciência dos Materiais". São Paulo: Pearson Education, 2008.
- [10] "Battery Cable Low Tension, Aluminum Conductor, PVC Insulated, Thin Wall, FLARY-B/T105, for Costumer VW", Engineering Specification No. M6875, Delphi 2015
- [11] "Cable Low Tension, PVC Insulated, Lead Free, FLRY-B/T105, for Delphi E/EA", Engineering Specification No. M3232, Delphi 2015
- [12] Steiner, S., Abraham, B., Mackay, J., "Understanding Process Capability Indices", Ontario, Institute for Improvement of Quality and Productivity,
- [13] S. Shawn Lee, Tae Hyung Kim, S. Jack Hu, Wayne W. Cai, Jeffrey A. Abell, "Analysis of Weld Formation in Multilayer Ultrasonic Metal Welding Using High-Speed Images", Journal of Manufacturing Science and Engineering, v.137, Issue 3, 2015
- [14] MECS (12 de Setembro de 2016), "Ultrasonic Metal Welding", disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=VGoKKH61bIA>