

**Universidade do Minho**  
Escola de Ciências

# RELATÓRIO TÉCNICO

## ANÁLISE DE CHAPAS REVESTIDAS

Joaquim Carneiro

### Cliente



AMT COATINGS – *Engenharia e Tratamento de Superfícies, Lda.*  
CACE-Ruas das Novas Empresas, Fontiscos  
PT-4780-511 Santo Tirso – PORTUGAL

Junho de 2008

## Índice

<b>CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA .....</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>2. CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO DE TRACÇÃO .....</b>	<b>3</b>
2.1. ANÁLISE DA CURVA TENSÃO NOMINAL – EXTENSÃO NOMINAL .....	4
2.2. DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E DUCTILIDADE.....	5
<b>3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS (<i>CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA</i>) .....</b>	<b>6</b>
<b>4. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E MICROESTRUTURAL .....</b>	<b>7</b>
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>13</b>

# RELATÓRIO TÉCNICO

## ANÁLISE DE CHAPAS REVESTIDAS

Este relatório técnico refere-se ao estudo do desempenho de duas chapas metálicas, revestidas por diferentes processos/materiais. De acordo com a informação fornecida pelo cliente, as chapas apresentaram diferentes comportamentos quando sujeitas ao processo de conformação, previamente executado pelo cliente. O cliente observou que o revestimento de uma das chapas descolava, enquanto que na outra mantinha perfeita aderência.

O objectivo deste relatório consiste em fornecer notas explicativas referentes ao diferente tipo de comportamento que foi observado pelo cliente. Neste sentido, o estudo efectuado consistiu na caracterização mecânica e morfológica de algumas amostras extraídas a partir das chapas de maior dimensão.

## CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

### 1. INTRODUÇÃO

A principal finalidade de qualquer ensaio mecânico efectuado sobre um material consiste na obtenção de algumas propriedades sobre o seu comportamento mecânico. Esses dados são importantes, sob o ponto de vista do projecto, pois a partir dos resultados obtidos pode-se avaliar as características de resistência e ductilidade dos materiais que entram nas equações de dimensionamento para fixação de tensões e deformações admissíveis. Para além disso, os ensaios mecânicos servem também para comparar de modo qualitativo e quantitativo o comportamento dos materiais, permitindo efectuar a sua selecção para uma determinada aplicação. Acresce ainda referir que os ensaios mecânicos servem ainda para realizar estudos de natureza metalúrgica, na medida em que é possível indagar a influência de variáveis metalúrgicas (tais como a microestrutura, tamanho de grão, tratamento térmico, etc.) nas propriedades mecânicas.

### 2. CARACTERIZAÇÃO DO ENSAIO DE TRACÇÃO

Num ensaio de tracção sujeita-se um provete do material a uma força continuamente crescente até eventualmente se observar a ruptura. A força aplicada é uniaxial e realiza-se uma observação e registo simultâneo do alongamento sofrido pelo provete. Estes provetes apresentam normalmente uma secção transversal rectangular ou circular e são ensaiados em máquinas que dispõem de dispositivos fixação apropriados que não devem permitir qualquer escorregamento do provete.

## 2.1. Análise da curva tensão nominal – extensão nominal

Esta curva é construída a partir de medições simultâneas de força e deslocamento do comprimento de deformação do provete, obtidas continuamente durante o ensaio. A figura 1 apresenta uma curva típica para um material dúctil, sem ponto de cedência nítido.

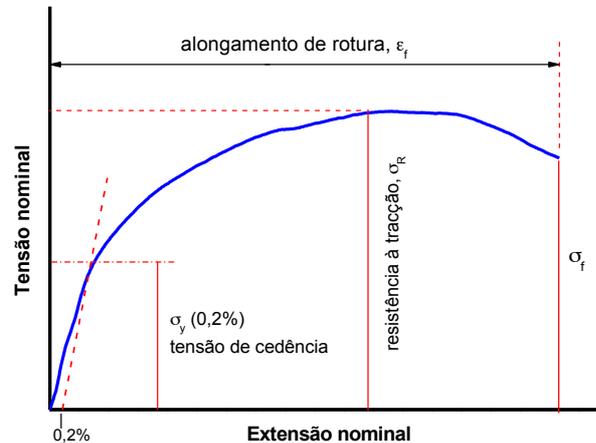


Fig.1 Curva tensão nominal – extensão nominal, obtida num ensaio de tracção dum material dúctil

A tensão nominal é a tensão média no provete de tracção que se obtém dividindo a força pela área inicial da secção transversal do provete. Designando a tensão nominal por  $\sigma$ , vem

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

em que  $F$  é a força e  $A_0$  a área inicial da secção transversal. A *extensão*  $\epsilon$  utilizada na curva tensão nominal – extensão nominal é a extensão linear média que se obtém dividindo o aumento de comprimento  $\Delta L$  pelo comprimento de deformação,  $L_0$ . Assim

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2)$$

em que  $L$  é o comprimento instantâneo. A forma e os resultados numéricos da curva tensão nominal – extensão nominal dependem da composição, tratamento térmico e velocidade de deformação impostos durante o ensaio. Os parâmetros que descrevem a curva tensão – extensão são a *resistência à tracção* ( $\sigma_R$ ), *tensão de cedência* ( $\sigma_y$ ) e *alongamento de rotura* ( $\epsilon_f$ ). Os primeiros dois parâmetros são de *resistência*, enquanto que o último é um parâmetro de *ductilidade*, conforme identificados na figura 1.

## 2.2. Definição de parâmetros de resistência e ductilidade

i) A *resistência à tracção* é calculada através do quociente entre a força máxima obtida no ensaio e a área inicial da secção transversal do provete.

$$\sigma_R = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_0} \quad (3)$$

A resistência à tracção (Fig. 1) é o valor mais utilizado a partir dos resultados obtidos no ensaio de tracção.

ii) O início da deformação plástica pode ser caracterizado por vários parâmetros. Entre eles, a *tensão de cedência* (Fig. 1) representa a tensão necessária para produzir uma extensão plástica de 0,2%. Por definição, esta tensão obtém-se a partir da intersecção da curva tensão – extensão com a linha recta paralela à região elástica da curva e desviada de um valor de 0,2%. Assim, vem

$$\sigma_y = \frac{F_{0,2}}{A_0} \quad (4)$$

Em que  $F_{0,2}$  é a força que provoca uma extensão permanente de 0,2% no provete.

iii) As medidas de ductilidade têm interesse em vários aspectos porque podem indicar o grau de deformabilidade de um material até à fractura. A ductilidade pode ser caracterizada pelo designado *alongamento de rotura*

$$\varepsilon_f = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (5)$$

iv) A *resiliência* pode ser definida como a aptidão que um material tem em absorver energia quando elasticamente deformado e, em seguida, devolver essa energia quando descarregado. O *módulo de resiliência* pode ser definido como sendo a energia de deformação /unidade de volume necessária para solicitar o material de uma tensão nula até à tensão de cedência. Assim, o módulo de resiliência  $U_r$  será

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y \quad (6)$$

em que  $\varepsilon_y$ , é a extensão de cedência. Refira-se que um material com módulo de resiliência elevado é um material ideal para resistir a choques ou cargas de impacto.

v) A *tenacidade* de um material define a aptidão do material para absorver energia no domínio plástico até à rotura. Esta característica é importante nos materiais utilizados em aplicações estruturais que apresentam maior resistência à fractura na presença de defeitos. Para materiais dúcteis, a tenacidade,  $U_T$ , é considerada como a área abaixo da curva ( $\sigma$ ,  $\epsilon$ ) e pode ser calculada utilizando a seguinte aproximação

$$U_T = \frac{\sigma_R + \sigma_y}{2} \epsilon_f \quad (7)$$

que corresponde a um rectângulo de comprimento  $\epsilon_f$  e altura igual à média entre a tensão de cedência e a resistência à tracção.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS (*caracterização mecânica*)

Neste estudo, a caracterização mecânica foi obtida através da realização de um ensaio de tracção sobre provetes prismáticos que foram cortados (a partir das chapas originais) com dimensões aproximadas (0.5×10×35) mm de modo a poderem ser acomodados numa máquina de ensaio. O ensaio de tracção é largamente utilizado na indústria, não só para a obtenção de dados básicos sobre os materiais para utilização no projecto, mas também como teste de aceitação e controlo de qualidade na especificação dos materiais.

As figuras 2 (a) e (b) mostram respectivamente uma representação esquemática do provete e uma ilustração máquina de tracção que foi utilizada no traccionamento dos provetes. Sobre a máquina de tracção foi também acoplado um microscópio óptico, dotado de uma câmara CCD afim de se poder observar e monitorar eventuais alterações do estado da superfície dos provetes (revestidos), resultante da carga aplicada.

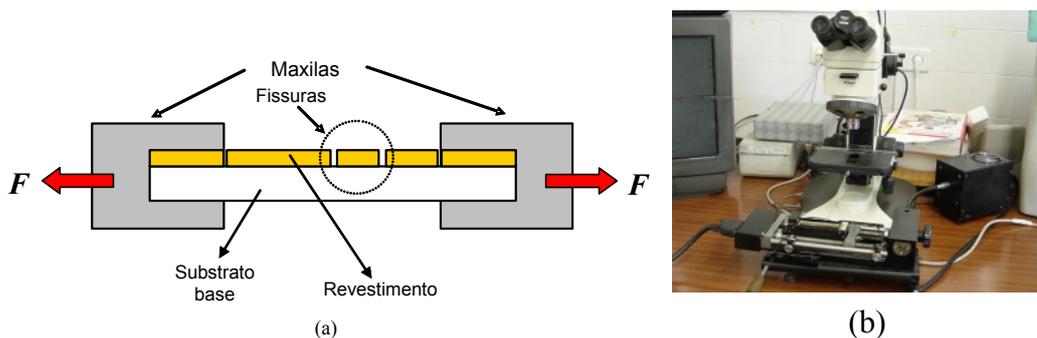


Fig.2 (a) Provette sobre carga axial tractiva, (b) Máquina de ensaio de tracção

De acordo com a informação transmitida pelo cliente (referente ao desempenho do material quando submetido ao processo de conformação por si executado) os provetes foram inicialmente designados por **Fail** (o que apresentava descolamento do revestimento) e **Bom** (aquele em que o revestimento mantinha adesão).

Para ambos os provetes foi utilizada a mesma velocidade de deformação de 0,05 mm/min. A figura 3 apresenta a sobreposição das curvas tensão nominal – extensão nominal referente aos dois provetes ensaiados.

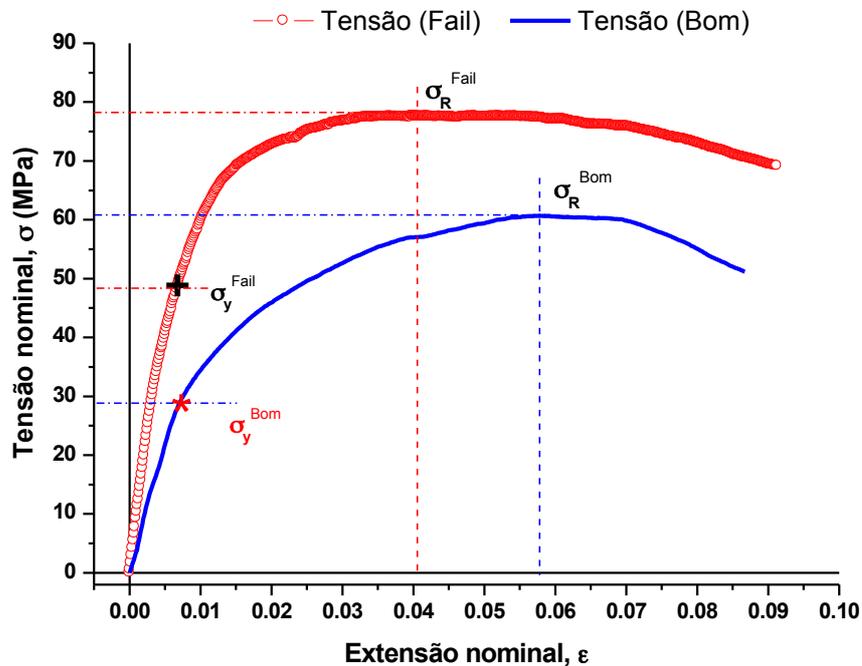


Fig.3 Curva tensão nominal – extensão nominal, obtida nos ensaios de tracção referentes aos provetes em estudo

A tabela 1 apresenta, para cada provete, os valores numéricos dos vários parâmetros que podem ser extraídos a partir das curvas tensão nominal – extensão nominal (Fig. 3) e calculados de acordo com as equações apresentadas na secção 2.2 deste relatório.

Tabela 1 – parâmetros de resistência e ductilidade dos provetes ensaiados

Proвете	$\sigma_R$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\epsilon_f$ (%)	$U_r$ (MPa)	$U_T$ (MPa)
<i>Bom</i>	60,7	27,8	0,66	8,64	0,092	3,82
<i>Fail</i>	77,6	48,3	0,67	9,13	0,162	5,75

--	--	--	--	--	--	--

#### 4. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E MICROESTRUTURAL

A caracterização morfológica destas amostras foi efectuada através da análise por microscopia electrónica de varrimento. Nas figuras 4 e 5 mostram-se algumas imagens da superfície do revestimento.

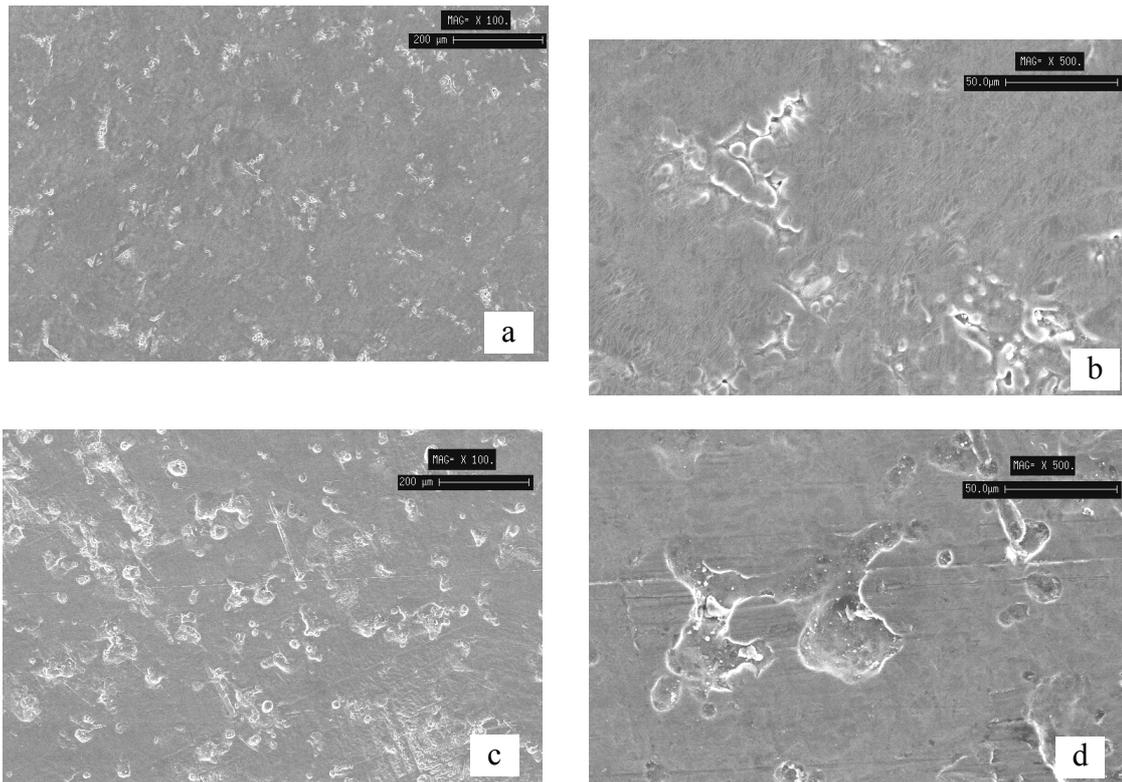


Fig.4 Imagens da superfície das amostras obtidas por microscopia electrónica de varrimento; a e b – superfície da amostra “*Bom*” a uma ampliação de 100x e 500x respectivamente; c e d – superfície da amostra “*Fail*” a uma ampliação de 100x e 500x respectivamente.

As imagens da figura 4 (a) e (b) mostram o estado da superfície da amostra “*Bom*” onde se pode observar que esta apresenta uma superfície lisa com alguns micro - defeitos e microporos superficiais. Por outro lado, as imagens da figura 4 (c) e (d) referem-se à superfície da amostra “*Fail*”, que apresenta uma superfície mais rugosa e com maior densidade de micro - defeitos e porosidade superficial. Também se pode observar que os micro - defeitos e porosidade superficial da amostra “*Fail*” têm uma dimensão superior.

Afim de se avaliar o comportamento destes revestimentos quando os provetes analisados (cortados a partir das chapas fornecidas pelo cliente) são sujeitos a deformação mecânica, tendo em conta a avaliação da adesão do revestimento ao substrato, efectuou-se um ensaio segundo a norma ASTM B571 onde as amostras foram observadas na zona exterior de dobragem. Esta região está ilustrada na figura 5.

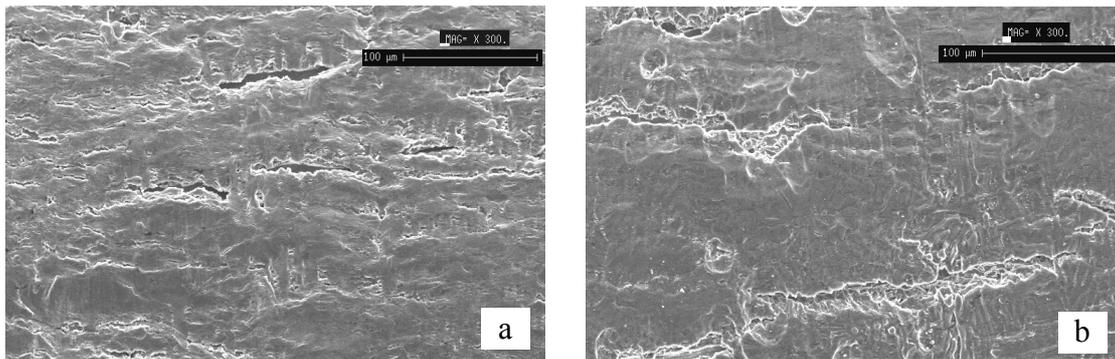
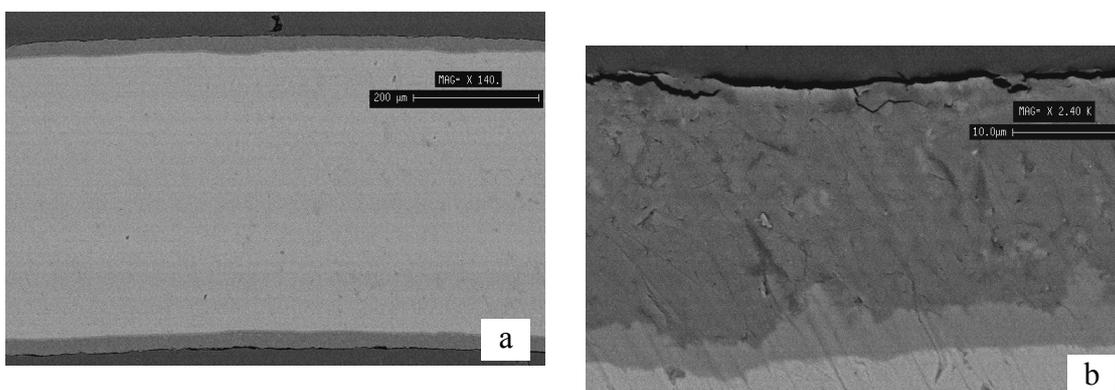


Fig.5 Imagens da zona de dobragem das amostras obtidas por microscopia electrónica de varrimento; a superfície da amostra “**Bom**” a uma ampliação de 300x; b – superfície da amostra “**Fail**” a uma ampliação de 300x.

Da análise da figura 5 verifica-se que ambas as amostras apresentam fissuras no revestimento na zona da dobragem. A amostra “**Fail**” apresenta fissuras mais pronunciadas e mais extensas o que indica ser um revestimento mais frágil do que o da amostra “**Bom**”, o que está de acordo com a informação que foi fornecida pelo cliente. Contudo não se detectou em nenhuma das amostras o desprendimento, por falha de aderência do revestimento com este tipo de ensaio tão agressivo.

Ambas as amostras foram também observadas em corte de modo a medir não só a espessura do revestimento, mas também verificar a existência de defeitos na interface. A figura 6 apresenta imagens de electrões retrodifundidos da secção dos revestimentos, onde as figuras 6 (a) e (b) correspondem à secção da amostra “**Bom**” e as figuras 6 (c) e (d) da amostra “**Fail**”. Pode-se observar que ambas as amostras apresentam a mesma espessura total de revestimento em cada lado da chapa e que é igual a aproximadamente 25 µm. Verifica-se ainda que existe uma fina camada de material de composição diferente com cerca de 3 µm de espessura entre a chapa de aço e o revestimento exterior. Tal facto, é aliás sustentado através da microanálise de raios X (conforme apresentado mais adiante) onde é observado que nesta região eventualmente ocorreu difusão do ferro da chapa base para o revestimento de alumínio. Relativamente à interface, verifica-se que apresenta boa qualidade na medida em que não ocorrem defeitos que possam possibilitar a perda de adesão.



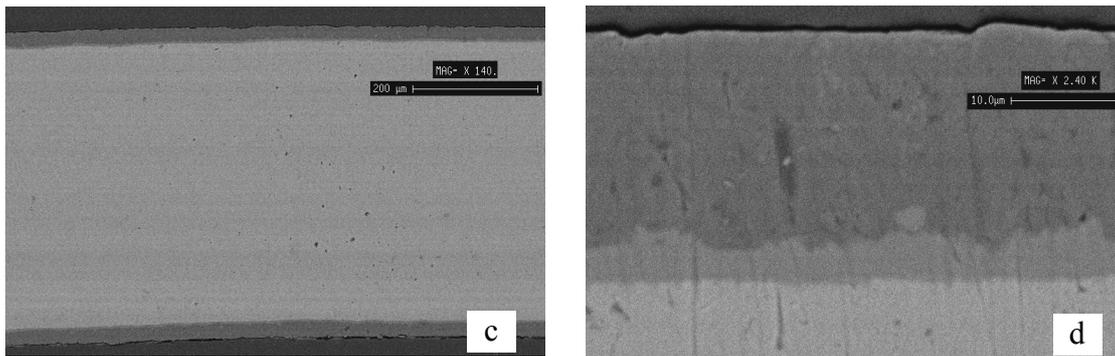
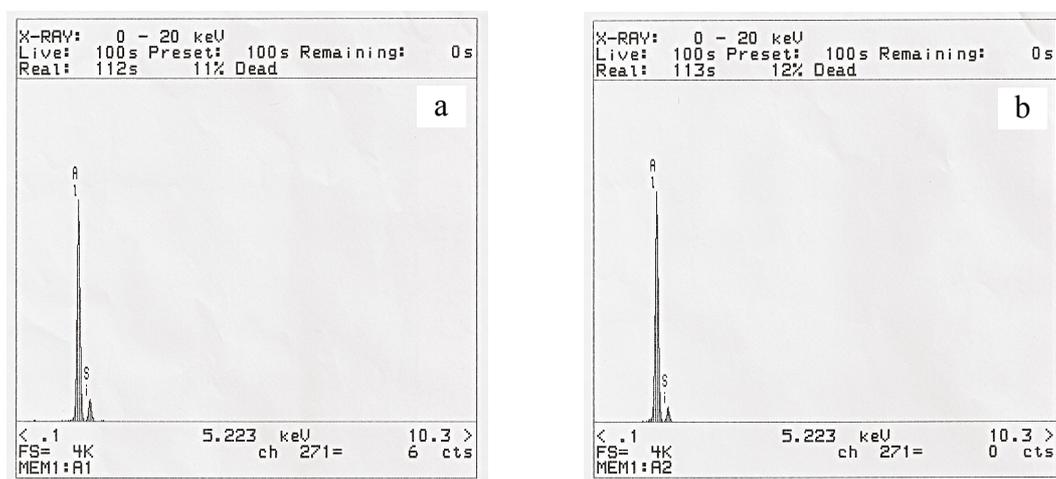


Fig.6 Imagens da secção das amostras obtidas por microscopia electrónica de varrimento onde se mostra a espessura do revestimento e a qualidade da interface; a e b – secção da amostra “*Bom*”; c e d – secção da amostra “*Fail*”.

Afim de se avaliar qualitativamente qual o tipo de material que compõem os revestimentos dos provetes estudados, estes foram analisados por microanálise de raios-X. Nesse sentido, foram adquiridos espectros que se apresentam na figura 7.

Como se pode observar pelos espectros adquiridos os revestimentos destas amostras são compostos por alumínio (Al) e silício (Si), isto é, um revestimento de alumínio com uma pequena percentagem de silício. Da observação das intensidades dos espectros, e tendo em conta que foram adquiridos nas mesmas condições, pode-se afirmar que a composição química dos revestimentos referentes às amostras “*Bom*” e “*Fail*” é muito semelhante conforme evidenciado pela intensidade dos “picos” dos espectros obtidos. Verifica-se ainda que a camada de material entre o revestimento e as chapas de aço do material base, para além do alumínio e do silício também contém na sua composição o elemento ferro (Fe). A presença do ferro nesta zona indica que poderá ter ocorrido difusão deste elemento, a partir do substrato de aço para o revestimento de alumínio-silício durante o processo de revestimento, ou durante um possível tratamento térmico posterior ao qual a chapa tenha sido submetida.

Refira-se ainda que, a diferença da tensão de rotura observada nos ensaios de tracção, aparentemente não encontra uma justificação directa entre os resultados referentes à composição química e a espessura dos revestimentos.



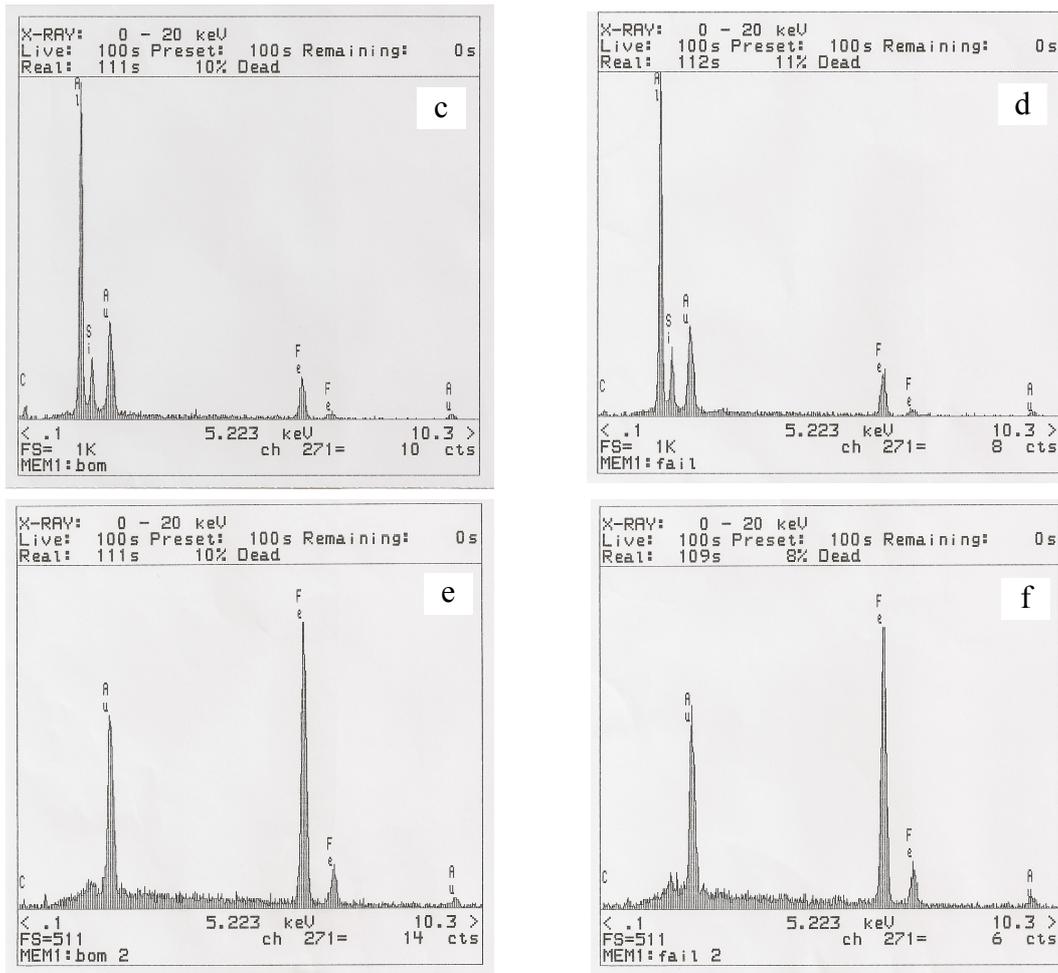


Fig.7 Espectros de microanálise de raios X de várias zonas das amostras onde se mostram os elementos químicos presentes na sua composição química: (a) e (b) espectros adquiridos na superfície dos revestimentos das amostras “*Bom*” e “*Fail*” respectivamente; (c) e (d) espectros adquiridos na camada intermédia onde se verificou a possível difusão do ferro para o revestimento das amostras “*Bom*” e “*Fail*” respectivamente; (e) e (f) espectros adquiridos no material de base das chapas de aço das amostras “*Bom*” e “*Fail*” respectivamente.

De modo a se obter mais informação sobre o tipo de revestimento, suas propriedades físicas e tensões residuais, foram ainda adquiridos sobre os revestimentos espectros de difração de raios-X e que estão representados na figura 8.

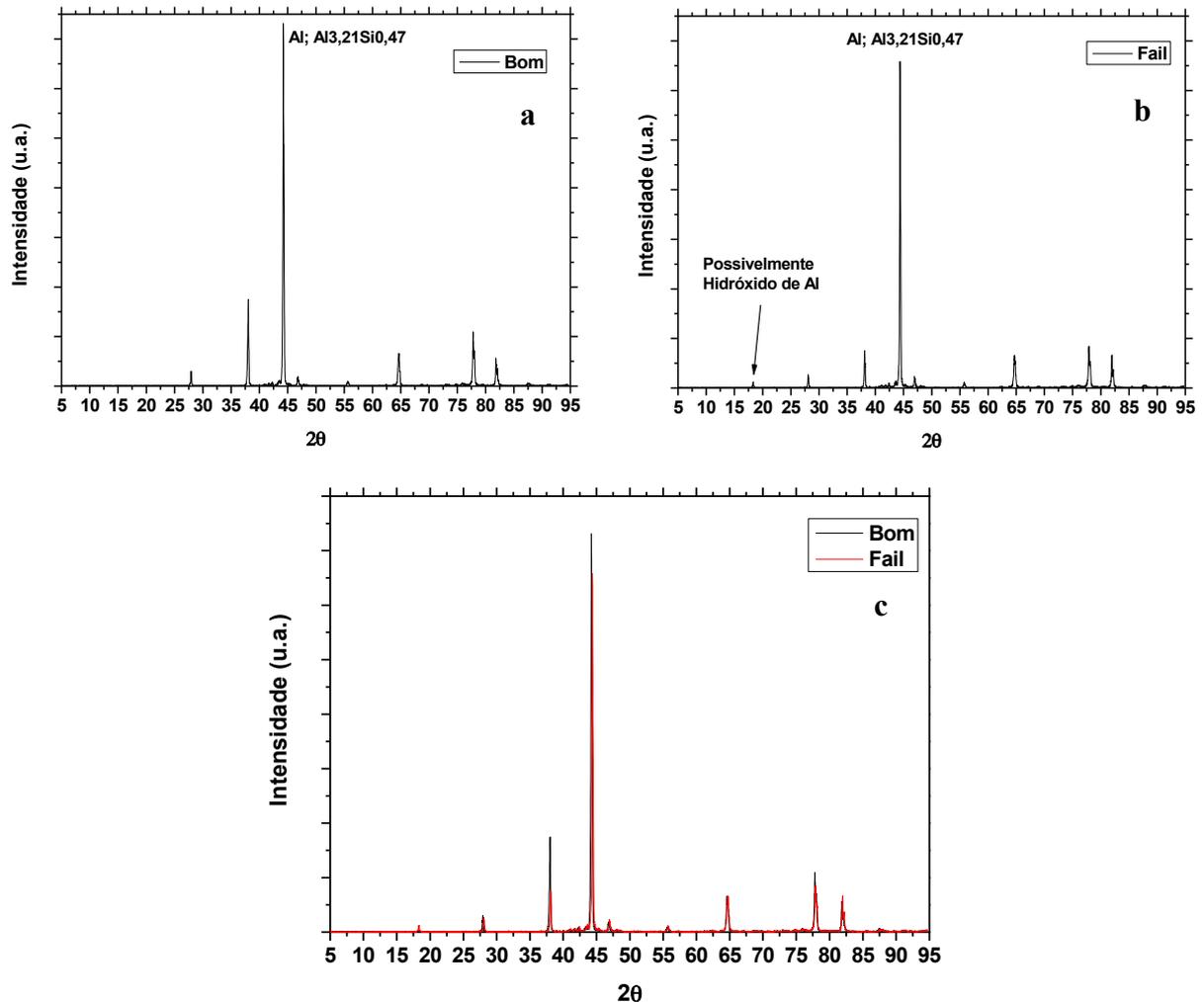


Fig.8 Espectros de difracção de raios X da microestrutura do revestimento das amostras: (a) e (b) espectros adquiridos sobre as amostras “*Bom*” e “*Fail*” respectivamente; (c) sobreposição dos dois espectros evidenciando que as estruturas dos dois revestimentos são semelhantes.

A figura 8-a é relativa à amostra “*Bom*” e a figura 8-b à amostra “*Fail*”. Como se pode observar, o principal pico de difracção refere-se ao alumínio e/ou uma liga de alumínio-silício. A única diferença notória entre estes dois espectros refere-se ao aparecimento na amostra “*Fail*”, de um pico de difracção correspondente a  $2\theta = 18,63^\circ$ , que possivelmente estará relacionado com a presença de hidróxido de alumínio no revestimento. A coincidência entre os espectros das duas amostras está representada na figura 8-c.

Da análise dos espectros obtidos e tendo em conta o posicionamento e intensidade dos principais picos difractados, estes dois revestimentos possivelmente têm tamanhos de grão, e tensões residuais muito próximos.

A título de exemplo, pode-se estimar simplificadamente as *tensões residuais* instaladas nos dois revestimentos. Considerando as distâncias interplanares do alumínio ( $d_0$ ) e as suas propriedades

elásticas (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson ( $E_{Al}$  e  $\nu_{Al}$ )), é possível recorrer-se à seguinte equação:

$$\sigma_r = (E_{Al} / \nu_{Al}) \times \frac{d - d_0}{d_0} \quad (8)$$

O cálculo dita que ambos os revestimentos se encontram num estado de tensão tractiva, embora a amostra “**Fail**” contemple uma tensão de tracção inferior à outra amostra (cerca de 800 MPa). Este resultado poderá contribuir para um aumento da tensão de rotura observada no ensaio de tracção. Por outro lado, a eventual presença no revestimento de hidróxido de alumínio poderá também contribuir para a sua fragilização, e deste modo, acelerar a falha durante a conformação dos componentes.

Refira-se ainda que o aumento da tensão de ruptura da amostra “**Fail**”, não será apenas devido a diferenças das propriedades dos revestimentos, mas possivelmente devido a diferenças das propriedades mecânicas do próprio aço das chapas base.

## CONCLUSÕES

- 1 – Da inspecção visual verifica-se que a amostra “**Fail**” apresenta uma textura menos lisa e com uma densidade e dimensão maior de pequenos microdefeitos e manchas esbranquiçadas à superfície.
- 2 – A caracterização mecânica das amostras revelou que a amostra “**Fail**” apresenta estranhamente uma tensão de ruptura superior em 27,8 % relativamente à amostra “**Bom**”. Em ambos os casos as curvas de tensão/deformação não apresentam o patamar de cedência característico dos aços. São curvas características de materiais dúcteis, que possivelmente estão influenciadas pela presença do revestimento de alumínio na chapa.
- 3 – A análise dos revestimentos por microscopia electrónica de varrimento, confirmou o que por inspecção visual se observava, isto é, a amostra “**Fail**” apresenta uma maior densidade e dimensão de microdefeitos superficiais, o que poderá originar a nucleação de fissuras durante o processo de conformação e por conseguinte acelerar a falha do revestimento.
- 4 – A análise da secção das amostras revelou que ambas têm a mesma espessura de revestimento (25  $\mu\text{m}$ ) com uma camada intermédia de 3  $\mu\text{m}$ , onde se verificou a presença de ferro; possivelmente devido à sua difusão para o interior do revestimento de alumínio. Nesta análise verifica-se que a interface chapa de aço/ revestimento é de boa qualidade.
- 5 – A análise por microanálise de raios X permitiu verificar que os revestimentos são compostos quimicamente por alumínio e uma pequena percentagem de silício. Também se verificou a presença de uma zona onde possivelmente o ferro se difundiu para o interior do revestimento durante o processo de aplicação do revestimento ou devido a tratamento térmico posterior.

6 – Da análise de difracção de raios X verifica-se que os dois revestimentos apresentam espectros de difracção muito semelhantes, indiciando uma forte possibilidade de que os revestimentos sejam equivalentes em termos estruturais. Contudo, na amostra “*Fail*” observou-se o aparecimento de um pico de difracção que eventualmente pode revelar a presença de hidróxido de alumínio, e que poderá contribuir para a sua fragilização.