



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) BR 112013029789-1 B1



(22) Data do Depósito: 16/05/2012

(45) Data de Concessão: 22/10/2019

(54) Título: PRODUTO TRABALHADO FEITO DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO, PROCESSO PARA SUA FABRICAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO MESMO

(51) Int.Cl.: C22C 21/06; C22F 1/047.

(30) Prioridade Unionista: 20/05/2011 FR 11/01555; 20/05/2011 US 61/488,196.

(73) Titular(es): CONSTELLIUM ISSOIRE.

(72) Inventor(es): FRANK EBERL; BERNARD BES.

(86) Pedido PCT: PCT FR2012000198 de 16/05/2012

(87) Publicação PCT: WO 2012/160272 de 29/11/2012

(85) Data do Início da Fase Nacional: 19/11/2013

(57) Resumo: PRODUTO TRABALHADO FEITO DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO, PROCESSO PARA SUA FABRICAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO MESMO A presente invenção refere-se a um produto trabalhado em liga de alumínio de composição, em % em peso, Mg: 4,0 5,0; Li: 1,0 1,6; Zr: 0,05 0,15; Ti: 0,01 0,15; Fe: 0,02 0,2; Si: 0,02 0,2; Mn: menor igual 0,5; Cr: menor igual 0,5; Ag: menor igual 0,5; Cu: menor igual 0,5; Zn: menor igual 0,5; Se: 0,01; outros elementos 0,05; o restante sendo alumínio; e seu processo de fabricação, compreendendo sucessivamente a elaboração de um banho de metal líquido, de forma a se obter uma liga de alumínio de composição, de acordo com a invenção, a fundição dessa liga sob a forma bruta, opcionalmente a homogeneização do produto assim fundido, a deformação a quente e opcionalmente a frio, opcionalmente um tratamento térmico a uma temperatura compreendida entre 300 e 420°C em um ou vários estágios, a colocação em solução do produto assim deformado, e o resfriamento rápido, opcionalmente a deformação a frio do produto assim colocado em solução e submetido a resfriamento rápido, o revenimento a uma temperatura inferior a 150°C. Os produtos, de acordo com a invenção, tem uma tenacidade melhorada e são úteis para a fabricação de elementos estrutural de aeronave, preferencialmente uma pele de fuselagem, um quadro de fuselagem ou (...).

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"PRODUTO TRABALHADO FEITO DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO, PROCESSO PARA SUA FABRICAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO MESMO"**.

Campo da Invenção

[001] A presente invenção refere-se aos produtos em ligas de alumínio-magnésio-lítio, mais particularmente, a esses produtos, aos respectivos processos de fabricação e de utilização, destinados, em particular, à construção aeronáutica e aeroespacial.

Estado da Técnica

[002] Produtos laminados em liga de alumínio são desenvolvidos para produzir peças de elevada resistência destinadas notadamente à indústria aeronáutica e à indústria aeroespacial.

[003] As ligas de alumínio contendo lítio são muito interessantes em relação a isso, pois o lítio pode reduzir a densidade do alumínio de 3% e aumentar o módulo de elasticidade de 6% para cada por cento em peso de lítio acrescentado. Para que essas ligas sejam selecionadas nos aviões, seu desempenho em relação às propriedades de utilização deve atingir aquelas das ligas comumente utilizadas, em particular, em termo de compromisso entre as propriedades de resistência mecânica estática (limite de elasticidade à tração e à compressão, resistência à ruptura) e as propriedades de tolerância aos danos (tenacidade, resistência à propagação das fissuras em fadiga), essas propriedades sendo, em geral, antinômicas.

[004] Essas ligas devem também apresentar uma resistência à corrosão suficiente, poder ser enformadas segundo os processos habituais e apresentar pequenas dificuldades residuais, de forma a poderem ser usinados de forma integral.

[005] As ligas de alumínio contendo simultaneamente magnésio e lítio permitem atingir densidades particularmente baixas e, portanto, extensivamente estudadas.

[006] A patente GB 1,172,736 ensina uma liga contendo 4 a 7% em peso Mg, 1,5 – 2,6% Li, 0,2 – 1% Mn e/ou 0,05 – 0,3% Zr, o restante sendo alumínio, útil para utilizações que necessitam de uma resistência mecânica elevada, uma boa resistência à corrosão, uma baixa densidade e um módulo de elasticidade elevada.

[007] O pedido internacional WO 92/03583 descreve uma liga útil para as estruturas aeronáuticas tendo uma baixa densidade de fórmula geral $Mg_aLi_bZn_cAg_dAl_{bal}$, no qual a está compreendido entre 0,5 e 10%, b está compreendido entre 0,5 e 3%, c está compreendido entre 0,1 e 5%, d está compreendido entre 0,1 e 2% e bal indica que o resto é o alumínio.

[008] A patente US 5.431.876 ensina um grupo de ligas ternário de alumínio lítio e magnésio ou cobre, incluindo pelo menos um aditivo, tal como o zircônio, o cromo e/ou o manganês.

[009] A patente US 6.551.424 descreve um processo de fabricação de produtos em liga alumínio-magnésio-lítio de composição (em % em peso) Mg: 3,0 – 6,0, Li: 0,4 – 3,0, Zn até 2,0, Mn até 1,0, Ag até 0,5, Fe até 0,3, Si até 0,3, Cu até 0,3, 0,02 – 0,5 de um elemento selecionado no grupo que consiste em Sc, Hf, Ti, V, Nd, Zr, Cr, Y, Be, incluindo uma laminação a frio no sentido do comprimento e no sentido da largura.

[0010] A patente US 6,461,566 descreve uma liga de composição (em % em peso) Li: 1,5 – 1,9, Mg: 4,1 – 6,0, Zn: 0,01 – 0,8 H, $0,9 \cdot 10^{-5}$ – $4,5 \cdot 10^{-5}$ e pelo menos um elemento selecionado no grupo Be 0,001 – 0,2, Y 0,001 – 0,5 e Sc 0,01 – 0,3.

[0011] A patente RU 2171308 descreve uma liga que compreende (em % em peso) Li: 1,5 – 3,0, Mg: 4,5 – 7,0, Fe 0,01 – 0,15, Na: 0,001 – 0,0015, H, $1,7 \cdot 10^{-5}$ – $4,5 \cdot 10^{-5}$ e pelo menos um elemento selecionado no grupo Zr 0,05 – 0,15, Be 0,005 – 0,1, e Sc 0,05 – 0,4 e pelo menos um elemento selecionado no grupo Mn 0,005 – 0,3, Cr 0,005 – 0,2, e Ti 0,005 – 0,2, permanece alumínio.

[0012] A patente RU2163938 descreve uma liga contendo (em % em peso) Mg: 2,0 – 5,8, Li: 1,3 – 2,3, Cu: 0,01 – 0,3, Mn: 0,03 – 0,5, Be: 0,0001 – 0,3, pelo menos um elemento dentre Zr e Sc: 0,02 – 0,25 e pelo menos um elemento dentre Ca e Ba: 0,002 – 0,1, permanece alumínio.

[0013] O pedido de patente DE 1 558 491 descreve notadamente uma liga contendo (em % em peso) Mg: 4 – 7, Li: 1,5 – 2,6, Mn: 0,2 – 1,0, Zr: 0,05 – 0,3 e/ou Ti 0,005 – 0,15 ou Cr 0,05 – 0,3.

[0014] Essas ligas não resolveram determinados problemas e, em particular, seu desempenho em termos de tolerância aos danos não permitiu sua utilização significativa na aviação comercial. Deve ser anotado também que a fabricação de produtos trabalhados a partir dessas ligas permaneceu difícil e que a taxa de refugo é muito elevada.

[0015] Existe uma necessidade para produtos trabalhados em liga alumínio-magnésio-lítio que apresenta propriedades melhoradas em relação àquelas dos produtos conhecidos, em particular, em termos de compromisso entre as propriedades de resistência mecânica estática e as propriedades de tolerância aos danos, em particular, a tenacidade, de resistência à corrosão, tendo uma baixa densidade.

[0016] Além disso, existe uma necessidade para um processo de produção desses produtos confiável e econômico.

Objeto da Invenção

[0017] Um primeiro objeto da invenção é um produto trabalhado em liga de alumínio de composição, em % em peso;

Mg: 4,0 – 5,0;

Li: 1,0 – 1,6;

Zr: 0,05 – 0,15;

Ti: 0,01 – 0,15;

Fe: 0,02 – 0,2;

Si: 0,02 – 0,2;

Mn: $\leq 0,5$;
Cr: $\leq 0,5$;
Ag: $\leq 0,5$;
Cu: $\leq 0,5$;
Zn: $\leq 0,5$;
Sc: $< 0,01$;
outros elementos $< 0,05$;
o restante sendo alumínio.

[0018] Um outro objeto da invenção é um processo de fabricação de um produto trabalhado, de acordo com a invenção, compreendendo sucessivamente:

- a elaboração de um banho de metal líquido, de forma a se obter uma liga de alumínio tendo a composição de acordo com a invenção;

- a fundição dessa liga sob a forma bruta;
- opcionalmente, a homogeneização do produto assim fundido;

- a deformação a quente e, opcionalmente, a frio;
- opcionalmente, um tratamento térmico a uma temperatura compreendida entre 300 e 420°C em um ou vários estágios;

- a colocação em solução do produto assim deformado e o resfriamento rápido;

- opcionalmente, a deformação a frio do produto assim colocado em solução e submetido a resfriamento rápido;

- o revenimento a uma temperatura inferior a 150°C.

[0019] Ainda um outro objetivo da invenção é a utilização de um produto da invenção para fabricar elementos de estrutura de aeronave.

Descrição das Figuras

Figura 1: Curva R no sentido L-T (amostra CCT760).

Figura 2: Curva R no sentido T-L (amostra CCT760).

Figura 3: Tenacidade K_{app} (L-T) em função do limite de elasticidade $R_{p0,2}$ (L) para as ligas A, C e D.

Descrição da Invenção

[0020] Salvo menção contrária, todas as indicações referentes à composição química das ligas são expressas como a percentagem em peso baseada no peso total da liga. A expressão 1,4 Cu significa que o teor em cobre expresso em % em peso é multiplicado por 1,4. A designação das ligas se faz em conformidade com os regulamentos de The Aluminium Association, conhecidos do técnico. A densidade depende da composição e é determinada por cálculo mais do que por um método de medida de peso. Os valores são calculados em conformidade com o procedimento de The Aluminium Association, que é descrita nas páginas 2-12 e 2-13 de "Aluminium Standards and Data". As definições dos estados metalúrgicos são indicadas na norma europeia EN 515.

[0021] As características mecânicas estáticas em tração, em outros termos, a resistência à ruptura R_m , o limite de elasticidade convencional a 0,2% de alongamento $R_{p0,2}$ e o alongamento à ruptura $A\%$, são determinados por um teste de tração, segundo a norma NF EN ISO 6892-1, a coleta e o sentido do teste sendo definidos pela norma EN 485-1.

[0022] Uma curva que dá o fator de intensidade de esforço efetivo em função da extensão de fissura efetiva, conhecida como a curva R, é determinada segundo a norma ASTM E 561. O fator de intensidade de esforço crítico K_C , em outros termos o fator de intensidade que torna a fissura instável, é calculado a partir da curva R. O fator de intensidade de esforço K_{CO} é também calculado, atribuindo o comprimento de fissura inicial ao começo de carga monótono, à carga crítica. Esses dois valores são calculados para uma amostra da forma requerida. K_{app} representa o fator K_{CO} correspondente à amostra que foi utilizada para efetuar o teste de curva R. K_{Ceff} representa o fator K_C correspondente à amostra que foi utilizada para efetuar o teste de curva R. $\Delta a_{eff(max)}$ representa a

extensão da fissura do último ponto válido da curva R. O comprimento da curva R – a saber a extensão de fissura máxima da curva – é um parâmetro nele próprio importante, notadamente, para a concepção de fuselagem.

[0023] Salvo menção contrária, as definições da norma EN 12258 se aplicam.

[0024] Denomina-se no caso "elemento de estrutura" ou "elemento estrutural" de uma construção mecânica uma peça mecânica para a qual as propriedades mecânicas estáticas e/ou dinâmicas são particularmente importantes para o desempenho da estrutura, e para a qual um cálculo de estrutura é habitualmente prescrito ou realizado. Trata-se tipicamente de elementos, cuja falha é capaz de colocar em perigo a segurança dessa construção de seus usuários, ou de outros. Para um avião, esses elementos de estrutura compreendem notadamente os elementos que compõem a fuselagem (tais como pele de fuselagem, "fuselage skin", em inglês), os enrijecedores ou longarinas de fuselagem ("stringers"), as divisórias estanques ("bulkheads"), os quadros de fuselagem ("circumferential frames"), as asas (tais como o revestimento de velame extradorso ou intradorso ("upper or lower wing skin"), os enrijecedores ("stringers" ou "stiffeners"), as nervuras ("ribs") e longarinas ("spars") e a empenagem composta notadamente de estabilizadores horizontais e verticais ("horizontal or vertical stabilisers"), assim como os perfis de piso ("floor beams"), os trilhos de bancos ("seat tracks") e as portas.

[0025] Segundo a presente invenção, uma classe selecionada de ligas de alumínio que contêm quantidades específicas e críticas de magnésio, de lítio, de zircônio, de titânio, de ferro e de silício permite fabricar produtos trabalhados tendo um compromisso de propriedades melhorado, em particular, entre a resistência mecânica e a tolerância aos danos, apresentando um bom desempenho em corrosão.

[0026] O teor em magnésio dos produtos, de acordo com a invenção, está compreendido entre 4,0 e 5,0% em peso. Em uma realização vantajosa da invenção, o teor em magnésio é pelo menos de 4,3% em peso ou preferencialmente 4,4% em peso. Um teor máximo de 4,7% em peso ou vantajosamente de 4,6% em peso de magnésio é preferido.

[0027] O teor em lítio dos produtos, de acordo com a invenção, está compreendido entre 1,0 e 1,6% em peso. Os presentes inventores constataram que um teor em lítio limitado, em presença de determinados elementos de adição, permite melhorar muito significativamente a tenacidade e a velocidade de propagação das fissuras em fadiga, o que compensa amplamente o ligeiro aumento de densidade e a diminuição das propriedades mecânicas estáticas.

[0028] Em um modo de realização vantajoso, o teor máximo em lítio é de 1,5% em peso e, de preferência, 1,45% em peso, ou preferencialmente 1,4% em peso. Um teor mínimo em lítio de 1,1% em peso e, de preferência, de 1,2% em peso é vantajoso, notadamente, para melhorar a resistência à corrosão intergranular.

[0029] O teor em zircônio dos produtos, de acordo com a invenção, está compreendido entre 0,05 e 0,15% em peso e o teor em titânio está compreendido entre 0,01 e 0,15% em peso. A presença desses elementos associada às condições de transformação utilizadas permite, vantajosamente, manter uma estrutura granular substancialmente não recristalizada. Contrariamente a certos ensinamentos da técnica anterior, os presentes inventores constataram que não é necessário acrescentar escândio nessas ligas para se obter a estrutura granular substancialmente não-recristalizada desejada e que a adição de escândio podia mesmo se mostrar nefasta, tornando a liga particularmente frágil e difícil de laminar a frio até espessuras inferiores a 3 mm. O teor em escândio é, portanto, inferior a 0,01% em peso. Em um modo de realização da invenção, o teor em titânio está compreendido entre 0,01 e 0,05% em

peso. O manganês e/ou o cromo podem também ser acrescentados para contribuírem, notadamente, para o controle da estrutura granular, seu teor permanecendo no máximo de 0,5% em peso. Em um modo de realização vantajoso da invenção, que apresenta notadamente uma ductilidade a quente melhorada, a liga contém pelo menos um elemento dentre Mn e Cr com, para teor, em % em peso Mn: 0,05 – 0,5 ou 0,05 – 0,3 e Cr: 0,05 – 0,3, um elemento não escolhido dentre Mn e Cr tendo um teor inferior a 0,05% em peso. A melhoria da ductilidade a quente facilita notadamente a deformação a quente o que permite diminuir a taxa de refugo, quando da transformação.

[0030] O cobre e/ou a prata podem também ser acrescentados para melhorar os desempenhos dos produtos trabalhados, de acordo com a invenção, seu teor que resta no máximo de 0,5% em peso. Em um modo de realização vantajoso da invenção, a liga contém pelo menos um elemento dentre Ag e Cu com, para teor, se for escolhido, em % em peso, Cu: 0,05 – 0,3 e Ag: 0,05 – 0,3, um elemento não escolhido dentre Ag e Cu tendo um teor inferior a 0,05% em peso. Esses elementos podem contribuir notadamente para as propriedades mecânicas estáticas. Todavia, em um modo de realização vantajoso para melhorar a resistência à corrosão intergranular o teor em Ag e/ou o teor em Cu são inferiores a 0,05% em peso.

[0031] Os produtos trabalhados, de acordo com a invenção, contêm uma pequena quantidade de ferro e de silício, o teor desses elementos estando compreendido entre 0,02 e 0,2% em peso. Os presentes inventores pensam que a presença desses elementos pode contribuir, formando fases intermetálicas e/ou contribuindo para a formação dos dispersoides, notadamente, em presença de manganês, em melhorar as propriedades de tolerância aos danos, evitando a localização da deformação. Em um modo de realização da invenção, o teor em Fe e/ou o teor em Si são em % em peso Fe: 0,04 – 0,15; Si: 0,04 – 0,15. Em um

modo de realização da invenção, o teor em Fe e/ou o teor em Si é inferior a 0,15% em peso e, de preferência, inferior a 0,1% em peso.

[0032] O teor em Zn é no máximo de 0,5% em peso. Em um modo de realização vantajoso da invenção, o teor em Zn é inferior a 0,2% em peso e, de preferência, inferior a 0,05% em peso. A adição deliberada de Zn não é tipicamente desejável, pois esse elemento pode contribuir para degradar a ductilidade a quente, não fornecendo vantagens para a resistência à corrosão intergranular. Além disso, a adição de Zn contribui para aumentar a densidade da liga, o que não é mais frequentemente desejável. Os outros elementos têm um teor inferior a 0,05% em peso, cada um.

[0033] Determinados elementos podem ser prejudiciais para as ligas, de acordo com a invenção, em particular, por razões de transformação da liga, tais como a toxicidade e/ou as quebras, quando da deformação e é preferível limitá-los a um nível muito baixo, isto é, inferior a 0,05% em peso ou mesmo menos. Em um modo de realização vantajoso, os produtos, de acordo com a invenção, têm um teor máximo de 5 ppm de Be e, de preferência, de 2 ppm de Be e/ou um teor máximo de 10 ppm de Na e/ou um teor máximo de 20 ppm de Ca.

[0034] Os produtos trabalhados, de acordo com a invenção, são, preferencialmente, produtos fiados, tais como os perfilados, produtos laminados, tais como chapas ou chapas espessas e/ou produtos forjados.

[0035] O processo de fabricação dos produtos, de acordo com a invenção, compreende as etapas sucessivas de elaboração de um banho de metal líquido, de forma a se obter uma liga de alumínio de composição, de acordo com a invenção, a fundição dessa liga sob a forma bruta, opcionalmente a homogeneização do produto assim fundido, a deformação a quente e opcionalmente a frio, a colocação em solução do produto assim deformado, e resfriamento rápido, opcionalmente a deforma-

ção a frio do produto assim colocado em solução e submetido a resfriamento rápido, e o revenimento a uma temperatura inferior a 150°C.

[0036] Em uma primeira etapa, elabora-se um banho de metal líquido, de forma a se obter uma liga de alumínio de composição, de acordo com a invenção.

[0037] O banho de metal líquido é, em seguida, fundido sob a forma bruta, tipicamente, uma placa de laminação, uma esfera de fiação ou um esboço de forja.

[0038] A forma bruta é, em seguida, opcionalmente homogeneizada, de forma a atingir uma temperatura compreendida entre 450°C e 550°C e, de preferência, entre 480°C e 520°C por uma duração compreendida entre 5 e 60 horas. O tratamento de homogeneização pode ser realizado em um ou vários estágios. Todavia, os presentes inventores não constataram vantagem significativa fornecida pela homogeneização e em uma realização preferida da invenção, procede-se diretamente à deformação a quente na sequência de um simples aquecimento sem efetuar homogeneização.

[0039] A deformação a quente, tipicamente, por fiação, laminação e/ou forja, é efetuada, de preferência, com uma temperatura de entrada superior a 400°C e, de maneira vantajosa, superior a 430°C ou mesma 450°C.

[0040] No caso da fabricação de chapas por laminação, é necessário realizar uma etapa de laminação a frio para os produtos, cuja espessura é inferior a 3 mm. Pode mostrar-se útil realizar um ou vários tratamento(s) térmico(s) intermediário(s) antes ou no decorrer da laminação a frio. Esses tratamentos térmicos intermediários são tipicamente realizados a uma temperatura compreendida entre 300 e 420°C em um ou vários estágio(s).

[0041] Os presentes inventores constataram que, mesmo realizando esses tratamentos térmicos intermediários, não lhes tinha sido

possível laminar a frio de forma industrial em chapas em ligas de referência até uma espessura de 2 mm, enquanto que essa etapa se mostrou realizável com chapas em liga, de acordo com a invenção. As chapas, de acordo com a invenção, têm uma espessura preferida de pelo menos 0,5 mm e, de preferência, de pelo menos 0,8 mm ou 1 mm. Após deformação a quente e opcionalmente a frio, o produto é colocado em solução e submetido a resfriamento rápido. Antes da colocação em solução, é vantajoso realizar um tratamento térmico a uma temperatura compreendida entre 300 e 420°C em um ou vários estágios, de forma a melhorar o controle da estrutura granular substancialmente não recristalizada. A colocação em solução é feita, segundo a composição do produto, a uma temperatura compreendida entre 370 e 500°C. O resfriamento rápido é feito na água e/ou no ar. É vantajoso realizar o resfriamento rápido ao ar, pois as propriedades de corrosão intergranular são melhoradas.

[0042] O produto assim colocado em solução e submetido a resfriamento rápido pode opcionalmente ser de novo deformado a frio. Etapas de acabamento ou correção são tipicamente efetuadas nesse estado, mas é também considerável efetuar uma deformação mais impulsionada, de maneira a melhorar ainda as propriedades mecânicas.

[0043] O estado metalúrgico obtido para os produtos laminados é, vantajosamente, um estado T6 ou T6X ou T8 ou T8X e para os produtos fiados, vantajosamente, um estado T5 ou T5X no caso do resfriamento rápido sobre prensa ou um estado T6 ou T6X ou T8 ou T8X.

[0044] O produto sofre enfim um revenimento a uma temperatura inferior a 150°C. De maneira vantajosa, o revenimento é efetuado em três estágios, um primeiro estágio a uma temperatura compreendida entre 70 a 100°C, um segundo estágio a uma temperatura compreendida entre 100 e 140°C e um terceiro estágio a uma temperatura compreendida entre 90 a 110°C, a duração desses estágios sendo tipicamente de

5 a 50 h.

[0045] A combinação da composição escolhida, em particular do teor em zircônio e de titânio, e parâmetros de transformação, em particular, a temperatura de deformação a quente, e se for o caso do tratamento térmico antes da colocação em solução, permite, vantajosamente, obter produtos trabalhados tendo uma estrutura granular substancialmente não-recristalizada. Por estrutura granular substancialmente não-recristalizada, entende-se uma taxa de estrutura granular não-recristalizada à meia-espessura superior a 70% e, de preferência, superior a 85%.

[0046] Os produtos laminados, de acordo com a invenção, apresentam características particularmente vantajosas. Os produtos laminados têm, de preferência, uma espessura compreendida entre 0,5 mm e 15 mm, mas os produtos de espessura superior a 15 mm, até 50 mm ou mesmo 100 mm ou mais podem ter propriedades vantajosas.

[0047] Os produtos laminados obtidos pelo processo, de acordo com a invenção, têm, para uma espessura compreendida entre 0,5 e 15 mm, a meia-espessura pelo menos uma propriedade de resistência mecânica estática dentre as propriedades (I) a (III) e pelo menos uma propriedade de tolerância aos danos dentre as propriedades (IV) e (VI).

(I) um limite de elasticidade à tração $R_{p0,2}(L) \geq 280$ MPa e, de preferência, $R_{p0,2}(L) \geq 310$ MPa;

(II) um limite de elasticidade à tração $R_{p0,2}(TL) \geq 260$ MPa e, de preferência, $R_{p0,2}(TL) \geq 290$ MPa;

(III) um limite de elasticidade à tração $R_{p0,2}(45^\circ) \geq 200$ MPa e, de preferência, $R_{p0,2}(45^\circ) \geq 240$ MPa;

(IV) uma tenacidade para amostras de largura $W = 760$ mm $K_{app}(L-T) \geq 90$ MPa \sqrt{m} para uma espessura inferior a 3 mm e $K_{app}(L-T) \geq 110$ MPa \sqrt{m} para uma espessura de pelo menos 3 mm;

(V) uma tenacidade para amostras de largura $W = 760$ mm

$K_{app} (T-L) \geq 100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ para uma espessura inferior a 3 mm e $K_{app} (T-L) \geq 120 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ para uma espessura de pelo menos 3 mm;

(VI) uma extensão de fissura do último ponto válido da curva R para as amostras de largura $W = 760 \text{ mm}$ $\Delta a_{eff(max)} (T-L) \geq 80 \text{ mm}$ para uma espessura inferior a 3 mm e $\Delta a_{eff(max)} (T-L) \geq 110 \text{ mm}$ para uma espessura de pelo menos 3 mm.

[0048] Os produtos laminados, de acordo com a invenção, apresentam uma melhoria da isotropia das propriedades mecânicas, em particular a tenacidade. Assim, os produtos laminados, de acordo com a invenção, apresentam, de forma vantajosa, para amostras de largura $W = 760 \text{ mm}$ um desvio entre $K_{app} (L-T)$ e $K_{app} (T-L)$ inferior a 20% e/ou um desvio entre $\Delta a_{eff(max)} (T-L)$ e $\Delta a_{eff(max)} (L-T)$ inferior a 20% e, de preferência, inferior a 15%.

[0049] Além disso, os produtos laminados, de acordo com a invenção, que foram submetidos a resfriamento rápido ao ar apresentam uma perda de peso inferior a 20 mg/cm^2 e, de preferência, inferior a 15 mg/cm^2 , após o teste de corrosão intergranular NAMLT (Nitric Acid Mass Loss Test ASTM-G67).

[0050] Os produtos trabalhados, de acordo com a invenção, são vantajosamente utilizados para realizar elementos de estrutura de aeronave, notadamente de aviões. Elementos de estrutura de aeronave preferidos são notadamente uma pele de fuselagem obtida vantajosamente com chapas de espessura 0,5 a 12 mm, de acordo com a invenção, um quadro de fuselagem, um enrijecedor ou corrediça de fuselagem obtido(a) vantajosamente com perfis, de acordo com a invenção, ou uma nervura.

[0051] Esses aspectos, assim como outros da invenção são explicados mais em detalhes com o auxílio dos seguintes exemplos ilustrativos e não limitativos.

EXEMPLOS

Exemplo 1

[0052] Nesse exemplo, várias placas em liga Al-Mg-Li, cuja composição é dada na tabela 1, foram fundidas. A liga D tem uma composição, de acordo com a invenção as ligas A a C são ligas de referência.

Tabela 1. Composição em % em peso e densidade das ligas Al-Mg utilizadas.

Liga	Ag	Li	Si	Fe	Cu	Ti	Mn	Mg	Zn	Zr	Na (ppm)	Sc
A	0,1	1,8	0,04	0,04	0,17	0,02	0,13	4,6	0,46	0,07	9	0,08
B	0,1	1,7	0,04	0,04	0,07	0,02	0,13	4,9	0,48	0,13	8	
C	0,1	1,7	0,04	0,04	0,17	0,02	0,15	4,8	0,44	0,12	11	
D	0,1	1,4	0,05	0,04	0,18	0,02	0,15	4,5		0,12	4	

[0053] As placas foram aquecidas e laminadas a quente até uma espessura de aproximadamente 4 mm. Testes de laminação a frio até a espessura de 2 mm foram feitos após um tratamento térmico constituído de dois estágios sucessivos de uma hora a 340°C seguido de uma hora a 400°C. Só as chapas em liga, de acordo com a invenção, puderam ser laminadas a frio com sucesso até a espessura final, as chapas em liga de referência sendo quebradas à espessura de 2,6 mm. Após laminação a quente e eventualmente a frio, as chapas foram colocadas em solução a 480°C durante 20 min, esse tratamento sendo precedido de um tratamento térmico constituído de dois estágios sucessivos de uma hora a 340°C seguido de uma hora a 400°C. Após colocação em solução, as chapas foram submetidas a resfriamento rápido ao ar e aplainadas. O revenimento foi efetuado durante 10 horas a 85°C seguido de 16 horas a 120°C seguido de 10 horas a 100°C.

[0054] A estrutura granular do conjunto das amostras era substancialmente não recristalizada, a taxa de recristalização à meia espessura inferior a 10%.

[0055] Amostras foram testadas para determinar suas propriedades mecânicas estáticas (limite de elasticidade $R_{p0,2}$, a resistência à ruptura R_m , e o alongamento à ruptura (A)).

[0056] Os resultados obtidos são dados na tabela 2 abaixo.

Tabela 2. Propriedades mecânicas das chapas obtidas.

Liga	Espessura (mm)	Sentido L			Sentido TL			Sentido 45°		
		Rm (MPa)	R0,2 (MPa)	A%	Rm (MPa)	R0,2 (MPa)	A%	Rm (MPa)	R0,2 (MPa)	A%
A	4,5	507	399	4,9	502	355	12,5	436	293	21,8
B	4,5	488	370	6,0	513	354	12,4	423	274	24,7
C	4,2	487	374	5,6	506	349	11,7	444	286	21,0
D	4,2	436	328	8,5	443	304	16,1	394	256	23,1
D	2,1	439	344	5,4	455	327	15,2	379	256	25,8

[0057] A tenacidade das chapas foi caracterizada pelo teste de curvas R segundo a norma ASTM E561. Os testes foram efetuados com uma amostra CCT ($W = 760$ mm, $2a_0 = 253$ mm) plena espessura. O conjunto de resultados é reportado na tabela 3 e a tabela 14 e ilustrado pelos gráficos da figura 1 e da figura 2.

Tabela 3 – Dados de resumo da curva R

Liga	Espessura (mm)	Sentido	Kr (MPa√m) à Δa_{eff} (mm)							
			10	20	30	40	50	60	70	80
A	4,5	L-T	63	79	91	101	105	107	111	
C	4,2		70	91	105	115	122	129	135	142
D	4,2		86	113	131	145	157	166	175	183
D	2,1		79	101	113	120	128	132	137	141
A	4,5	T-L	62	86	95	110	123	135	143	
B	4,5		68	87	110	129	147	157	164	174
C	4,2		70	94	110	122	131	134		
D	4,2		86	110	128	141	153	164	175	183
D	2,1		84	106	122	133	142	150	157	161

Tabela 4 – Resultados dos testes de tenacidade Liga	Espessura (mm)	Sentido	K_{app} MPa√m	KC_{eff} MPa√m	Δa_{effmax} mm
A	4,5	L-T	82	102	76
C	4,2		96	132	116
D	4,2		125	177	121
D	2,1		99	122	113
A	4,5	T-L	102	142	72
B	4,5		119	179	102

C	4,2	T-L	102	131	63
D	4,2		125	177	134
D	2,1		112	147	103

[0058] A figura 3 mostra a melhoria do compromisso entre o limite de elasticidade e a tenacidade.

[0059] Em particular, a melhoria de K_{app} (L-T) é superior a 25%, enquanto que a diminuição de limite de elasticidade é inferior a 15% em relação à chapa em liga C. O comprimento da curva R é também significativamente melhorada, assim $\Delta a_{eff(max)}$ (T-L) é melhorado de mais de 30%.

[0060] A velocidade de propagação de fissura foi determinada, segundo a norma E647 sobre amostras CCT de largura de 160 mm.

Tabela 5 – Velocidade de propagação das fissuras ($\sigma_{max} = 80$ MPa ou $\sigma_{max} = 120$ MPa (), $R = 0,1$ – plena espessura)**

Liga	Espes-sura (mm)	Sen-tido	da/dN (mm/ciclos) à ΔK (MPa \sqrt{m})						
			10	15	20	25	30	35	40
D	4,2	L-T	1,24.10 ⁻⁰⁴	1,17.10 ⁻⁰⁴	2,27.10 ⁻⁰⁴	3,85.10 ⁻⁰⁴	0,63.10 ⁻⁰³	0,95.10 ⁻⁰³	1,48.10 ⁻⁰³
D	2,1		1,20.10 ⁻⁰⁴	1,59.10 ⁻⁰⁴	2,82.10 ⁻⁰⁴	4,95.10 ⁻⁰⁴	0,90.10 ⁻⁰³		
A	4,5	T-L	1,30.10 ⁻⁰⁴	2,58.10 ⁻⁰⁴	7,81.10 ⁻⁰⁴	35,3.10 ⁻⁰⁴	14,4.10 ⁻⁰³		
B	4,5**		1,37.10 ⁻⁰⁴	1,89.10 ⁻⁰⁴	2,73.10 ⁻⁰⁴	5,63.10 ⁻⁰⁴	0,98.10 ⁻⁰³	2,20.10 ⁻⁰³	5,30.10 ⁻⁰³
C	4,2**			2,84.10 ⁻⁰⁴	5,10.10 ⁻⁰⁴	9,61.10 ⁻⁰⁴	1,99.10 ⁻⁰³	9,60.10 ⁻⁰³	
D	4,2		1,35.10 ⁻⁰⁴	2,00.10 ⁻⁰⁴	3,52.10 ⁻⁰⁴	5,14.10 ⁻⁰⁴	0,92.10 ⁻⁰³	1,95.10 ⁻⁰³	
D	2,1		1,01.10 ⁻⁰⁴	1,53.10 ⁻⁰⁴	2,96.10 ⁻⁰⁴	5,56.10 ⁻⁰⁴	0,90.10 ⁻⁰³		

[0061] Os resultados do teste de corrosão intergranular NAMLT (Nitric Acid Mass Loss Test ASTM-G67) para as diversas chapas são sintetizados na Tabela 6. Determinadas chapas foram colocadas em solução e submetidas a resfriamento rápido em água em laboratório.

Tabela 6 – Corrosão intergranular no teste NAMLT

Liga	Ep. (mm)	Perda de peso (mg/cm ²)			
		Resfriamento rápido em água		Resfriamento rápido ao ar	
		Superfície	t/10e	Superfície	t/10
A	4,5	24		13	

B	4,5	26		16	
C	4,2	26		18	
D	4,2	26,5	24	16	17
D	2,1			12	

[0062] As chapas em liga, de acordo com a invenção, submetidas a resfriamento rápido ao ar apresentam uma baixa sensibilidade à corrosão intergranular para uma espessura de 4 mm e não são sensíveis à corrosão intergranular para uma espessura de 2 mm.

Exemplo 2

[0063] Nesse exemplo, lingotes foram fundidos para avaliar a ductilidade a quente e as propriedades em corrosão intergranular de diferentes ligas. A dimensão dos lingotes após escalpe era em mm de 255 x 180 x 28.

[0064] A composição das ligas testadas é dada na tabela 7.

Tabela 7 – Composição em % em peso e densidade das ligas Al-Mg-Li utilizados

Liga	Ag	Li	Si	Fe	Cu	Ti	Mn	Mg	Zn	Zr	Cr	Sc
E	-	1,4	0,03	0,03	-	0,02	0,40	4,5	-	0,11	0,18	-
F	-	1,4	0,03	0,03	-	0,02	0,16	4,4	-	0,12	0,19	-
G	-	1,4	0,03	0,03	-	0,02	0,17	4,4	-	0,11	-	-
H	-	1,1	0,03	0,03	-	0,02	0,16	4,5	-	0,12	-	-
I	-	1,4	0,03	0,03	-	0,02	0,17	4,5	0,6	0,12	-	-

[0065] A ductilidade a quente foi avaliada sobre amostras usinadas nos lingotes, após uma homogeneização de 12 horas a 505°C. O teste de ductilidade a quente foi feito com o auxílio de uma máquina servo-hidráulica fornecida por Servotest Testing Systems Ltd sobre amostras específicas de espessura de 20 mm a uma velocidade de deformação

de 1 s^{-1} . O teste consiste em deformar em compressão uma amostra, contendo dois orifícios. Em razão da compressão, o material situado entre os orifícios sofre uma expansão a uma velocidade de deformação controlada. As condições de teste são descritas no artigo de A. Deschamps et al. publicado na revista *Materials Science and Engineering* A319-321 (2001) 583 – 586. A medida normalizada de redução de superfície da zona de ruptura ($\Delta A/A_0$) por análise de imagem permite avaliar a ductilidade à temperatura considerada. Os resultados obtidos a 450°C e 475°C são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Ductilidade a quente ($\Delta A/A_0$) (%).

Ductilidade a quente ($\Delta A/A_0$) (%)	Temperatura deformação ($^\circ\text{C}$)		Média
	450	475	
Liga			
E	17	19	18
F	13	19	16
G	12	13	12
H	11	20	15
I	8	12	10

[0066] As ligas E e F que contêm Mn e Cr apresentam uma ductilidade a quente vantajosa, enquanto que a ductilidade a quente da liga de referência I, contendo 0,6% em peso de Zn é a mais baixa das ligas testadas.

[0067] Os lingotes foram laminados a quente até a espessura 4 mm. As chapas assim obtidas foram colocadas em solução a 480°C , esse tratamento sendo precedido de um tratamento térmico constituído de dois estágios sucessivos de uma hora a 345°C seguido de uma hora a 400°C . Após colocação em solução, as chapas foram submetidas a resfriamento rápido ao ar e aplainadas por uma tração controlada com um

alongamento permanente de 2%. O revenimento foi feito durante 10 horas a 85°C, seguido de 16 horas a 120°C seguido de 10 horas a 100°C.

[0068] Os resultados do teste de corrosão intergranular NAMLT (Nitric Acid Mass Loss Test ASTM-G67) são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Corrosão intergranular no teste NAMLT medidas na superfície

Liga	Perda de peso (mg/cm ²)
E	11
F	11
G	8
H	16
I	8

[0069] A liga G, que se distingue notadamente da liga D por um mais baixo teor em cobre, apresenta uma perda de peso particularmente baixa. A liga I que contém Zn não se distingue da liga G em forma de resistência à corrosão intergranular. A liga H, que apresenta um teor em lítio menor do que as outras ligas testadas apresenta uma perda de peso mais elevada.

REVINDICAÇÕES

1. Produto trabalhado, caracterizado pelo fato de que consiste em uma liga de alumínio tendo a seguinte composição, em % em peso,

Mg: 4,0 – 4,7;

Li: 1,0 – 1,5;

Zr: 0,05 – 0,15;

Ti: 0,01 – 0,15;

Fe: 0,02 – 0,2;

Si: 0,02 – 0,2;

Mn: $\leq 0,5$;

Cr: $\leq 0,5$;

Ag: $\leq 0,5$;

Cu: $\leq 0,5$;

Zn: $\leq 0,5$;

Sc: $< 0,01$;

outros elementos $< 0,05$;

o restante sendo alumínio.

2. Produto trabalhado de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que contém pelo menos um elemento dentre Mn e Cr, contendo, em % em peso

Mn: 0,05 – 0,5

Cr: 0,05 – 0,3,

um elemento não escolhido dentre Mn e Cr, tendo um teor inferior a 0,05 em peso.

3. Produto trabalhado de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que contém pelo menos um elemento dentre Cu e Ag, contendo, em % em peso

Cu: 0,05 – 0,3

Ag: 0,05 – 0,3,

um elemento não escolhido dentre Cu e Ag, tendo um teor inferior a 0,05 em peso.

4. Produto trabalhado de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 3, caracterizado pelo fato de que o teor de Li é, em % em peso

Li: 1,1 – 1,5 e, de preferência, Li: 1,2 – 1,4.

5. Produto trabalhado de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado pelo fato de que o teor de Mg é, em % em peso

Mg: 4,4 – 4,7.

6. Produto trabalhado de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 5, caracterizado pelo fato de que tem um teor máximo de Be de 5 ppm de Be e/ou um teor máximo de Na de 10 ppm de Na e/ou um teor máximo de Ca de 20 ppm.

7. Produto trabalhado de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, caracterizado pelo fato de que tem um teor de Zn inferior a 0,2% em peso e, de preferência, inferior a 0,05 em peso.

8. Produto trabalhado de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 7, caracterizado pelo fato de que o teor de Fe e/ou o teor de Si são, em % em peso:

Fe: 0,04 – 0,15

Si: 0,04 – 0,15

9. Produto trabalhado de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, caracterizado pelo fato de que foi trabalhado por laminação.

10. Produto trabalhado de acordo com a reivindicação 9, caracterizado pelo fato de que tem, para uma espessura compreendida entre 0,5 e 15 mm, à meia espessura, pelo menos uma propriedade de resistência mecânica estática dentre as propriedades (I) a (III) e pelo

menos uma propriedade de tolerância aos danos dentre as propriedades (IV) a (VI)

(I) um limite de elasticidade à tração $R_{p0,2}(L) \geq 280$ MPa e, de preferência, $R_{p0,2}(L) \geq 310$ MPa;

(II) um limite de elasticidade à tração $R_{p0,2}(TL) \geq 260$ MPa e, de preferência, $R_{p0,2}(TL) \geq 290$ MPa;

(III) um limite de elasticidade à tração $R_{p0,2}(45^\circ) \geq 200$ MPa e, de preferência, $R_{p0,2}(45^\circ) \geq 240$ MPa;

(IV) uma tenacidade para amostras de largura $W = 760$ mm $K_{app}(L-T) \geq 90$ MPa \sqrt{m} para uma espessura inferior a 3 mm e $K_{app}(L-T) \geq 110$ MPa \sqrt{m} para uma espessura de pelo menos 3 mm;

(V) uma tenacidade para amostras de largura $W = 760$ mm $K_{app}(T-L) \geq 100$ MPa \sqrt{m} para uma espessura inferior a 3 mm e $K_{app}(T-L) \geq 120$ MPa \sqrt{m} para uma espessura de pelo menos 3 mm;

(VI) uma extensão de fissura do último ponto válido da curva R para as amostras de largura $W = 760$ mm $\Delta a_{eff(max)}(T-L) \geq 80$ mm para uma espessura inferior a 3 mm e $\Delta a_{eff(max)}(T-L) \geq 110$ mm para uma espessura de pelo menos 3 mm.

11. Processo de fabricação de um produto trabalhado como definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 10, caracterizado pelo fato de que compreende sucessivamente

- a elaboração de um banho de metal líquido, de forma a se obter uma liga de alumínio tendo a composição como definida em qualquer uma das reivindicações 1 a 8;

- a fundição dessa liga sob a forma bruta;

- opcionalmente, a homogeneização do produto assim fundido;

- a deformação a quente e, opcionalmente, a frio;

- opcionalmente, um tratamento térmico a uma temperatura compreendida entre 300 e 420°C em um ou vários estágios;

- a colocação em solução do produto assim deformado e resfriamento rápido;

- opcionalmente, a deformação a frio do produto assim colocado em solução e submetido a resfriamento rápido;

- o revenimento a uma temperatura inferior a 150°C.

12. Processo de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo fato de que a etapa de resfriamento rápido é efetuada ao ar.

13. Utilização de um produto como definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 10, caracterizada pelo fato de ser para produzir um elemento estrutural de aeronave, preferencialmente uma pele de fuselagem, um quadro de fuselagem, um enrijecedor ou longarina de fuselagem ou uma nervura.

Fig 1

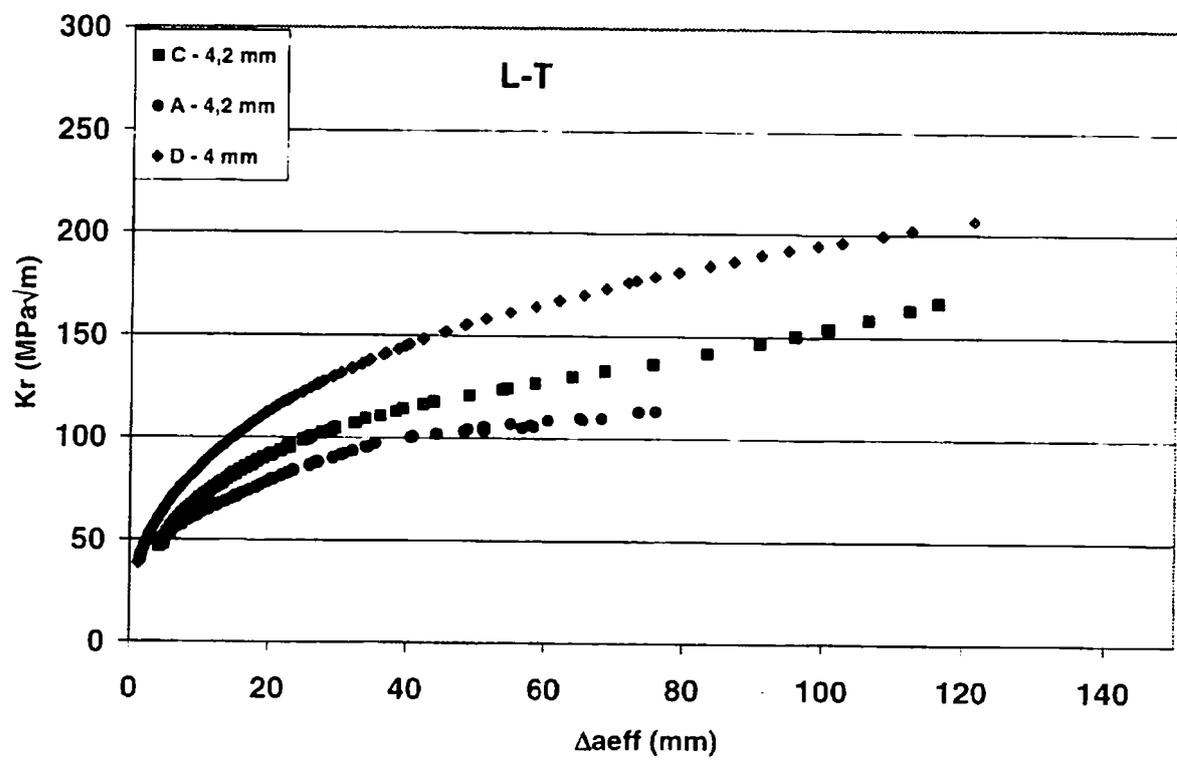


Fig 2

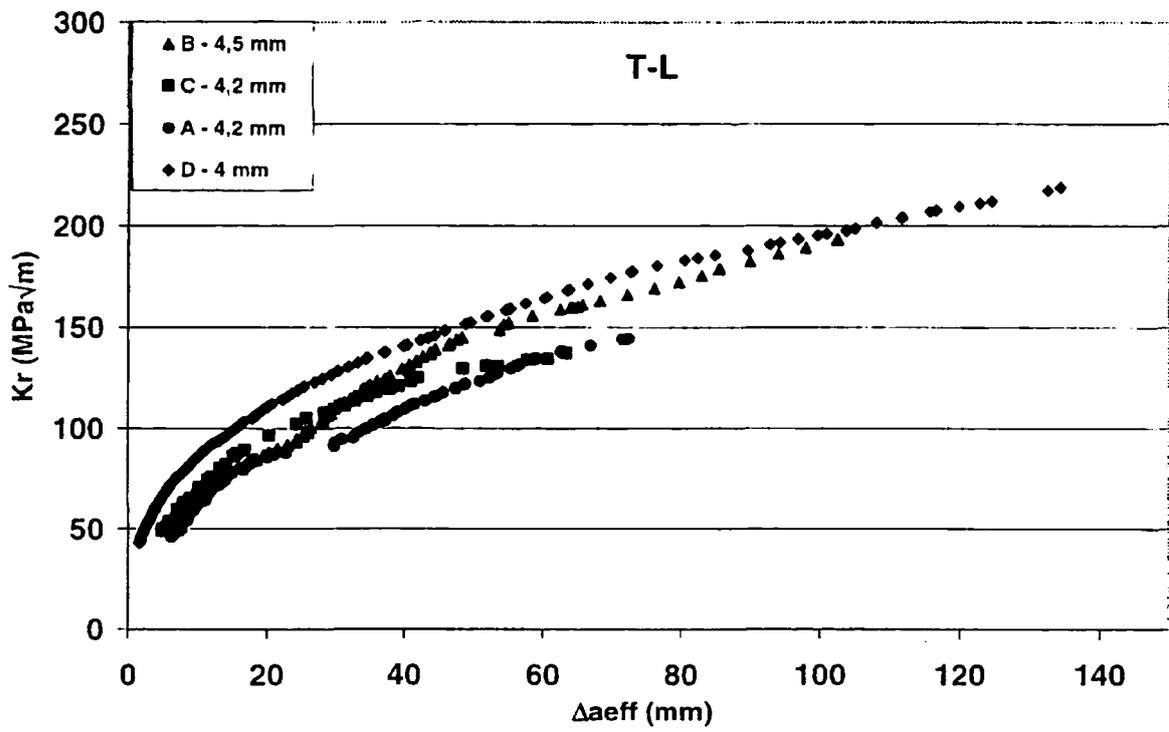


Fig 3 :

