# DESGASTE DE FERRAMENTAS DE SOLDADURA POR ULTRA-SONS NA PRODUÇÃO DE CABLAGENS ELÉCTRICAS PARA AUTOMÓVEIS

R.M. PEREIRA[(1)], J.G. CUNHA[(1)], J.R. GOMES[(2)*]

[(1)] Lear Corporation – Póvoa de Lanhoso, Portugal.

[(2)*] Departamento de Engenharia Mecânica, CIICS, Universidade do Minho,
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal.
jgomes@dem.uminho.pt

**ABSTRACT:** Ultrasonic welding is used to obtain junctions in automotive electric cabling. However, surface damage of the active elements that contact the cupper filaments during the welding process must be minimized. Thus, the wear resistance of the contact surface of welding tools must be enough to allow good quality of joints during a high number welding cycles. In this work, the wear behaviour of tools for ultrasonic welding is analysed during the production process of cablings for the automotive industry. Hipereutectoide steel was considered for the welding tools and the influence of both the application of a heat treatment and the use of a metallic PVD-TiNAl coating on the wear behaviour of tools was evaluated. All tests were performed in industrial equipment operating in usual conditions of labour. Results showed that the application of the PVD-TiNAl coating allows excellent wear behaviour together with high quality of joints and a significant reduction of costs in the productive process.

**Keywords:** Wear; Ultrasonic welding; Electric cablings

**RESUMO:** A soldadura por ultra-sons é um processo utilizado na obtenção de uniões em cablagens eléctricas para automóveis. Porém, a alteração superficial das peças activas que contactam os fios de cobre durante o processo de soldadura deve ser minimizada. Assim, a superfície de contacto das ferramentas de soldadura deve possuir propriedades de resistência ao desgaste que permitam obter com qualidade o maior número possível de ciclos de soldadura. Neste trabalho é analisado o comportamento ao desgaste de ferramentas de soldadura por ultra-sons na produção de cablagens eléctricas para automóveis. Foram consideradas ferramentas em aço hipereutectóide e foi avaliada a influência da aplicação de um tratamento térmico de têmpera bem como de um revestimento metálico PVD-TiNAl no comportamento ao desgaste das ferramentas. Os testes foram realizados num equipamento industrial em condições normais de laboração. Os resultados mostraram que a aplicação do revestimento PVD-TiNAl garantiu um excelente comportamento ao desgaste, elevado padrão de qualidade das uniões e uma significativa redução de custos no processo produtivo.

**Palavras chave:** Desgaste; Soldadura por ultra-sons; Cablagens eléctricas.

## 1. INTRODUÇÃO

Define-se soldadura, como sendo um processo de ligação permanente entre duas peças metálicas, através de uma união íntima e atómica entre as superfícies em contacto, obtendo-se uma junta com propriedades mecânicas análogas ou superiores às do metal base, mantendo-se a continuidade de natureza metálica através da ligação.
Para se obter uma soldadura torna-se necessário fornecer energia, seja por chama, arco eléctrico, resistência eléctrica ou meios mecânicos (pressão ou atrito), possuir mecanismos de remoção de substâncias contaminadoras superficiais (óxidos, filmes orgânicos), seja por acção decapante (arco eléctrico), fluxo ou acção mecânica (fricção). Torna-se ainda imprescindível evitar a contaminação atmosférica e seus efeitos durante o processo de soldadura, assim como controlar as propriedades da soldadura.
Existem diversos processos para a obtenção de juntas soldadas, cada qual com o seu campo específico de aplicação determinado pelas características da união a obter. Assim, por exemplo, enquanto que para certas aplicações faz todo o sentido recorrer a um processo de soldadura que utilize uma fonte de calor e material de adição, noutras aplicações torna-se preferível unir os materiais directamente sem recorrer a uma fonte de calor nem a material de adição. É este o caso das uniões de condutores nas cablagens eléctricas para automóveis, onde se utiliza a técnica de soldadura por ultra-sons.
As raízes da tecnologia ultra-sónica remontam às pesquisas do efeito piezoeléctrico conduzidas por Pierre Curie por

volta de 1880 [1], o qual descobriu que cristais assimétricos tais como o quartzo produziam uma carga eléctrica quando uma pressão mecânica era aplicada. Inversamente, eram obtidas vibrações mecânicas quando aplicadas oscilações eléctricas aos mesmos cristais. Uma das primeiras aplicações da tecnologia de ultra-sons foi o SONAR (SOund NAvigation and Ranging), amplamente utilizado durante a 2ª Guerra Mundial, seguindo-se-lhe quase de imediato a aplicação no campo do diagnóstico médico. No início da década de 1950 os ultra-sons conheciam já várias aplicações e, ao serem conduzidas experiências para determinar possíveis benefícios para a aplicação de energia ultra-sónica aos eléctrodos durante a soldadura por pontos, verificou-se que as peças ficaram soldadas antes mesmo de passar qualquer corrente eléctrica. Estudos posteriores revelaram que a soldadura ocorria quando era aplicado às peças o movimento vibratório ultra-sónico e simultaneamente exercida uma pressão nas pontas dos eléctrodos [2]. Na sequência destes estudos surgiram na década de 1960 as primeiras máquinas de soldadura por ultra-sons. Basicamente, nestas máquinas, a produção de energia ultra-sónica começa com a conversão, num gerador, de energia eléctrica com os convencionais 50/60 ciclos por segundo da corrente de rede, para energia eléctrica de 20 000 ou 40 000 ciclos por segundo. Por sua vez, os materiais a serem soldados são colocados e comprimidos entre duas peças designadas "bigorna" e "garra deslizante" (Fig. 1), onde são sujeitos à acção do sonótrodo que durante o processo de soldadura oscila horizontalmente com frequência elevada (20-40 kHz). O sonótrodo desempenha uma função muito importante em todo o processo de soldadura por ultra-sons, uma vez que tem de contrair e expandir 20 000-40 000 vezes por segundo sem aquecer em demasia ou entrar em cedência, ao mesmo tempo que desloca o fio de cobre para a posição onde vai ser exercida a pressão e cria as condições necessárias à execução da soldadura. Com efeito, a soldadura a frio de metal, é um processo complexo que envolve forças estáticas, forças vibratórias de corte e um moderado aumento de temperatura na área onde ocorre de soldadura.

No presente estudo é analisado o comportamento ao desgaste da peça activa no processo de soldadura por ultra-sons na produção de cablagens eléctricas para automóveis designada "garra deslizante", sendo avaliada a influência da aplicação de um tratamento térmico de têmpera bem como de um revestimento metálico PVD-TiNAl no desempenho da ferramenta quando sujeita a condições normais de laboração.

## 2. MATERIAIS E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

### 2.1. Aço da garra deslizante

Na Tabela 1 apresenta-se a composição química e a dureza do aço utilizado na garra deslizante. Como se pode constatar, trata-se de um aço hipereutectóide, ou seja, com uma percentagem de C superior a 1.2.

O aspecto da estrutura metalográfica do aço da garra deslizante encontra-se representado na Fig. 2 e corresponde ao aço no seu estado normal. É possível observar vagens de cementite envolvendo os grãos de perlite, característica normal para um aço com o teor em carbono indicado na Tabela 1.

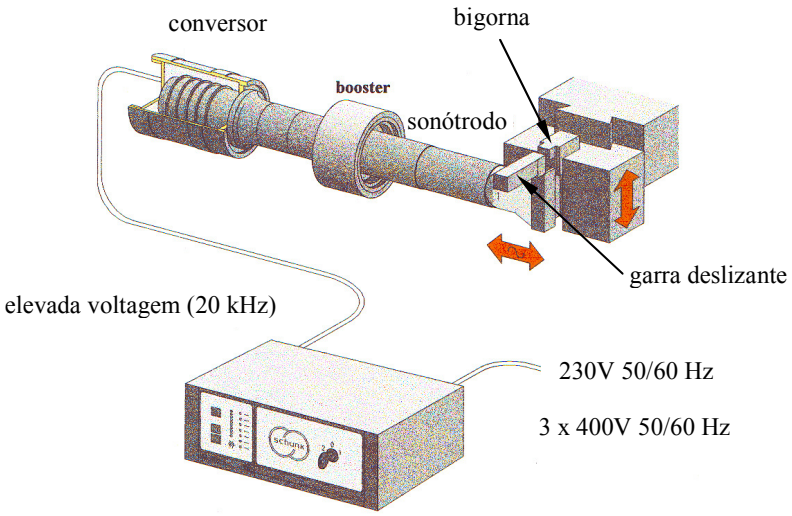



**Fig. 1.** Sistema transdutor ultra-sónico e "garra deslizante" [1].

**Tabela 1. Composição química (%) e dureza do aço da garra deslizante.**

| Fe | C | Cr | Mo | V | Mn | Ni | W | Co | Cu | P | Dureza $H_V(30)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 84.80 | 1.57 | 11.80 | 0.89 | 0.98 | 0.17 | 0.31 | 0.32 | 0.04 | 0.08 | 0.012 | 640 |

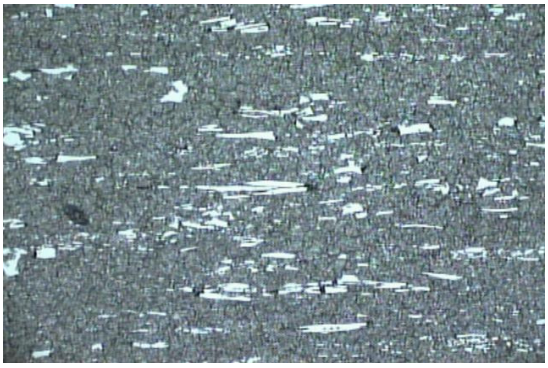


**Fig. 2.** Micrografia do aço da garra deslizante (200×).

### 2.2. Tratamento térmico

Antes de tratar termicamente as ferramentas procedeu-se a um estudo sobre o tratamento térmico mais adequado a efectuar ao aço. Dado que se trata de um aço hipereutectóide (Tabela 1), o tratamento térmico recomendado é uma têmpera [3]. Assim, foram realizadas quatro séries de têmperas (1050ºC / 2 horas), divergindo essencialmente entre elas no tipo de arrefecimento (ao ar e em óleo) e aplicação ou não de revenido (270ºC / 2 horas).

### 2.3. Revestimento metálico PVD-TiNAl

O desempenho das ferramentas pode ser aumentado significativamente por meio de um tratamento superficial. A nitruração é um dos processos usados para melhorar as características mecânicas dos aços, consistindo basicamente na introdução de azoto sob a forma de nitretos que embora afectando uma camada pouco profunda conferem elevada dureza superficial [4]. Assim, este processo aplica-se quando se pretende conferir uma dureza máxima à superfície e uma elevada resistência ao desgaste. Por outro lado, a dilatação volumétrica induzida na camada nitrurada provoca tensões de compressão que aumentam consideravelmente a resistência à fadiga. Deste modo, num grande número de casos a nitruração aumenta significativamente a duração das ferramentas ou dos elementos de construção. Por outro lado, constatou-se também que a nitruração dos aços evita a adesão de certos materiais às ferramentas e retarda a danificação superficial por erosão.

No presente estudo utilizou-se o processo "duplex de nitretação a plasma" para a obtenção de um revestimento metálico PVD-TiNAl sobre as garras deslizantes. Este processo consiste na nitretação da peça a ser revestida e posterior revestimento PVD-TiNAl (nitreto de titânio e alumínio produzido por Deposição Física a Vapor) [4]. A camada nitrurada, que possui dureza intermédia entre a camada TiN e o substrato não nitrurado, actua como uma "almofada dura", o que melhora a aderência da camada TiN à ferramenta em aço (Fig. 3).

O revestimento metálico PVD-TiNAl é uma cobertura formada por várias camadas e possui uma combinação de propriedades como elevada dureza, adesão e resistência a temperaturas elevadas, que lhe conferem um uso universal. Além disso, esta camada é caracterizada por baixa porosidade, alta estabilidade química e térmica, coeficientes de expansão térmica e de transmissão de calor semelhantes aos do aço e alta resistência à oxidação. Além destas propriedades, o revestimento metálico PVD-TiNAl proporciona valores baixos para o coeficiente de atrito quando em contacto de deslizamento com uma grande diversidade superfícies [5].

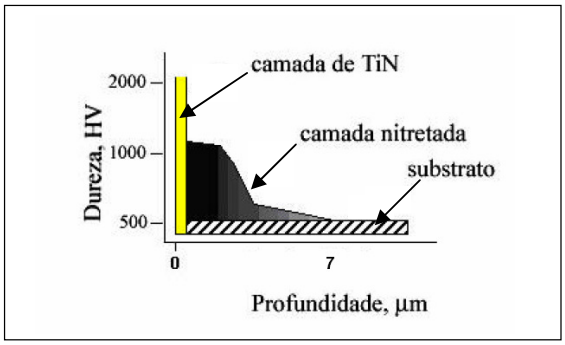



**Fig. 3.** Representação esquemática da variação da dureza em função da profundidade na peça em aço no processo duplex de nitretação a plasma [4].

O revestimento metálico PVD-TiNAl é obtido numa câmara sob vácuo a uma temperatura inferior a 500ºC. Tal temperatura é propícia à realização do processo abaixo da temperatura de revenido dos aços para trabalho a quente. As ferramentas podem ser revestidas sem risco de alteração dimensional significativa, pois além deste processo não comprometer as propriedades mecânicas do material, as camadas depositadas variam entre 5 e 7 µm de espessura. Por outro lado, o aumento da espessura do revestimento traduz-se num aumento da capacidade de suportar cargas, independentemente da sua natureza [4].

Na Fig. 4 apresenta-se o aspecto de uma garra deslizante em aço com revestimento metálico PVD-TiNAl. De realçar que o revestimento efectuado à garra deslizante (como demonstra a Fig. 4), apresenta um bom acabamento superficial.

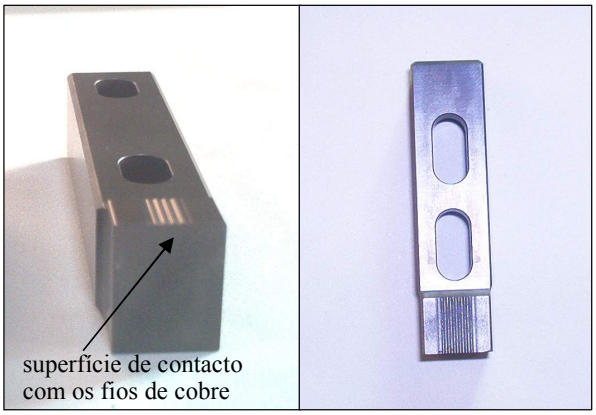



**Fig. 4.** Aspecto de uma garra deslizante com revestimento metálico PVD-TiNAl.

### 2.4. Execução de uma soldadura por ultra-sons na produção de cablagens eléctricas

Na Fig. 5 apresenta-se o diagrama de execução de uma soldadura por ultra-sons. Cada ciclo de soldadura é um processo sequencial de acções que obedece a um conjunto de regras e procedimentos precisos. Assim, para se obter uma união que se considere aceitável, é necessário ultrapassar várias etapas, e, em cada uma delas, cumprir os requisitos associados. Isso mesmo é evidenciado no diagrama da Fig. 5, onde o processo é caracterizado nas suas diversas etapas [6].

A garra deslizante, identificada na Fig. 5, é uma ferramenta determinante para a obtenção de uma união de qualidade e por isso foi o objecto do presente estudo de caracterização ao desgaste. Para tal, foram testadas em condições normais de laboração e durante várias semanas garras deslizantes sem revestimento e com revestimento metálico PVD-TiNAl. A quantificação física do desgaste (taxa de desgaste) nas ferramentas de soldadura por ultra-sons foi medida por pesagem em balança de precisão antes, a meio termo e após cada ciclo de trabalho em soldadura e a identificação dos mecanismos de desgaste dominantes na superfície de contacto com os condutores foi avaliada por microscopia electrónica de varrimento com análise química por dispersão de energias (SEM/EDS). Foi ainda caracterizada a rugosidade superficial na zona de contacto da garra deslizante antes, a meio termo e no final de cada teste.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho foram consideradas garras deslizantes em aço hipereutectóide e avaliada da influência da aplicação de um tratamento térmico de têmpera bem como de um revestimento metálico PVD-TiNAl no seu comportamento ao desgaste.

No que respeita ao tratamento térmico, após o estudo a vários tipos de tratamentos (têmpera com arrefecimento ao ar e em óleo seguida ou não de revenido) e da comparação entre eles, verificou-se que a solução mais adequada para as ferramentas consiste numa têmpera seguida de revenido com arrefecimento em óleo. Contudo, tendo em consideração o factor custo inerente a todo o processo de obtenção do tratamento térmico nas ferramentas e o facto da melhoria do seu desempenho em termos de resistência ao desgaste se ter revelado inferior à da ferramenta com revestimento metálico PVD-TiNAl, tornou-se de imediato claro que esse não seria um método economicamente interessante para implementação industrial. Assim, toda a análise que de seguida se apresenta tem por base apenas a comparação entre a ferramenta não revestida e não tratada termicamente e a ferramenta com revestimento metálico PVD-TiNAl.

Durante os testes, as garras deslizantes, sem e com revestimento metálico PVD-TiNAl, foram colocadas em produção durante 10 semanas de trabalho, período este coincidente com a Manutenção Preventiva do equipamento. Em cada ciclo de soldadura, esta peça activa sustenta uma fase de compactação dos fios seguida do movimento oscilatório promovido por um sistema transdutor ultra-sónico, o qual induz uma intensa interacção tribológica no contacto garra deslizante-união. Na Fig. 6 apresenta-se a perda de peso das garras deslizantes, $\Delta_p$, ao longo das semanas em que estiveram em produção. Da análise da Figura 6 torna-se perfeitamente notório um progressivo aumento da perda de peso das ferramentas ao longo do período de trabalho, sendo que a ferramenta não revestida sofreu uma perda muito mais acentuada de peso do que a garra deslizante revestida.

Na Fig. 7 evidencia-se esquematicamente a área aparente de

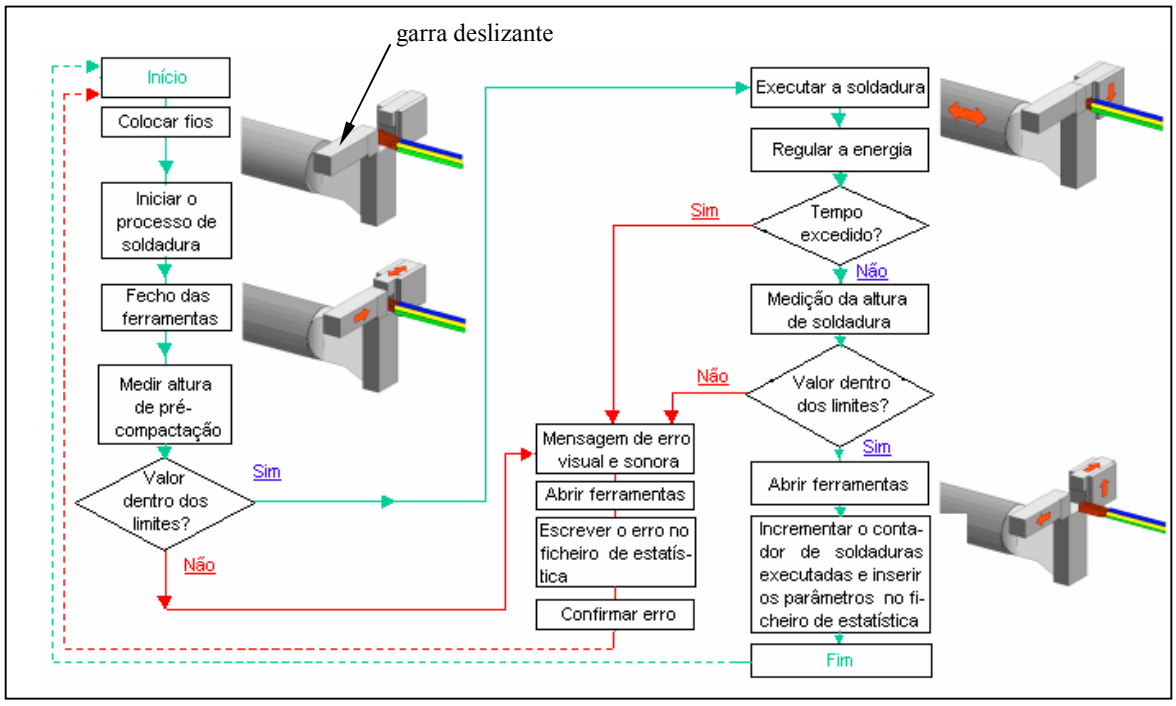



**Fig. 5.** Diagrama de execução de uma soldadura por ultra-sons [6].

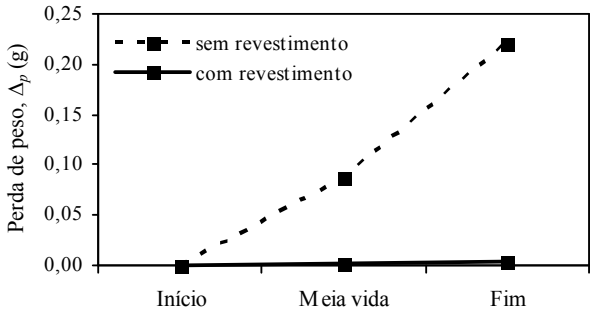



**Fig. 6.** Perda de peso das ferramentas ao longo do período de trabalho (10 semanas).

contacto entre uma união soldada por ultra-sons e a garra deslizante. Conforme se constatou experimentalmente, trata-se sempre de uma área rectangular (a×b), cujos lados são função do somatório do diâmetro de todos os fios envolvidos na união.

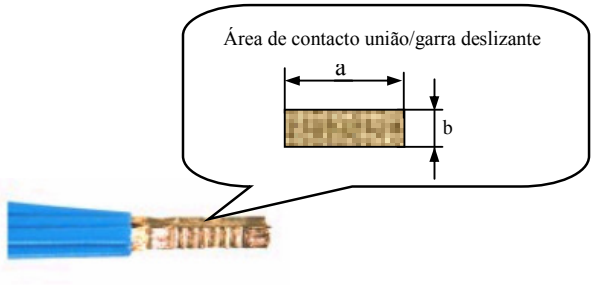



**Fig. 7.** Área de contacto entre uma união soldada por ultra-sons e a ferramenta (garra deslizante).

Ao longo do processo produtivo de 10 semanas, e de acordo com o planeamento da empresa, uma mesma ferramenta realiza várias sequências de junções envolvendo diferentes números de fios. Porém, esse número de fios corresponde a um padrão típico da empresa, não muito diverso, cujo somatório dos diâmetros para cada junção se apresenta na primeira coluna da Tabela 2. Nesta mesma tabela é também indicada a área aparente de contacto para cada tipo de junção e é apresentada a quantidade de uniões de cada tipo produzida por cada uma das ferramentas em análise (sem revestimento e com revestimento) durante o período de tempo em análise no presente estudo.

Com base na perda de peso da garra deslizante, $\Delta_p$, e no cálculo da área total de união soldada que efectivamente contactou a ferramenta durante o período do processo produtivo em análise, $q$, a taxa de desgaste, $Q$, é definida pela seguinte equação:

$$Q = \frac{\Delta_p}{q} \left[ g / mm^2 \right]$$

Na Tabela 3 apresenta-se para as duas ferramentas a diferença entre o peso inicial e o peso final, após o período de operação no equipamento industrial em condições normais de laboração, Δp, a área total de união soldada que contactou a superfície da garra deslizante, $q$, e o valor da taxa de desgaste, $Q$.

No gráfico da Fig. 8 compara-se a cadência de produção das duas ferramentas (sem e com revestimento), podendo-se constatar que a quantidade de uniões de cada tipo que cada ferramenta produziu no período em estudo foi idêntica. Este facto torna viável a comparação directa entre os valores da taxa de desgaste calculados para ambas as ferramentas. Assim, verifica-se que a aplicação do revestimento metálico PVD-TiNAl à garra deslizante proporcionou face à ferramenta não revestida uma redução de duas ordens de grandeza na taxa de desgaste. Este facto significa uma melhoria drástica no desempenho da garra deslizante durante o processo produtivo de juntas de soldaduras por ultra-sons na produção de cablagens para automóveis, o que, em consequência da vida mais longa da ferramenta revestida permite uma significativa redução dos custos inerentes ao processo produtivo em causa.

**Tabela 2. Junções típicas produzidas, respectiva área de contacto com a garra deslizante e quantidade de uniões produzidas por cada ferramenta (sem revestimento e com revestimento) durante o processo produtivo em análise (10 semanas).**

| Somatório do diâmetro dos fios (mm) | Dimensões da área de contacto entre a união e a garra deslizante | | Área de contacto por união (a×b) ($mm^2$) | Quantidade de uniões produzidas (ciclos) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Comprimento, a (mm) | Largura, b (mm) | | Sem revestimento | Com revestimento |
| 5.2 | 10 | 1.1 | 11 | 13934 | 12852 |
| 7.0 | 10 | 1.3 | 13 | 2515 | 2090 |
| 7.5 | 10 | 1.4 | 14 | 7431 | 10127 |
| 7.7 | 10 | 1.6 | 16 | 3205 | 1897 |
| 8.0 | 10 | 1.8 | 18 | 12425 | 11670 |
| 8.2 | 10 | 1.9 | 19 | 10176 | 8035 |
| 9.05 | 10 | 2.4 | 24 | 2896 | 1406 |

**Tabela 3. Diferença de peso de cada ferramenta, $\Delta p$, área total de união soldada que contactou a superfície da ferramenta, $q$, e taxa de desgaste da garra deslizante, $Q$.**

| | Ferramenta (garra deslizante) | |
|---|---|---|
| | Sem revestimento | Com revestimento |
| Diferença de peso, $\Delta_p$ (g) | 0.2202 | 0.0039 |
| Área total de contacto união/ferramenta, $q$, ($mm^2$) | 829 816 | 738 748 |
| Taxa de desgaste, $Q$ ($g/mm^2$) | $2.65\times10^{-7}$ | $5.28\times10^{-9}$ |

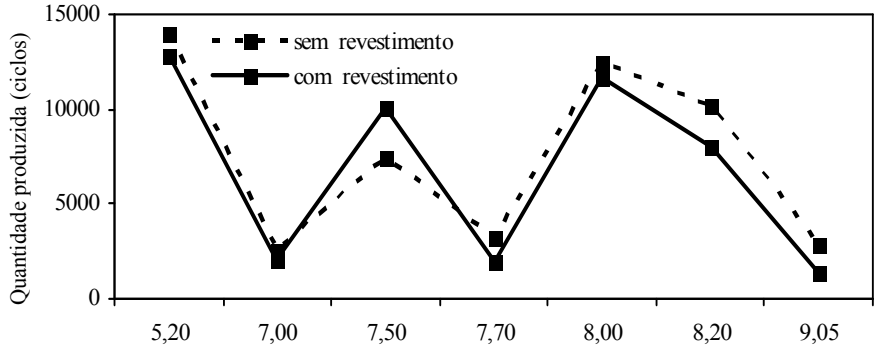



**Fig. 8.** Comparação da cadência de produção das duas garras deslizantes (sem e com revestimento).

Para a boa qualidade das juntas produzidas, além da redução da taxa de desgaste da ferramenta interessa manter uma baixa rugosidade superficial na zona da garra deslizante que contacta directamente com os fios de cobre durante o processo de soldadura. Na Fig. 9 apresenta-se a evolução do parâmetro $R_{max}$ da superfície de contacto das ferramentas sem e com revestimento ao longo das 10 semanas em que estiveram em produção. Mais uma vez se confirma a superioridade da ferramenta revestida, cujo valor da rugosidade superficial máxima ($R_{max}$) se mantém praticamente inalterado até ao fim do período de utilização em análise. Por outro lado, no caso da ferramenta sem revestimento, o valor de $R_{max}$ aumenta muito significativamente e em concordância com a degradação superficial associada a um valor mais elevado da taxa de desgaste (Tabela 3).

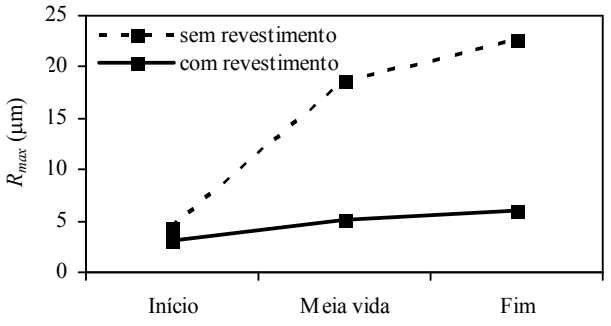
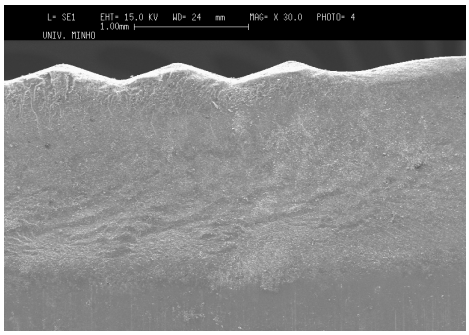



**Fig. 9.** Comparação da rugosidade superficial máxima, $R_{max}$, das ferramentas na zona de contacto com as juntas ao longo do período de trabalho (10 semanas).

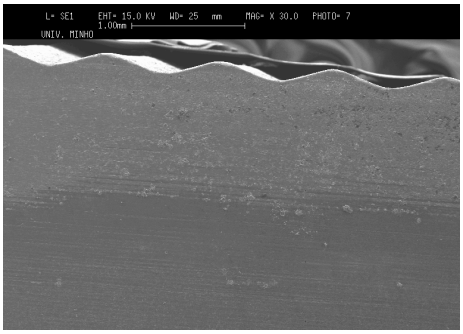
Com a aplicação do revestimento metálico PVD-TiNAl às garras deslizantes, além do aumento muito significativo do tempo de vida útil da ferramenta e da preservação da sua rugosidade superficial inicial, verificou-se ainda ser possível reutilizar eficazmente as ferramentas, bastando para o efeito uma simples rectificação seguida de nova deposição do revestimento. Este aspecto é de grande relevância em termos de custo do processo produtivo, pois resulta numa drástica redução na aquisição de ferramentas novas sem que apesar disso baixem os índices de qualidade do produto final.

A caracterização da superfície de contacto das ferramentas por microscopia electrónica de varrimento teve como objectivo principal evidenciar o aspecto morfológico da zona desgastada e tirar conclusões acerca da sua constituição química através da recolha de espectros EDS. Conforme se pode observar pela Fig. 10, a superfície de contacto da garra deslizante sem revestimento apresenta uma marca de desgaste bem mais extensa e profunda (Fig. 10(a)) do que a superfície de contacto da garra deslizante com revestimento (Fig. 10(b)).

Estas superfícies de contacto quando observadas em maior ampliação (Fig. 11) revelam a existência de cavidades profundas correspondentes à remoção de quantidades apreciáveis de material no caso da ferramenta sem revestimento (Fig. 11(a)), enquanto que no caso da ferramenta revestida se observam apenas pequenas marcas isoladas de remoção de material (Fig. 11(b)).

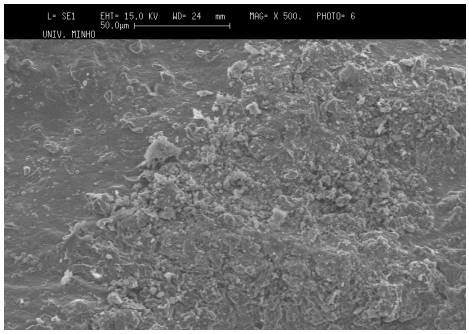



(a)

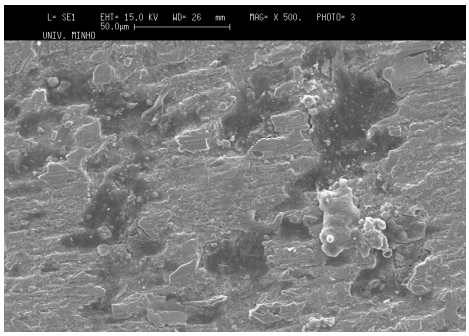



(b)

**Fig. 10.** Aspecto geral da superfície de desgaste no final do período de trabalho das garras deslizantes (30×): (a) sem revestimento; (b) com revestimento.




(a)




(b)

**Fig. 11.** Pormenor da superfície de desgaste no final do período de trabalho das garras deslizantes (500×): (a) sem revestimento; (b) com revestimento.

Por análise química EDS as superfícies de contacto das ferramentas revelaram alguma contaminação por carbono e alumínio, constituintes que se constatou serem provenientes exclusivamente do isolamento dos condutores. Com efeito, o espectro EDS recolhido sobre o material do isolamento dos condutores comprovou não só sua natureza polimérica (polipropileno), mas também a presença de cargas à base de alumínio (Fig. 12).

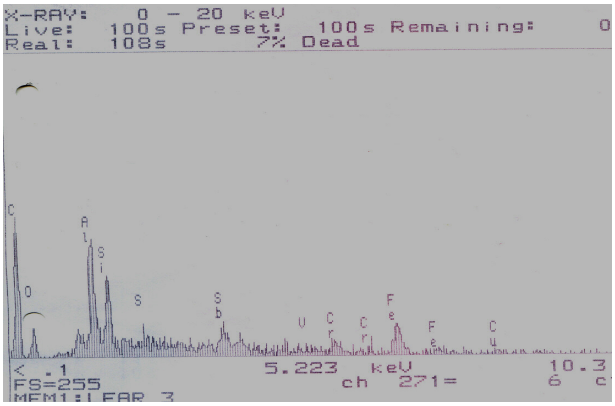



**Fig. 12.** Espectro EDS do material do isolamento dos condutores.

## 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliada a influência da aplicação de um tratamento térmico de têmpera e de um revestimento metálico PVD-TiNAl no comportamento ao desgaste de ferramentas em aço utilizadas na soldadura por ultra-sons na produção de cablagens eléctricas para automóveis. O tratamento térmico mais adequado ao bom desempenho das ferramentas verificou-se ser uma têmpera seguida de revenido com arrefecimento em óleo. Comparativamente com a ferramenta sem tratamento térmico nem revestimento, ambos os processos (tratamento térmicos e revestimento) se caracterizaram por uma melhoria muito significativa da resistência ao desgaste. Porém, o desempenho da ferramenta com revestimento metálico PVD-TiNAl superou a ferramenta tratada termicamente, tanto a nível de resistência ao desgaste e qualidade superficial das juntas produzidas como em termos do custo da ferramenta.

A aplicação do revestimento metálico PVD-TiNAl às garras deslizantes garante resultados excelentes, pois além de diminuir drasticamente a taxa de desgaste e de preservar a rugosidade superficial inicial, é compatível com a reutilização das ferramentas por rectificação seguida de nova deposição do revestimento. Assim, as ferramentas com revestimento metálico PVD-TiNAl revelaram-se disponíveis para um máximo de tempo de operação, minimizaram o custo global provocado pela manutenção dos equipamentos e garantiram um nível reduzido de defeitos de produção.

**AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem às instituições Lear Corporation-Póvoa de Lanhoso e Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Mecânica as facilidades concedidas para a realização deste trabalho.

**REFERÊNCIAS**

[1] http://www.schunk-ultraschall.com/
[2] P.T. Houldcroft, Welding process technology, Cambridge University Press (1977).
[3] Pinto Soares, Aços características e tratamentos, Porto Editora, 4ª Edição (1992).
[4] Júnior F.R. Adonias, Obtenção de revestimentos duplex por nitretação plasma, Tese de Doutoramento, USP, São Paulo, Brasil (2003).
[5] http://www.brasimet.com .br
[6] http://www.amtechultrasonic.com