

República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria
e do Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) **PI0610937-3 A2**

(22) Data de Depósito: 02/06/2006
(43) Data da Publicação: 03/08/2010
(RPI 2065)



(51) *Int.Cl.:*
C22C 21/12
C22F 1/057

(54) Título: **CHAPA EM ALUMÍNIO-COBRE-LÍTIO DE ELEVADA TENACIDADE PARA FUSELAGEM DE AVIÃO**

(30) Prioridade Unionista: 05/08/2005 FR 05 08374, 06/06/2005 US 60/687,444

(73) Titular(es): Alcan Rhenalu

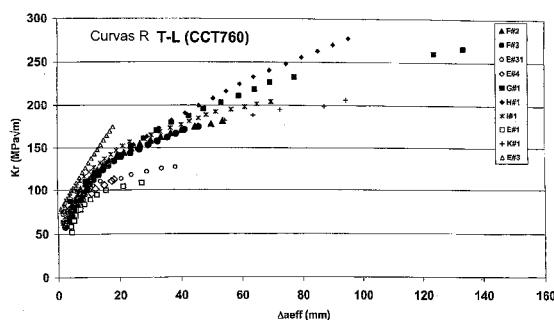
(72) Inventor(es): Bernard Bes, Christophe Sigli, Hervé Ribes, Timothy Warner

(74) Procurador(es): Dannemann, Siemsen, Bigler & Ipanema Moreira

(86) Pedido Internacional: PCT FR2006001250 de 02/06/2006

(87) Publicação Internacional: WO 2006/131627 de 14/12/2006

(57) Resumo: Uma liga à base de alumínio de pequena massa volúmica útil em uma estrutura de aeronave para as aplicações de chapa de fuselagem que tem uma resistência mecânica elevada, uma elevada tenacidade e uma elevada resistência à corrosão, compreendendo % em peso, 2,7 a 3,4 % em peso de Cu, 0,8 a 1,4 % em peso de Li, 0,1 a 0,8 % em peso de Ag, 0,2 a 0,6 % de Mg e um elemento, tal como Zr, Mn, Or, Sc, Hf e Ti, ou uma combinação destes, cuja quantidade, em % em peso, é de 0,05 a 0,13 % para Zr, 0,05 a 0,8 % para Mn, 0,05 a 0,3 % para Cr e para Sc, 0,05 a 0,5 % para Hf e de 0,05 a 0,15 % para Ti. A quantidade de Cu e de Li é determinada segundo a fórmula $\text{Cu (0\% em peso)} + 5/3 \text{ Li (\% em peso)} < 5,2$.





Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**CHAPA EM ALUMÍNIO-COBRE-LÍTIO DE ELEVADA TENACIDADE PARA FUSELAGEM DE AVIÃO**".

Domínio da Invenção

- 5 A presente invenção refere-se, em geral, aos produtos em ligas de alumínio e, em particular, desses produtos úteis na indústria aeroespacial e apropriados para uma utilização em aplicações de fuselagem.

Estado da Técnica

- 10 Na indústria aeronáutica civil atualmente e, em particular, para aplicações de fuselagem, existe uma forte motivação para reduzir tanto o peso quanto o custo. A fuselagem de um avião de transporte comercial é submetida a um conjunto complexo de esforços, dependendo da fase de funcionamento (decolagem, cruzeiro, manobra, aterragem...) e condições ambientais (rajadas de vento, ventos de frente,...). Além disso, as diferentes
- 15 partes da fuselagem são submetidas a esforços diferentes. Apesar dessa complexidade, é possível distinguir linhas diretrizes maiores de concepção que determinam o peso da estrutura, determinadas tendo um impacto sobre o peso total mais considerável que outras.

- 20 A título de exemplo, a resistência à compressão e ao cisalhamento em compressão é uma linha diretriz de concepção extremamente importante, já que os painéis de fuselagem os mais pesados sofrem esse tipo de esforço. A fim de que um novo material possa permitir uma redução do peso desses painéis que sofrem esforço em compressão, deve ter um módulo de elasticidade elevada, um limite de elasticidade a 0,2 % elevado (para
- 25 resistir à chamuscagem) e uma pequena massa volúmica.

- 30 A segunda linha diretriz maior é a resistência residual de painéis longitudinalmente (no eixo da fuselagem) fissurados. As regras de certificação aeronáuticas obrigam a consideração da tolerância aos danos na concepção, assim como é habitual considerar grandes fissuras longitudinais ou circunferenciais nos painéis de fuselagem, para provar que um certo nível de esforço pode ser aplicado, sem ruptura catastrófica. Uma propriedade conhecida dos materiais que governam a concepção é no caso a tenacidade

sob esforço plano. Todos os fatores conhecidos de intensidade de esforço crítico conferem todavia apenas uma vista limitada da tenacidade. O teste de curva R é um meio amplamente reconhecido para caracterizar as propriedades de tenacidade. A curva R representa a evolução do fator de intensidade de esforço efetiva crítica para a propagação de fissura em função da extensão de fissura efetiva, sob um esforço monótono. Ela permite a determinação da carga crítica para uma ruptura instável para qualquer configuração pertinente a estruturas de aeronave fissuradas. Os valores do fator de intensidade de esforço efetivo e da extensão de fissura efetiva são valores definidos na norma ASTM E561. O comprimento da curva R-a saber a extensão de fissura máxima da curva-é um parâmetro em si importante para a concepção de fuselagem. A análise clássica, geralmente utilizada, dos testes realizados sobre painéis de fissura central dá um fator de intensidade de esforço aparente à ruptura (K_{app}). Esse valor não varia significativamente em função do comprimento da curva R, especialmente quando a inclinação da curva R é próxima da inclinação da curva ligada ao fator de intensidade de esforço aplicado ao comprimento de fissura (curva aplicada). Todavia, em uma estrutura de elemento estrutural real, tal como um painel que comporta enrijecedores fixados, quando uma fissura progride sob um enrijecedor não rompido, a curva aplicada cai em razão do efeito de ponte do enrijecedor. Nesse caso, um mínimo local da curva aplicada pode ocorrer para um comprimento de fissura maior que a soma do comprimento de fissura inicial e da extensão de fissura sob uma carga monótona. Nesse caso, maiores esforços, antes da ruptura instável, são permitidos para curvas longas R. Assim é interessante ter uma curva mais longa R, mesmo para fatores de intensidade de esforço críticos idênticos, tais que são determinados classicamente.

Para produtos que têm propriedades mecânicas idênticas, uma massa volúmica inferior é claramente benéfica para o peso de um elemento de estrutura. Uma terceira linha diretriz maior é assim a massa volúmica do material. Além disso, grandes partes da fuselagem não são tão fortemente carregadas e o peso da concepção é limitado por um certo limite geralmente denominado "espessura mínima". O conceito de espessura mínima corres-

ponde à espessura mais estreita utilizável para a fabricação (em particular a manipulação dos painéis) e o reparo (rebite de reparo). A única maneira de reduzir o peso nesse caso consiste em utilizar um material de massa volúmica menor.

5 Outras linhas diretrizes importantes são a propagação de fissuras em fadiga, seja sob esforço de amplitude constante, seja com uma amplitude variável (em razão de manobras e de rajadas de vento, especialmente na direção longitudinal, mas também em torno da asa, em todas as direções).

10 Atualmente, as fuselagens dos aviões civis são, na maior parte, constituídas de chapa em liga 2024, 2056, 2524, 6013, 6156 ou 7475, colocada sobre cada face com uma liga de alumínio pouco carregada em elementos de liga, uma liga 1050 ou 1070, por exemplo. A finalidade da liga de revestimento é de conferir um reservatório à corrosão suficiente. Uma corrosão
15 leve, generalizada ou por injeção é tolerável, mas ela não deve ser penetrante, de forma a não atacar a liga de núcleo. Existe uma tendência para tentar utilizar materiais não-colocados para a concepção da fuselagem, de modo a reduzir o custo. A resistência à corrosão, e em particular a corrosão intergranular e a corrosão sob esforço, do painel de fuselagem é assim um
20 aspecto importante de suas propriedades.

 Conforme enunciado acima, a única maneira de reduzir o peso consiste, em certos casos, em reduzir a massa volúmica dos materiais utilizados para a construção aeronáutica. As ligas em alumínio-lítio há muito tempo reconhecidas como uma solução eficaz para reduzir o peso em razão
25 da pouca massa volúmica dessas ligas. Todavia, as diferentes exigências citadas acima: módulo de elasticidade elevada, resistência à compressão elevada, tolerância aos danos elevada e resistência à corrosão elevada, não foram satisfeitas simultaneamente pelas ligas alumínio-lítio da técnica anterior. Conseguir uma tenacidade elevada com essas ligas se revelou, em particular,
30 ser um problema difícil de resolver. Prasard et al., por exemplo, estabeleceram recentemente (em Sadhana, vol. 28, partes 1 & 2, fevereiro / abril 2003, páginas 209 e 246) que "ligas Al-Li são materiais candidatos de pri-

meiro ordem para substituir as ligas em Al tradicionalmente utilizadas. Apesar de suas numerosas vantagens de propriedades, uma fraca ductilidade em tensão e uma tenacidade inadequada, especialmente nas direções através da espessura, militam contra sua aceitabilidade". Atualmente, as ligas em Al-Li foram limitadas a aplicações militares muito específicas tais como materiais que têm uma resistência elevada à, elevada temperatura, os materiais tendo uma tenacidade melhorada a temperaturas criogênicas para aplicações aeroespaciais, em certas partes de helicópteros, e peças de fuselagem de aviões militares.

10 A patente US 5 032 359 (Martin Marietta) descreve uma família de ligas baseada em ligas alumínio-cobre-magnésio-prata às quais o lítio foi acrescentado, em faixas específicas e que apresentam uma resistência elevada à temperatura ambiente e à elevada temperatura, uma aptidão à extrusão, um forjabilidade, e boas propriedades de soldabilidade e de resposta ao
15 envelhecimento natural. Os exemplos descrevem produtos extrudados. Nenhuma informação foi fornecida quanto à tenacidade, ao comportamento à fadiga ou à resistência à corrosão. Em um modo de realização preferido, a liga tem por composição de 3,0 a 6,5 % de cobre, de 0,05 a 2,0 % de magnésio, de 0,05 a 1,2 % de prata, de 0,2 a 3,1 % de lítio, de 0,05 a 0,5 % de
20 um elemento escolhido dentre o zircônio, o cromo, o manganês, o titânio, o boro, o háfnio, o vanádio, o diboreto de titânio e as misturas destes.

 O documento US 5 122 339 (Martin Marietta) é uma continuação do pedido precedente. É descrita, além disso, uma utilização de ligas similares como ligas de soldagem ou como ligas soldadas.

25 O documento US 5 211 910 (Martin Marietta) descreve as ligas à base de alumínio contendo Cu, Li, Zn, Mg e Ag que possuem propriedades favoráveis, como uma massa volúmica relativamente fraca, um módulo elevado, combinações resistência mecânica / ductilidade elevadas, uma forte resposta ao envelhecimento natural com e sem martelamento anterior, e um
30 módulo elevado após revenido com ou sem martelamento anterior. As ligas têm por composição de 1 a 7 % de Cu, de 0,1 a 4 % de Li, de 0,01 a 4 % de Zn, de 0,05 a 3 % de Mg, de 0,01 a 2 % de Ag, de 0,01 a 2 % de um elemen-

to escolhido dentre Zr, Cr, Mn, Ti, Hf, V, Nb, B e TiB₂, o resto sendo Al conjuntamente com suas impurezas inevitáveis. Essa invenção descreve como adições de Zn podem ser utilizadas para reduzir o teor em Ag presentes nas ligas ensinadas no documento US 5 032 359, de forma a reduzir o custo.

- 5 O documento US 5 455 003 (Martin Marietta) descreve um processo de produção de ligas alumínio-cobre-lítio que apresentam uma resistência mecânica e uma tenacidade melhoradas a temperaturas criogênicas. As propriedades criogênicas melhoradas as atingidas ajustando a composição da liga, conjuntamente com os parâmetros de tratamento, tais como a
- 10 quantidade de martelamento e o revenido. O produto utilizado para reservatórios criogênicos em veículos de lançamento espacial.

- O documento US 5 389 165 (Reynolds) descreve uma liga à base de alumínio útil em estruturas de aeronave e aeroespaciais que tem uma pequena massa volúmica, uma resistência mecânica elevada e uma elevada
- 15 tenacidade e que tem por fórmula: Cu_aLi_bMg_cAg_dZr_eAl_{bal} na qual a, b, c, d, e e bal indicam a quantidade em % em peso de componentes de liga, e na qual:

$$2,8 < a < 3,8,$$

$$0,80 < b < 1,3, 0,20 < c < 1,00, 0,20 < d < 1,00 \text{ e } 0,08 < e < 0,40.$$

- 20 De preferência, os componentes cobre e lítio são ajustados, de modo que o teor combinado em cobre em lítio é mantido abaixo do limite de solubilidade, a fim de evitar uma perda da tenacidade durante uma exposição a uma temperatura elevada. A relação entre os teores em cobre e em lítio deve também satisfazer a seguinte relação:

- 25
$$\text{Cu (\% em peso)} + 1,5 \text{ Li (\% em peso)} < 5,4.$$

Condições especiais de tração controlada, entre 5 e 11 %, são aplicadas. Os exemplos são limitados a uma espessura de 19 mm e um teor em zircônio superior ou igual a 0,13 % em peso.

- O documento US 2004 / 0071586 (Alcoa) divulga uma liga Al-
- 30 Cu-Mg compreendendo de 3 a 5 % em peso de Cu, de 0,5 a 2 % em peso de Mg e de 0,01 a 0,9 % em peso de Li. A partir desse pedido de patente, a tenacidade das ligas para as quais um acréscimo de Li compreendido entre

0,2 e 0,7 % em peso melhoradas de forma significativa em relação a ligas semelhantes contendo seja não Li, seja uma quantidade de Li mais elevada.

Existe uma necessidade de uma liga em Al-Li de resistência mecânica elevada, de elevada tenacidade e, em particular, de extensão de fissura elevada, antes de uma ruptura instável, de resistência a corrosão elevada, para aplicações aeronáuticas e, em particular, para aplicações de chapa de fuselagem.

Objeto da Invenção

Por essas razões e outras, os presentes inventores chegaram à presente invenção referente a uma liga de alumínio-cobre-lítio-magnésio-prata, que apresenta uma resistência mecânica elevada, uma elevada tenacidade e especificamente uma extensão de fissura elevada antes de uma ruptura instável de painéis largos pré-fissurados, e uma elevada resistência à corrosão.

Um objetivo da presente invenção é um processo de fabricação de uma chapa à base de liga de alumínio que tem uma tenacidade e uma resistência mecânica elevadas, no qual:

a) se elabora um banho de metal líquido, compreendendo 2,7 a 3,4 % em peso de Cu, 0,8 a 1,4 % em peso de Li, 0,1 a 0,8 % em peso de Ag, 0,2 a 0,6 % em peso de Mg e pelo menos um elemento escolhido dentre Zr, Mn, Cr, Sc, Hf e Ti, a quantidade desse elemento, se for escolhido, sendo de 0,05 a 0,13 % em peso para Zr, 0,05 a 0,8 % em peso para Mn, 0,05 a 0,3 % em peso para Cr e para Sc, 0,05 a 0,5 % em peso para Hf e de 0,05 a 0,15 % em peso para Ti,

o resto sendo o alumínio e impurezas inevitáveis, com a condição suplementar que a quantidade de Cu e de Li seja tal que

$$\text{Cu (\% em peso)} + \frac{5}{3} \text{Li (\% em peso)} < 5,2;$$

b) se funde uma placa a partir desse banho de metal líquido;

c) se homogeneiza essa placa a uma temperatura compreendida entre 490 e 530°C durante um período de 5 a 60 horas;

d) se lamina essa placa em uma chapa que tem uma espessura

final compreendida entre 0,8 e 12 mm;

e) se coloca em solução e se tempera essa chapa;

f) se traciona de forma controlada essa chapa com uma deformação permanente de 1 a 5 %;

5 g) se realiza um revenido dessa chapa por aquecimento a 140 a 170°C durante 5 a 30 horas.

Um outro objeto da invenção é um produto laminado, extrudado e/ou forjado em liga de alumínio, compreendendo 2,7 a 3,4 % em peso de Cu, 0,8 a 1,4 % em peso de Li, 0,1 a 0,8 % em peso de Ag, 0,2 a 0,6 % em peso de Mg e pelo menos um elemento escolhido dentre Zr, Mn, Cr, Sc, Hf e Ti, a quantidade desse elemento, se for escolhido, sendo de 0,05 a 0,13 % em peso para Zr, 0,05 a 0,8 % em peso para Mn, 0,05 a 0,3 % em peso para Cr e para Sc, 0,05 a 0,5 % em peso para Hf e de 0,05 a 0,15 % em peso para Ti, o resto sendo o alumínio e impurezas inevitáveis, com a condição
10 suplementar que a quantidade de Cu e de Li seja tal que:

$$\text{Cu (\% em peso)} + 5/3 \text{ Li (\% em peso)} < 5,2.$$

Ainda outros objetos da invenção são elementos de estruturas, enrijecedores e painéis de fuselagem obtidos a partir desses produtos laminados, extrudados e/ou forjados.

20 Descrição das Figuras

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

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

Figura 3: evolução da velocidade de fissuração no sentido T-L, quando a amplitude do fator de intensidade de esforço varia.

25 Figura 4: evolução da velocidade de fissuração no sentido L-T, quando a amplitude do fator de intensidade de esforço varia.

Figura 5: curva R no sentido T-L (amostra CCT760) de amostras, de acordo com a invenção, tendo sido obtida com diferentes níveis de deformação por tração.

30 Descrição Detalhada da Invenção

Salvo menção contrária, todas as indicações referentes à composição química das ligas são expressas como uma percentagem em peso

baseada no peso total da liga. A designação das ligas é feita em conformidade com as regras de *The Aluminium Association*, conhecidas do técnico. As definições dos estados metalúrgicos são indicadas na norma europeia EN 515.

5 Salvo menção contrária, as características mecânicas estáticas, 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 determinadas por um teste de tração, segundo a norma EN 10002-1, a retirada e o sentido do teste sendo definidos pela norma EN-485-1.

10 A velocidade de fissuração (da/dN) é determinada segundo a norma ASTM E 647. Uma curva da intensidade de esforço em função da extensão de fissura, conhecida como a curva R, é determinada segundo a norma ASTM E 561. O fator de intensidade de esforço crítico K_{IC} , 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_{IC0} é também calculado, atribuindo o comprimento de fissura inicial à carga crítica, no começo da carga monótona. Esses dois valores são calculados para uma amostra da forma requerida. K_{app} representa o fator K_{IC0} correspondente à amostra que foi utilizada para efetuar o teste de curva R. K_{eff} representa o fator K_{IC} correspondente à amostra que foi utilizada para efetuar o teste de curva R. $\Delta a_{eff(max)}$ representa a extensão de fissura do último ponto válido da curva R. Salvo menção contrária, o tamanho de fissura no fim do estágio de pré-fissura por fadiga é $W/3$ para amostras do tipo M(T), na qual W é a largura da amostra, tal como definida na norma ASTM E561. É preciso observar que a largura da amostra utilizada em um teste de curva R pode ter uma influência substancial sobre a intensidade de esforço medida no teste. As chapas de fuselagem sendo de grandes painéis, os resultados de curva R obtidos sobre amostras suficientemente largas, tais como amostras que têm uma largura superior ou igual a 400 mm, são julgados os mais significativos para a avaliação da tenacidade. Por essa razão, as amostras de teste CCT760, que tinham uma largura de 760 mm, foram utilizadas preferencialmente para a avaliação da tenacidade. O comprimento da fissura inicial $2a_0 = 253$ mm.

A tenacidade foi tb avaliada nos sentidos T-L como auxílio da energia global à ruptura E_g , segundo o teste Kahn. O esforço Kahn R_e (em MPa) é igual à relação da carga máxima F_{max} que pode suportar a amostra sobre a seção da amostra (produto da espessura B pela largura W). R_e não
 5 permite avaliar a tenacidade relativa de amostras cujas características mecânicas estáticas são diferentes. A energia global à ruptura E_g é determinada como a área sob a curva Força-Deslocamento até à ruptura da amostra, E_g é diretamente ligada à tenacidade. O teste é descrito no artigo "*Kahn-Type Tear Test and Crack Toughness of Aluminum Alloy Sheet*", publicado na re-
 10 vista *Materials Research & Standards*, abril de 1964, p.151-155. A amostra utilizada para o teste de tenacidade Kahn é descrita, por exemplo, no "*Metals Handboock*", 8th Edition, vol. 1, American Society for Metals, pp. 241-242.

Por "chapa", se quer dizer no caso um produto laminado que não
 15 excede 12 mm de espessura.

O termo "elemento de estrutura" se refere a um elemento utilizado em construção mecânica para o qual as características mecânicas estáticas e /ou dinâmicas têm uma importância particular para o desempenho e a integridade da estrutura, e para o qual um cálculo da estrutura é geralmente
 20 prescrito ou efetuado. Trata-se tipicamente de uma peça mecânica 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, o revestimento de fuselagem (*fuselage skin* em inglês), os enrijecedores ou
 25 liças de fuselagem (*Stringers*), as divisórias estanques (*blukheads*), as armações de fuselagem (*circumferential frames*), as asas (tais como, o revestimento de velame (*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*),
 30 assim como os perfilados de piso (*floor beams*), os trilhos de bancos (*seat tracks*) e as portas.

A liga alumínio-cobre-lítio-prata-magnésio, segundo um modo de

realização da invenção tem de maneira vantajosa a seguinte composição:

Tabela 1:

Faixas de composição de ligas (% em peso, o resto sendo o Al)

	Cu	Li	Ag	Mg
Largura	2,7 a 3,4	0,8 a 1,4	0,1 a 0,8	0,2 a 0,6
Preferida	3,0 a 3,4	0,8 a 1,2	0,2 a 0,5	0,2 a 0,6
Mais preferida	3,1 a 3,3	0,9 a 1,1	0,2 a 0,4	0,2 a 0,4

5 A fim de obterem-se os resultados desejados em termos de tenacidade, pode ser vantajoso obter uma dissolução quase perfeita durante um tratamento térmico de colocação em solução e também minimizar a decomposição da solução sólida durante a imersão. Os inventores determinaram que isto pode ser obtido, por exemplo, limitando-se a quantidade total de Cu e de Li, conforme a seguinte relação entre o cobre e o lítio.

10
$$\text{Cu (\% em peso)} + 5/3 \text{ Li (\% em peso)} < 5,2$$
 e assegurando uma velocidade de resfriamento durante a têmpera suficientemente elevada, por exemplo temperando na água fria.

Para as composições preferidas e mais preferidas da tabela 1, a relação entre o cobre e o lítio é, de preferência:

15
$$\text{Cu (\% em peso)} + 5/3 \text{ Li (\% em peso)} < 5.$$

20 Pelo menos um elemento, tal como Zr, Mn, Cr, Sc, Hf, Ti ou uma combinação destes é incluído(a) de forma a afinar o grão. As adições dependem do elemento: de 0,05 a 0,13 % em peso (de preferência de 0,09 a 0,13 em peso) para Zr, de 0,05 a 0,8 % em peso para Mn, de 0,05 a 0,3 % em peso para Cr e Sc, de 0,05 a 0,5 % em peso para Hf e de 0,05 a 0,15 % em peso para Ti. Quando vários desses elementos anti-recristalizantes são acrescentados, a soma pode ser limitada pelo aparecimento de fases primárias.

25 Em uma outra realização vantajosa da invenção, a afinação de grão é realizada, graças ao acréscimo de 0,05 a 0,13 % em peso de Zr, de 0,02 a 0,3 % em peso de Sc e opcionalmente de 0,05 a 0,8 % em peso de Mn, de 0,05 a 0,3 % em peso de Cr, de 0,05 a 0,5 % em peso de Hf e de 0,05 a 0,15 % em peso de Ti.

Em certos casos, e particularmente para as chapas laminadas a

quente de espessura compreendida entre 4 e 12 mm, pode ser vantajoso limitar o teor em Mn a 0,05 % em peso, e, de preferência a 0,03 % em peso. Os inventores observaram que, para essas espessuras, a presença de Mn torna mais difícil o controle da estrutura granular e pode afetar, ao mesmo tempo, as propriedades mecânicas e a tenacidade.

Fe e Si afetam geralmente as propriedades de tenacidade. A quantidade de Fe deveria, de preferência, ser limitada a 0,1 % em peso e a quantidade de Si deveria, de preferência, ser limitada a 0,1 % em peso (de preferência, a 0,05 % em peso). Todos os outros elementos deveriam também, de preferência, ser limitados a 0,1 % em peso (de preferência, a 0,05 % em peso).

Os inventores descobriram que, se o teor em cobre for superior a 3,4 % em peso, as propriedades de tenacidade poderão em certos casos cair rapidamente. Para certos modos de realização da invenção, é recomendado não ultrapassar um teor em cobre de 3,3 % em peso. De maneira preferida, o teor em cobre é superior a 3,0 % ou mesmo 3,1 % em peso.

Os presentes inventores observaram que os teores em Zr superiores a 0,13 % em peso podem, em certos casos, levar a um desempenho de tenacidade inferior. Independentemente, a razão dessa queda de tenacidade, os inventores descobriram que o teor em Zr superior conduzia a uma formação de fases primárias Al_3Zr . Nesse caso, uma temperatura de fundição elevada pode ser utilizada, a fim de evitar a formação das fases primárias, mas isto pode levar a menor qualidade do metal líquido, em termos de inclusão e de teor em gás. É por isso que os presentes inventores consideram que o Zr deveria vantajosamente não exceder 0,13 % em peso.

Os inventores descobriram que se o teor em Li for inferior a 0,8 % em peso ou mesmo 0,9 % em peso, a melhoria da resistência mecânica será muito pequena. Em certos casos, pode ser vantajoso que o teor em Li seja $> 0,9$ % em peso. Também, com esses baixos teores em Li, a diminuição da densidade da liga será muito pequena. Para um teor em Li superior a 1,4 % até mesmo superior a 1,2 % em peso ou mesmo superior a 1,1 % em,

peso, a tenacidade é reduzida de forma significativa. Também, esses teores em Li elevados têm muitas desvantagens ligadas notadamente à estabilidade térmica, a fundição e ao custo das matérias-primas.

O acréscimo de Ag é uma característica essencial da invenção.

5 Os desempenhos em resistência mecânica e em tenacidade observados pelos inventores não são habitualmente atingidos para ligas que não contêm prata. Os inventores pensam que a prata exerce um papel quando da formação das fases de endurecimento, contendo o cobre, formadas durante o envelhecimento natural ou artificial e permite em particular a formação de fases
10 mais finas e uma distribuição mais homogênea dessas fases. O efeito vantajoso de Ag é observado para um teor desse elemento superior a 0,1 % em peso e preferencialmente superior a 0,2 % em peso. De forma a limitar o custo associado ao acréscimo de Ag, pode ser vantajoso não exceder 0,5 % em peso ou mesmo 0,4 % em peso.

15 O acréscimo de Mg melhora a resistência mecânica e diminui a densidade. Uma adição excessiva de Mg teria todavia um efeito nefasto sobre a tenacidade. Em uma realização vantajosa da invenção, o teor em Mg é limitado a 0,4 % em peso. Os inventores pensam que o acréscimo de Mg poderia também ter um papel durante a formação das fases contendo cobre.

20 O banho de metal líquido tendo uma composição, de acordo com a invenção, é em seguida fundido. A presente invenção permite obter um produto laminado, extrudado e/ou forjado, cuja espessura está, de uma forma vantajosa, compreendida entre 0,8 e 12 mm e de preferência entre 2 e 12 mm.

25 De acordo com um modo de realização vantajoso da presente invenção, uma liga que tem quantidades ajustadas de elementos de liga é fundida sob a forma de placa. A placa é em seguida homogeneizada a 490 a 530°C, durante 5 a 60 horas. Os inventores observaram que as temperaturas de homogeneização superiores a 530°C podem tender a reduzir o desempenho de tenacidade em certos casos.
30

Antes da laminação a quente, as placas são aquecidas a 490 a 530°C, durante 5 a 30 horas. Uma laminação a quente é feita para se obter

uma espessura compreendida entre 4 e 12 mm. Para uma espessura de aproximadamente 4 mm ou menos, uma etapa de laminação a frio pode ser acrescentada, se necessário. A chapa obtida tem uma espessura compreendida, de preferência, entre 0,8 e 12 mm, e a invenção é mais vantajosa para chapas de 2 a 12 mm de espessura e mesmo 2 a 9 mm e ainda mais vantajosa para chapas de 3 a 7 mm de espessura. As chapas são em seguida colocadas em solução, por exemplo por tratamento térmico entre 490 e 530°C durante 15 minutos a 2 horas, depois temperadas com água à temperatura ambiente ou preferencialmente a água fria.

- 5 O produto sofre em seguida uma tração controlada de 1 a 5 % e preferencialmente de 2,5 a 4 %. Esses níveis de martelamento a frio podem também ser obtidos por laminação a frio, planagem, forja ou uma combinação desses métodos e da tração controlada. De maneira vantajosa, o martelamento a frio total, após têmpera está compreendido entre 2,5 e 4 %. Em particular, quando uma operação de planagem é feita entre a têmpera e a tração controlada e que nenhuma outra deformação a frio é realizada, pode ser vantajoso que a deformação por tração controlada esteja compreendida entre 1,7 e 3,5 %. Os inventores observaram que a tenacidade tende a diminuir, quando a deformação por tração controlada é superior a 5 %. Além disso, os resultados de Kahn test, em particular E_g tende a diminuir para deformações permanentes superiores a 5 %. É dessa forma recomendado não ultrapassar uma deformação permanente de 5 %. Por outro lado, se a tração for superior a 5 %, poderão ser encontradas dificuldades industriais, tais como uma utilização elevada assim como dificuldades de enformação, o que aumentaria o custo do produto.

- 25 Um revenido é realizado a uma temperatura compreendida entre 140 e 170°C durante 5 a 30 horas, o que permite conseguir um estado T8. Em certos casos e, em particular, para as composições preferidas e mais preferidas da tabela 1 o revenido é mais preferencialmente realizado, entre 30 140 e 155°C durante 10 a 30 horas. Temperaturas de revenido baixas favorecem geralmente uma elevada tenacidade. Em um modo de realização da presente invenção, a etapa de revenido é dividido em duas etapas: uma eta-

pa de pré-revenido anterior a uma operação de soldagem, e um tratamento térmico final de um elemento de estrutura soldado. No âmbito da presente invenção, uma soldagem por atrito-malaxagem é uma técnica de soldagem preferida.

5 As chapas, de acordo com a invenção, têm propriedades vantajosas para microestruturas recristalizadas, não recristalizadas ou mistas (isto é, compreendendo zonas recristalizadas e zonas não recristalizadas). Em certos casos, os inventores observaram que podia ser vantajoso evitar as microestruturas mistas: para as chapas cuja espessura está compreendida
10 entre 4 e 12 mm, pode ser vantajoso que a microestrutura seja completamente não recristalizada.

As características das chapas obtidas, de acordo com a invenção, estão no estado T8:

- o limite de elasticidade convencional $R_{p0,2}$ no sentido L é, de preferência, de pelo menos 440 MPa, preferencialmente de pelo menos 450 MPa ou mesmo de pelo menos 460 MPa;

- a resistência à ruptura R_m no sentido L é, de preferência, de pelo menos 470 MPa preferencialmente de pelo menos 480 MPa ou mesmo de pelo menos 490 MPa;

20 - as propriedades de tenacidade utilizando amostras CCT760 (com $2a_0 = 253$ mm) são tais como:

K_{app} na direção T-L é, de preferência, de pelo menos 110 MPa $\sqrt{m}$ e preferencialmente de pelo menos 130 MPa $\sqrt{m}$ ou mesmo de pelo menos 140 MPa $\sqrt{m}$;

25 K_{app} na direção L-T é de pelo menos 150 MPa $\sqrt{m}$ e preferencialmente de pelo menos 170 MPa $\sqrt{m}$;

K_{eff} na direção T-L é de pelo menos 130 MPa $\sqrt{m}$ e preferencialmente de pelo menos 150 MPa $\sqrt{m}$;

30 K_{eff} na direção L-T é de pelo menos 170 MPa $\sqrt{m}$ ou mesmo de pelo menos 190 MPa $\sqrt{m}$ e preferencialmente de pelo menos 230 MPa $\sqrt{m}$;

$\Delta a_{eff(max)}$, a extensão de fissura do último ponto válido da curva R na direção T-L é de preferência de pelo menos 30 mm e preferencialmente

de pelo menos 40 mm;

$\Delta a_{\text{eff(max)}}$, a extensão de fissura do último ponto válido da curva R na direção L-T é de preferência de pelo menos 50 mm.

5 A enformação da chapa da invenção pode vantajosamente ser feita por encaixe profundo, estiramento, fluotorneamento, rodagem ou dobra, essas técnicas sendo conhecidas do técnico.

Na ligação de peças estruturais, todas as técnicas conhecidas e possíveis de rebitemento e de soldagem apropriadas para ligas em alumínio podem ser utilizadas, se desejado. Essa chapa pode ser fixada em enrijece-
10 dores ou armações, por exemplo por rebitemento ou soldagem. Os inventores descobriram que se a soldagem for escolhida, pode ser preferível aplicar técnicas de soldagem à baixa temperatura, que ajudam a garantir que a zona afetada termicamente seja tão pequena quanto possível. Em relação a isso, a soldagem a laser e a soldagem por atrito-malaxagem dão freqüente-
15 mente resultados particularmente satisfatórios. No âmbito da invenção, a soldagem por atrito-malaxagem é o método de soldagem preferido. As juntas soldadas, de acordo com a invenção, obtidas vantajosamente por soldagem por atrito-malaxagem têm um coeficiente de eficácia da junta superior a 70 % e, de preferência, superior a 75 %. Esse resultado vantajoso é obtido que
20 o revenido seja praticado antes ou depois a operação de soldagem.

Um elemento de estrutura, formado de pelo menos um produto, de acordo com a invenção, em particular de uma chapa, de acordo com a invenção, e de enrijecedores ou de armações, esses enrijecedores ou arma-
25 ções sendo de preferência constituídos de perfilados extrudados, pode ser utilizado em particular para a fabricação de painéis de fuselagem de aeronaves, da mesma forma que qualquer outra utilização na qual as propriedades poderiam ser vantajosas.

De acordo com a invenção, elementos de estruturas, enrijecedores, e/ou painéis de fuselagem, podem ser fabricados a partir de produtos
30 laminados, extrudados e/ou forjados obtidos. Os inventores descobriram que a chapa da invenção tem propriedades mecânicas estáticas particularmente favoráveis e uma elevada tenacidade. Para produtos conhecidos, as chapas

de elevada tenacidade têm geralmente pequenos limites de elasticidade e resistência à ruptura. Para a chapa da invenção, as propriedades mecânicas elevadas favorecem uma aplicação industrial para partes estruturais de aeronave, o limite de elasticidade e a resistência à ruptura dessa chapa sendo

5 características que são diretamente consideradas para o cálculo de elementos de estrutura e, em particular, de painéis de fuselagem, compreendendo chapas e/ou enrijecedores, de acordo com a invenção, mostraram uma possibilidade de redução de peso em relação a elementos de estrutura de propriedades comparáveis compreendendo apenas chapas da técnica anterior

10 em liga 2024, 2056, 2098, 7475 ou 6156. Essas reduções de peso são, em geral, de 1 a 10 % e, em certos casos, reduções de peso mesmo superiores podem ser alcançadas.

A título de exemplo, em uma peça de forma e dimensões determinadas, a simples substituição da liga 2024 por uma liga, de acordo com a

15 invenção, sem redimensionar o elemento de estrutura, em função da melhoria das características mecânicas, pode permitir uma redução de peso da ordem de 3 a 3,5 %.

As características mecânicas elevadas das ligas, de acordo com a invenção, permitem desenvolver produtos de uma dimensão e forma mais

20 leve ainda o que permite atingir ou mesmo ultrapassar uma redução de peso de 10 %.

A chapa da invenção não induz geralmente nenhum problema particular durante operações posteriores de tratamento de superfície classicamente utilizadas em construção aeronáutica.

25 A resistência à corrosão intergranular da chapa da invenção é geralmente elevada; a título de exemplo, detectam-se em geral picotes, quando o metal é submetido a um teste de corrosão. Em um modo de realização preferido da invenção, a chapa da invenção pode ser utilizada sem colocação.

30 Esses aspectos, assim como outros da invenção são explicados mais detalhadamente com o auxílio do seguinte exemplo ilustrativo e não limitador.

Exemplos

Exemplo 1

- Em relação com a presente invenção, vários materiais conhecidos são apresentados para fins de comparação (referências A a E). Eles compreendem, respectivamente, as ligas 2024, 2056, 7475, 6156 e 2098. Os exemplos da invenção são marcados com F a I. A composição química das diversas ligas testadas é fornecida na tabela 2.

Tabela 2: Composição química (% em peso)

Fundição	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Li	Ag	Ti
A (2024)	0,12	0,15	4,2	0,5	1,4	0,05	0,2	0,02	-	-	0,02
B(2056)	0,06	0,09	4,0	0,4	1,3	-	0,6	-	-	-	0,02
C(7475)	0,04	0,07	1,6	0,01	2,2	0,2	5,8	0,02	-	-	0,02
D(6156)	0,78	0,07	0,9	0,45	0,75		0,14	0,02	-	-	0,02
E(2098)	0,03	0,04	3,6	0,01	0,32			0,14	1,00	0,33	0,02
F	0,02	0,04	3,3	0,01	0,31			0,12	0,96	0,32	0,02
G	0,05	0,06	3,2	0,01	0,31			0,11	0,93	0,32	0,03
H	0,05	0,06	3,3	0,02	0,31		0,06	0,11	0,96	0,34	0,02
I	0,05	0,06	3,2	0,01	0,31			0,11	0,94	0,33	0,03
J	0,03	0,04	3,2	-	0,31	-	-	0,11	0,98	0,33	0,02
K	0,03	0,04	3,3	0,00	0,31	-	-	0,11	0,97	0,34	0,03

- A massa volúmica das diferentes ligas testadas é apresentada na tabela 3. As amostras F a I apresentam a menor massa volúmica dos diferentes materiais testados.

Tabela 3: massa volúmica das ligas testadas.

Referência	Massa volúmica (g/cm ³)
A (2024)	2,78
B (2056)	2,78
C (7475)	2,81
D (6156)	2,72
E (2098)	2,70
F, G, H, I, J, K	2,69

O processo utilizado para a fabricação das amostras de referência A a D é o processo industrial clássico, essas amostras de referência foram colo-

5 cadas. Os estados metalúrgicos finais para A, B, C e D eram, respectivamente, T3m T3, T76 e T6, segundo a norma EN573. O processo aplicado para fabricar as amostras E e F é apresentado na tabela 4. Em certos casos, uma etapa de aplainamento foi feita entre a têmpera e a tração controlada. Para fins de

10 comparação, as amostras E não foram transformadas com suas condições as mais habituais, que compreendem uma operação de tração controlada com um alongamento entre 5 e 10 %. A amostra E#3 sofreu um tratamento de recozimento antes da colocação em solução para fins de melhoria da tenacidade. O processo particular realizado pela amostra E#3, incluindo uma etapa suplementar, não seria favorável para uma aproximadamente industrial, em razão do aumento de custo ligado a essa etapa. Para as outras amostras fabricadas com a liga E, nenhuma etapa de recozimento foi realizada.

Tabela 4: condições das etapas consecutivas de transformação

	Referência E	Referências F e K	Referências G, H, I e J
Estado	T8	T8	T8
Expansão das placas	Sim	Sim	Sim
Homogeneização	8 h a 500°C + 36 h a 526°C	8 h a 500°C + 36 h a 526°C	12 h a 505°C
Pré-aquecimento, antes da laminação a quente	20 h a 520°C	20 h a 520°C	20 h a 520°C
Laminação a quente	Espessura > 4 mm	Espessura > 4 mm	Espessura > 4 mm
Laminação a frio	Espessura > 4 mm	Espessura > 4 mm	Espessura > 4 mm
Colocação em solução	2 h a 521°C	1 h a 517°C	30 min 505°C
Têmpera	Água fria	Água fria	Água fria
Tração controlada	1 a 5 % de deformação permanente	1 a 5 % de deformação permanente	1 a 5 % de deformação permanente
Revenido	14 h a 155°C	14 h a 155°C	14 h a 155°C

Para as referências G, H, I e J, a seleção precisa de composição permite uma dissolução completa, permanecendo a uma temperatura de colocação em solução significativamente inferior ao *solidus*.

- 5 Após revenido, foram cortadas as amostras nas dimensões desejadas. A tabela 5 fornece a referência das diferentes amostras e de suas dimensões.

Tabela 5: dimensões finais das amostras

Amostra	Espessura [mm]	Largura [mm]	Comprimento [mm]
A	6,0	2 000	3 000
B	6,0	2 000	3 000
C	6,3	1 900	4 000
D	4,6	2 500	4 500
E#1	2,0	1 000	2 500
E#2	3,2	1 000	2 500
E#3	4,5	1 250	2 500
E#31	4,5	1 250	2 500
E#4	6,7	1 250	2 500
F#1	3,0	1 000	2 500
F#2	5,0	1 250	2 500
F#3	6,7	1 250	2 500
G#1	3,8	2 450	9 600
H#1	5,0	2 450	9 600
I#1	5,0	1 500	3 000
K#1	2,0	1 000	2 500

- 10 As amostras foram testadas para determinar suas propriedades mecânicas estáticas da mesma forma que sal tenacidade. O limite de elasticidade $R_{p0,2}$, a resistência à ruptura R_m , e o alongamento à ruptura (A) são fornecidos na tabela 6.

Tabela 6: Propriedades mecânicas das amostras

Amostra	Espessura	Sentido L			Sentido LT		
		R _m (MPa)	R _{p0,2} (MPa)	A(%)	R _m (MPa)	R _{p0,2} (MPa)	A (%)
A	6,0	454	367	19,0	448	323	19,3
B	6,0	460	367	20,0	450	325	21,0
C	6,3	510	450	14,0	506	460	11,5
D	4,6	374	356	12,0	375	339	12,0
E#1	2,0	532	514	9,9	538	490	10,6
E#3	4,5	586	570	11,0	568	543	12,0
E#31	4,5	571	539	10,2	565	522	11,3
E#4	6,7	560	540	12,0	557	531	11,7
F#1	3,0	490	469	13,0	512	467	12,5
F#2	5,0	498	470	12,2	502	453	11,1
F#3	6,7	514	481	12,2	509	468	11,6
G#1	3,8	507	470	11,3	494	447	13,8
H#1	5,0	517	478	11,9	488	444	14,7
I#1	5,0	493	458	8,7	483	431	11,0
K#1	2,0	508	481	12,6	496	439	13,0

As propriedades mecânicas estáticas das amostras, de acordo com a invenção, são muito elevadas comparadas com a liga clássica da faixa 2XXX tolerantes aos danos, e da mesma ordem de grandeza que a amostra 7475 T76 referenciada com C. A resistência mecânica das amostras, de acordo com a invenção, é ligeiramente inferior à resistência mecânica da liga de referência E. Os inventores consideram que o teor em cobre inferior e o teor em zircônio inferior das amostras, de acordo com a invenção, influenciam ligeiramente sua resistência mecânica.

- 10 As curvas R de certas amostras, de acordo com a invenção, e das amostras E de referência são fornecidas nas figuras 1 e 2, para as direções T-L e L-T, respectivamente. A figura 1 mostra claramente que a extensão de fissura do último ponto válido da curva R ($\Delta a_{\text{eff}(\text{max})}$) é muito maior para as amostras da invenção do que para a amostra E#1, E#3, E#31 e E#4.
- 15 Esse parâmetro é pelo menos tão crítico quanto os valores K_{app} , devido ao fato de, conforme explicado na descrição da técnica anterior, o comprimento

da curva R é um parâmetro importante para a concepção da fuselagem. A figura 2 mostra a mesma tendência, embora a direção L-T dê intrinsecamente um melhor resultado. A curva R da amostra F#3 não pôde ser medida na direção L-T, pois a carga máxima da máquina foi atingida. A tabela 7 resume os resultados dos testes de tenacidade. Para as chapas, de acordo com a invenção, o valor de K_{app} no sentido T-L é superior a 110 MPa√m, e mesmo superior a 130 MPa√m, enquanto que para as amostras E em liga 2098 de referência o valor de K_{app} no sentido T-L é inferior a 110 MPa√m à parte para a amostra E#3 que sofreu uma etapa especial de recozimento, antes colocada em solução.

Tabela 7: resultados dos testes de tenacidade

Amostra	Espessura [mm]	T-L (amostra de largura 760 mm)		L-T (amostra de largura 760 mm)	
		K_{app} (MPa√m)	K_{eff} (MPa√m)	K_{app} (MPa√m)	K_{eff} (MPa√m)
A	6,0	114	160	130	180
B	6,0	140	220	150	236
C	6,3	110	135	150	206
D	4,6	125	178	147	214
E#1	2,0	95	108	114	131
E#2	3,1	104	114	160	200
E#3	4,5	154	174	148	188
E#31	4,5	106	126	143	162
E#4	6,7	103	112	123	143
F#2	5,0	141	171	179	237
F#3	6,7	140	171	155	172
G#1	3,8	162	227	164	213
H#1	5,0	175	277	154	191
I#1	5,0	150	192		
K#1	2,0	140	182	158	213

Os resultados oriundos da curva R são agrupados na tabela 8. A extensão de fissura do último ponto válido da curva R é superior para as amostras da invenção do que para as amostras de referência. Assim, no sentido T-L, todas as amostras, de acordo com a invenção, atingem uma

extensão de fissura de pelo menos 30 mm e mesmo de pelo menos 40 mm, enquanto que a extensão máxima de fissura é inferior a 40 mm para as amostras de referência. Os inventores consideram que várias razões podem ser propostas para explicar esse desempenho, como o mais baixo teor em

5 Cu, e/ou o menor teor em Zr.

Tabela 8: dados de resumo da curva R.

Δa [mm]		10	20	30	40	50	60	70	80
K_r (Direção T-L) ($\text{MPa}=\sqrt{m}$)	E#1	86	106						
	E#3	125	161	-	-	-			
	E#31	97	112	123					
	E#4	96							
	F#2	113	141	159	170	178			
	F#3	104	136	156	168				
	G#1	115	146	167	184	198	210	221	230
	H#1	106	140	166	188	207	225	241	256
	I#1	122	147	164	177	188	198		
	K#1	113	139	156	168	178	186	192	198
K_r (Direção L-T) ($\text{MPa}=\sqrt{m}$)	E#1	96	120						
	E#3	115	141	159	174	185			
	E#31	123	152						
	E#4	102	128	140					
	F#2	122	159	185	206	225			
	G#1	123	153	173	189	203	214	224	233
	H#1	124	150	168	182	193	203	212	220
	K#1	115	149	171	188	201	212	221	228

As figuras 3 e 4 mostram a evolução da velocidade de fissuração da/dN (em mm/ciclo) na orientação T-L e L-T, respectivamente, para diferentes níveis de fator de intensidade de esforço (ΔK). A largura da amostra era de 400 mm (amostra CCT 400) e $R = 0,1$. Não se observa diferença maior entre as amostras E e F. A velocidade de fissuração da amostra F está na mesma faixa que naquela tipicamente obtida para a liga 2056 (Amostra B) e

inferior àquela obtida para a liga 6156 (Amostra D).

A resistência à corrosão intergranular foi testada, segundo a norma ASTM G110. Para todas as amostras, de acordo com a invenção, não se detectou nenhuma corrosão intergranular. Nenhuma corrosão intergranular não foi também detectada sobre as amostras em liga 2098 de referência (E#1 a E#4). Para a amostra B (para a qual se retirara a colocação), observou-se uma corrosão intergranular com uma profundidade média de 120 μm e para a amostra D (para a qual se retirara a colocação), observou-se uma corrosão inter granular com uma profundidade média de 180 μm . A resistência à corrosão intergranular era assim muito elevada para as amostras, de acordo com a invenção.

Exemplo 2

Nesse exemplo, a influência da taxa de deformação por tração foi estudada sobre amostras na escala do laboratório. Seis amostras provenientes da fundição H e transformadas em chapas de espessura 5 mm, segundo as condições descritas na tabela 4 foram deformadas por tração controlada com uma taxa de deformação permanente compreendido entre 1 e 5 %, depois sofreram um revenido de 18 horas a 155°C. As amostras foram testadas para determinar suas propriedades mecânicas estáticas da mesma forma que sua tenacidade. O limite de elasticidade $R_{p0,2}$, a resistência à ruptura R_m , e o alongamento à ruptura (A) são fornecidos na tabela 9.

Tabela 9: Propriedades mecânicas das amostras laboratório tendo diferentes taxas de deformação permanente

Amostra	Espessura	Sentido L			Sentido LT		
		R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A(%)	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)
H#11	1	495	436	11,2	469	411	15,1
H#12	2	515	469	11,1	489	444	13,5
H#13	3	529	493	10,5	501	464	13,8
H#14	4	534	501	10,8	501	465	14,2
H#15	5	542	514	10,8	511	481	13,8
H#16	6	550	524	10,4	516	485	13,9

As características mecânicas estáticas aumentam com a taxa de deformação permanente, quando da tração controlada. O essencial do aumento é atingido para uma taxa de deformação permanente de 3 %. Assim, o aumento de $R_m(L)$ é de 7 % para um aumento da taxa de deformação permanente de 1 a 3 %, enquanto que ela é somente de 3 % para um aumento de 4 a 6 %. A tenacidade foi avaliada pelo método dito *Kahn test*, os resultados são dados na tabela 10.

Tabela 10: Resultados do Kahn test feito sobre as amostras laboratório tendo diferentes taxas de deformação permanente.

		Kahn test
Amostra	Taxa de deformação permanente (%)	E_g (J)
H#11	1	30,5
H#12	2	29,2
H#13	3	27,8
H#14	4	25,1
H#15	5	25,0
H#16	6	20,6

A relação entre a energia global à ruptura E_g e a tenacidade é direta embora os valores de E_g não podem ser utilizados para pré-dizer os resultados da curva R de amostras largas em razão das geometrias diferentes dos testes. Pode-se observar que E_g diminui lentamente até uma deformação permanente de 5 % e diminui de forma mais brutal para uma deformação permanente de 6 %.

Exemplo 3

Nesse exemplo, a influência da taxa de deformação permanente obtida por tração controlada foi estudada sobre amostras industriais. Duas amostras oriundas da fundição J e transformadas em chapas de espessura de 5 mm, segundo as condições indicadas na tabela 4 foram aplainadas e sofreram uma tração controlada com uma taxa de deformação permanente de 1,8 % e 3,4 %. As amostras foram testadas para determinar suas propriedades mecânicas estáticas da mesma forma que sua tenacidade. O limite de elasticidade $R_{p0,2}$, a resistência à ruptura R_m , e o alongamento à ruptura

(A) são fornecidos na tabela 11.

Tabela 11: propriedades mecânicas das amostras industriais que têm diferentes taxas de deformação permanente

Amostra	Taxa de deformação permanente (%)	Sentido L			Sentido LT		
		R _m (MPa)	R _{p0,2} (MPa)	A(%)	R _m (MPa)	R _{p0,2} (MPa)	A (%)
J#11	1,8	510,0	465,0	13,1	497,7	444,3	14,5
J#12	3,4	534,0	499,0	10,7	515,0	475,0	13,7

- 5 As curvas R obtidas para as duas amostras na direção T-L são apresentadas na figura 5. A tabela 12 resume os resultados das curvas R. A amostra que sofreu uma deformação permanente de 1,8 % apresenta uma resistência mecânica mais fraca do que a amostra que sofreu uma deformação permanente de 3,4 %. Por outro lado, uma tenacidade muito elevada foi observada para as duas amostras.

- 10 **Tabela 12:** Resultados dos testes de tenacidade feitos sobre as amostras industriais que têm diferentes taxas de deformação permanente.

A-mos-tra	Taxa de deformação permanente	T-L (760 mm "wide specimen")									
		K _{app} (MPa√m)	K _{app} (MPa√m)	K _r (MPa√m)							
				Δa [mm]							
				10	20	30	40	50	60	70	80
J#11	1,8	140	220	11 8	15 2	17 7	19 8	21 6	23 2	24 6	26 0
J#12	3,4	179	259	13 5	16 0	18 1	19 9	21 7	23 4	25 0	26 3

Exemplo 4

- 15 Nesse exemplo, a resistência mecânica de juntas soldadas entre chapas da invenção ou entre chapas de referência foi avaliada. Chapas de espessura de 3,2 mm proveniente das fundições D (6156), E e I foram soldadas por soldagem por atrito-malaxagem. A soldagem foi feita sobre uma máquina MTS ISTIR ®. Os parâmetros de soldagem foram escolhidos com base em testes feitos quando de um estudo preliminar. A seleção dos parâmetros foi feita em função dos resultados de observações microestruturais e

de testes de dobra. Para as chapas provenientes das fundições E e I, as ligações foram feitas com uma velocidade de rotação do ferramenta de 800 rpm (rotações por minuto) e uma velocidade de soldagem de 300 mm/min. Para chapas provenientes da fundição D, as ligações foram feitas com uma

5 velocidade de rotação da ferramenta de 510 rpm (rotações por minuto) e uma velocidade de soldagem de 900 mm/min.

O revenido foi feito seja antes, seja após a ligação por soldagem por atrito-malaxagem. Os resultados são dados na tabela 13. O desempenho das juntas soldadas obtidas com as chapas, de acordo com a invenção, foi

10 particularmente satisfatório por dois aspectos. Em primeiro lugar, o coeficiente de eficácia da junta, que é a relação entre a resistência à ruptura da junta soldada e aquela da chapa não soldada, é superior a 70 % e mesmo superior a 75 % para as chapas da invenção. Esse coeficiente atinge mesmo 80 % em certos casos. Esse resultado é melhor do que aquele obtido com chapas

15 provenientes da fundição E. Em segundo lugar, os resultados são pouco influenciados pela posição da etapa de revenido (antes ou depois da soldagem), o que permite um processo flexível. Ao contrário, para as chapas obtidas a partir da fundição D(6156), observa-se uma influência importante da posição da etapa de revenido.

20 Tabela 13: propriedades mecânicas das juntas soldadas.

Fun- dição	Posição da etapa de revenido	<i>Mechanical strength of the joint</i>			R _m de refe- rência para as chapas não solda- das (MPa)	Coefici- ente de eficácia da junta (%)
		R _m (Mpa)	R _{p0,2} (MPa)	A (%)		
D	Antes da soldagem	264	200	200	372	71
D	Após a soldagem	318	292	292	372	86
E	Antes da soldagem	386	262	269	543	71
E	Após a soldagem	413	309	5,6	543	76
F	Antes da soldagem	385	309	5,2	483	80
F	Após a soldagem	377	279	5,9	483	78

Exemplo 5

Nesse exemplo, a influência do teor em Zr e Mn sobre as características mecânicas estáticas e a tenacidade foi avaliada.

- 5 Duas ligas foram fundidas e transformadas em chapas de espessura 6 mm, segundo as condições indicadas para as amostras G, H e I da tabela 4. As composições dessas ligações são dadas na tabela 14.

Tabela 14: Composição química (% em peso) das ligas contendo Mn

Referência de fundição	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zr	Li	Ag	Ti
L	0,03	0,05	3,3	0,31	0,32	0,05	0,99	0,32	0,02
M	0,03	0,05	3,3	0,30	0,33	0,11	0,98	0,35	0,02

- 10 As amostras foram testadas para determinar suas propriedades mecânicas estáticas da mesma forma que sua tenacidade. O limite de elasticidade $R_{p0,2}$, a resistência à ruptura R_m , e o alongamento à ruptura (A) são fornecidos na tabela 15 e os resultados dos testes de tenacidade na tabela 16.

Tabela 15: propriedades mecânicas das amostras provenientes de ligas contendo Mn

Amostra	Espessura	Sentido L			Sentido LT		
		R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)
L	6,0	479	447	13,5	477	419	7,8
M	6,0	494	464	13,7	493	448	13,1

- 15 Tabela 16: Resultados dos testes de tenacidade para as ligas contendo Mn

Amos- tra	Espessura (mm)	T-L (760 mm "wide specimen")									
		K_{app} (MPa√m)	K_{app} (MPa√m)	$K_{r(MPa\sqrt{m})}$							
				Δa [mm]							
				10	20	30	40	50	60	70	80
L	6,0	140	174	11 1	13 7	15 5	16 8	17 8	18 7	19 4	20 0
M	6,0	158	198	12 3	15 2	17 1	18 6	19 9	20 9	21 9	22 7

As amostras L e M atingem as características mecânicas, de

acordo com a invenção, no estado T8. Por outro lado, os desempenhos em resistência mecânica estática e em tenacidade são piores para a amostra L, que contém Mn e um baixo teor em Zr, do que para os outros exemplos, de acordo com a invenção. Os inventores pensam que o pior desempenho da amostra L está ligado a uma microestrutura menos favorável, caracterizada, em particular, pela presença de zonas recristalizadas e de zonas não recristalizadas (microestrutura mista).

REIVINDICAÇÕES

1. Processo de fabricação de uma chapa à base de liga de alumínio, tendo uma tenacidade e uma resistência mecânica elevadas, no qual:

- 5 a) se elabora um banho de metal líquido, compreendendo 2,7 a 3,4 % em peso de Cu, 0,8 a 1,4 % em peso de Li, 0,1 a 0,8 % em peso de Ag, 0,2 a 0,6 % em peso de Mg e pelo menos um elemento escolhido dentre Zr, Mn, Cr, Sc, Hf e Ti, a quantidade desse elemento, se for escolhido, sendo de 0,05 a 0,13 % em peso para Zr, 0,05 a 0,8 % em peso para Mn, 0,05 a 0,3 % em peso para Cr e para Sc, 0,05 a 0,5 % em peso para Hf e de 0,05 a 10 0,15 % em peso para Ti,

o resto sendo o alumínio e impurezas inevitáveis,

com a condição suplementar que a quantidade de Cu e de Li seja tal que

$$\text{Cu (\% em peso)} + 5/3 \text{ Li (\% em peso)} < 5,2;$$

- 15 b) se funde uma placa a partir desse banho de metal líquido;
c) se homogeneiza essa placa a uma temperatura compreendida entre 490 e 530°C durante um período de 5 a 60 horas;
d) se lamina essa placa em uma chapa que tem uma espessura final compreendida entre 0,8 e 12 mm;
20 e) se coloca em solução e se tempera essa chapa;
f) se traciona de forma controlada essa chapa com uma deformação permanente de 1 a 5 %;
g) se realiza um revenido dessa chapa por aquecimento a 140 a 170°C durante 5 a 30 horas.

25 2. Processo de acordo com a reivindicação 1, no qual essa espessura final está compreendida entre 2 e 12 mm.

3. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 ou 2, no qual o teor em cobre desse banho de metal líquido está compreendida entre 3,0 e 3,4 % em peso.

30 4. Processo de acordo com a reivindicação 3, no qual o teor em cobre desse banho de metal líquido está compreendido entre 3,1 e 3,3 % em peso.

5. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, no qual o teor em lítio desse banho de metal líquido está compreendido entre 0,8 e 1,2 % em peso.

6. Processo de acordo com a reivindicação 5, no qual o teor em lítio desse banho de metal líquido está compreendido entre 0,9 e 1,1 % em peso.

7. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, no qual o teor em prata desse banho de metal líquido está compreendido entre 0,2 e 0,5 % em peso.

8. Processo de acordo com a reivindicação 7, no qual o teor em prata desse banho de metal líquido está compreendida entre 0,2 e 0,4 em peso.

9. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, no qual o teor em magnésio desse banho de metal líquido é inferior a 0,4 % em peso.

10. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 9, no qual o teor em zircônio desse banho de metal líquido está compreendido entre 0,05 e 0,13 % em peso e o teor em escândio está compreendido entre 0,02 e 0,3 % em peso.

11. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 10, no qual o teor em zircônio desse banho de metal líquido está compreendido entre 0,09 e 0,13 % em peso.

12. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 11, no qual o teor em manganês desse banho de metal líquido é inferior a 0,05 % em peso.

13. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 12, no qual o martelamento a frio total após têmpera está compreendido entre 2,5 e 4 %.

14. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 13, no qual essa deformação permanente obtida por tração controlada está compreendida entre 2,5 e 4 %.

15. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1

a 14, no qual esse revenido é realizado por aquecimento a 140-155°C, durante 10 a 30 horas.

16. Processo de fabricação de uma chapa de acordo com a reivindicação 1, no qual:

- 5 a) se elabora um banho de metal líquido, compreendendo 3,0 a 3,4 % em peso de Cu, 0,8 a 1,2 % em peso de Li, 0,2 a 0,5 % em peso de Ag, 0,2 a 0,6 % em peso de Mg e pelo menos um elemento escolhido dentre Zr, Mn, Cr, Sc, Hf e Ti, a quantidade desse elemento, se for escolhido, sendo de 0,09 a 0,13 % em peso para Zr, 0,05 a 0,8 % em peso para Mn, 0,05 a 10 0,3 % em peso para Cr e para Sc, 0,05 a 0,5 % em peso para Hf e de 0,05 a 0,15 % em peso para Ti,

o resto sendo o alumínio e impurezas inevitáveis,

com a condição suplementar que a quantidade de Cu e de Li seja tal que

- 15
$$\text{Cu (\% em peso)} + 5/3 \text{ Li (\% em peso)} < 5,0;$$

b) se funde uma placa a partir desse banho de metal líquido;

c) se homogeneiza essa placa a uma temperatura compreendida entre 490 e 530°C durante um período de 5 a 60 horas;

- d) se lamina essa placa em uma chapa que tem uma espessura 20 final compreendida entre 2 e 9 mm;

e) se coloca em solução essa chapa a uma temperatura compreendida entre 490 e 530°C, por um período de 15 min a 2 horas, e se tempera essa chapa;

- f) se traciona de forma controlada essa chapa com uma deformação permanente de 2,5 a 4 %;

g) se realiza um revenido dessa chapa por aquecimento a 140 a 155°C durante 10 a 30 horas.

17. Produto laminado, extrudado e/ou forjado em liga de alumínio, compreendendo 2,7 a 3,4 % em peso de Cu, 0,8 a 1,4 % em peso de Li, 30 0,1 a 0,8 % em peso de Ag, 0,2 a 0,6 % em peso de Mg e pelo menos um elemento escolhido dentre Zr, Mn, Cr, Sc, Hf e Ti, a quantidade desse elemento, se for escolhido, sendo de 0,05 a 0,13 % em peso para Zr, 0,05 a 0,8

% em peso para Mn, 0,05 a 0,3 % em peso para Cr e para Sc, 0,05 a 0,5 % em peso para Hf e de 0,05 a 0,15 % em peso para Ti,

o resto sendo o alumínio e impurezas inevitáveis,

com a condição suplementar que a quantidade de Cu e de Li

5 seja tal que:

$$\text{Cu (\% em peso)} + 5/3 \text{ Li (\% em peso)} < 5,2.$$

18. Produto laminado, extrudado e/ou forjado, de acordo com a reivindicação 17, tendo uma espessura compreendida entre 0,8 e 12 mm e, de preferência, entre 2 e 12 mm.

10 19. Produto de acordo com a reivindicação 17, ou a reivindicação 18, no qual o teor em Cu é superior a 3,0 % em peso, o teor em Li é inferior a 1,2 % em peso, o teor em Ag está compreendido entre 0,2 e 0,5 % em peso, o teor em Zr, se for escolhido, é superior a 0,09 % em peso, e no qual a quantidade de Cu e de Li seja tal que $\text{Cu (\% em peso)} + 5/3 \text{ Li (\% em peso)} < 5,0$.

15 20. Chapa em liga de alumínio produzida pelo processo, como definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 16, caracterizado pelo fato de, no estado T8:

(a) seu limite de elasticidade convencional medida a 0,2 % de alongamento no sentido L ser de pelo menos 440 MPa e

(b) sua tenacidade K_{app} , medida sobre amostras de tipo CCT760 (com $2a_0 = 253 \text{ mm}$), ser de pelo menos $110 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ no sentido T-L; e

(c) sua extensão de fissura $\Delta a_{eff(max)}$ do último ponto válido da curva R na direção T-L ser de pelo menos 30 mm.

25 21. Chapa em liga de alumínio produzida pelo processo, como definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 16, caracterizado pelo fato de no estado T8:

(a) seu limite de elasticidade convencional medida a 0,2 % de alongamento no sentido L ser de pelo menos 460 MPa, e

30 (b) sua tenacidade K_{app} , medida sobre amostras de tipo CCT760 (com $2a_0 = 253 \text{ mm}$), ser de pelo menos $130 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ no sentido T-L; e

(c) sua extensão de fissura $\Delta a_{eff(max)}$ do último ponto válido da

curva R na direção T-L ser de pelo menos 40 mm.

22. Elemento de estrutura, incorporando pelo menos um produto como definido em qualquer uma das reivindicações 17 a 21 ou fabricado a partir desse produto.

5 23. Elemento de estrutura, de acordo com a reivindicação 22, caracterizado pelo fato de se tratar de um painel de fuselagem de aeronave.

24. Elemento de estrutura, de acordo com a reivindicação 22, quando dependente das reivindicações 17 a 19, caracterizado pelo fato de se tratar de um enrijecedor.

10 25. Elemento de estrutura de acordo com qualquer uma das reivindicações 22 a 24, compreendendo uma construção soldada na qual o coeficiente de eficácia da junta é superior a 70 %.

26. Elemento de estrutura de acordo com a reivindicação 25, no qual essa construção soldada é soldada por soldagem por atrito malaxagem.

15 27. Painel de fuselagem de acordo com a reivindicação 23, cujo peso é de 1 a 10 % inferior ao peso de um painel fuselagem de propriedade comparável, cujas chapas são em uma liga selecionada no grupo formado pelas ligas 2024, 2056, 2098, 7475 e 6156.

20 28. Elemento de estrutura de acordo com a reivindicação 22, cujo peso é de 1 a 10 % inferior ao peso de um elemento de estrutura de propriedade comparável cujas chapas são em uma liga selecionada no grupo formado pelas ligas 2024, 2056, 2098, 7475 e 6156.

FIG 1

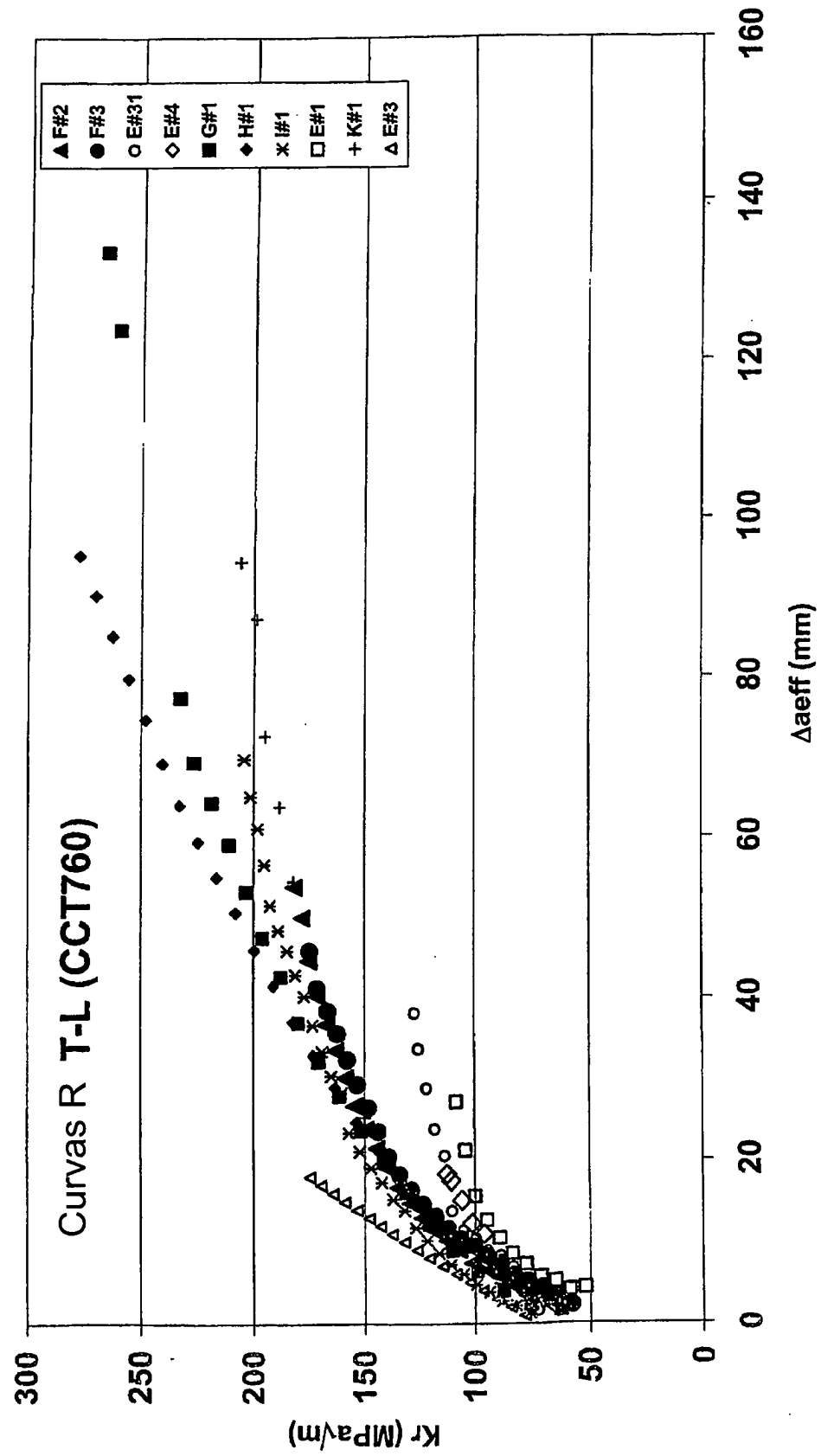


FIG 2

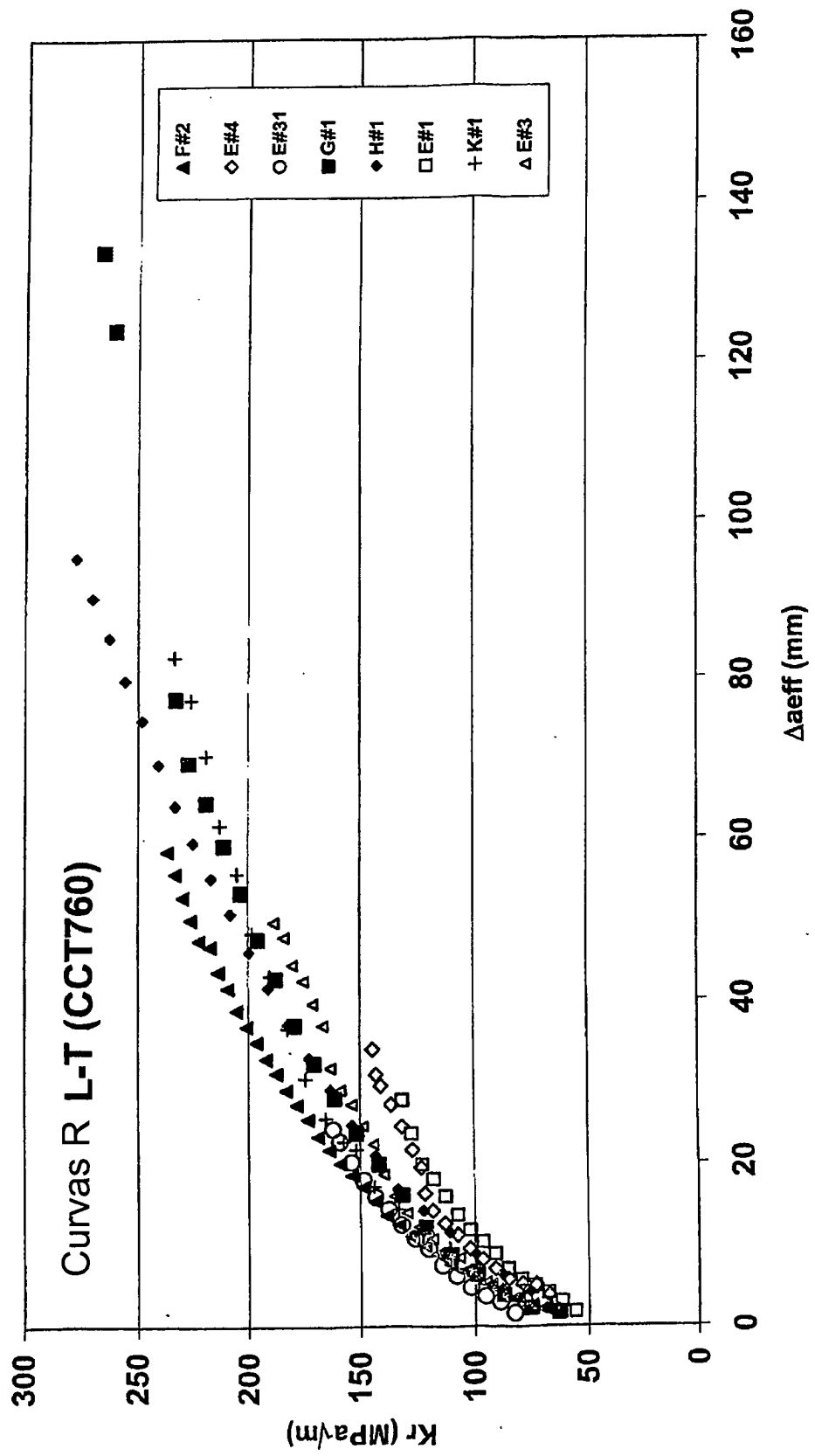


FIG 3

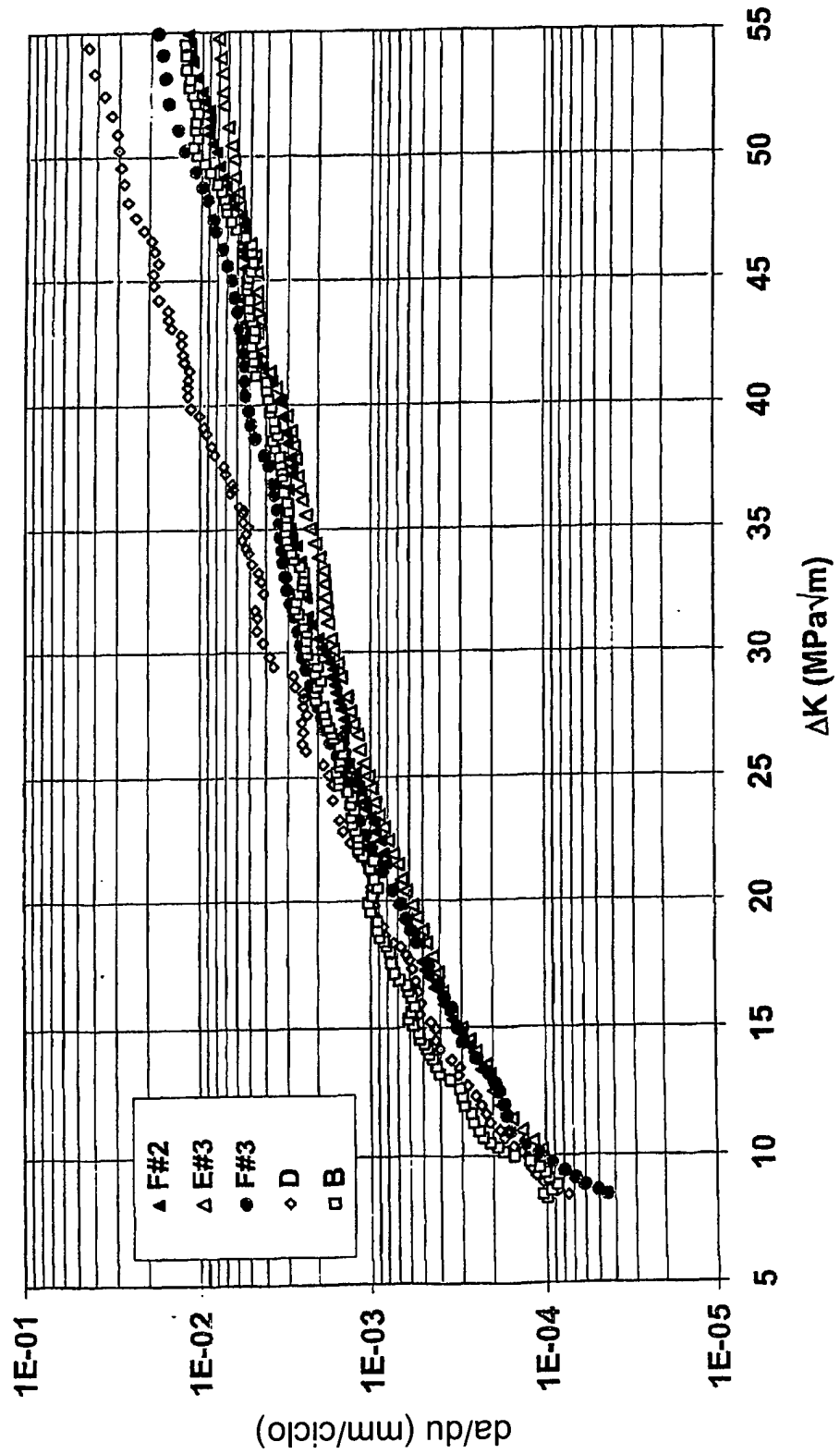


FIG 4

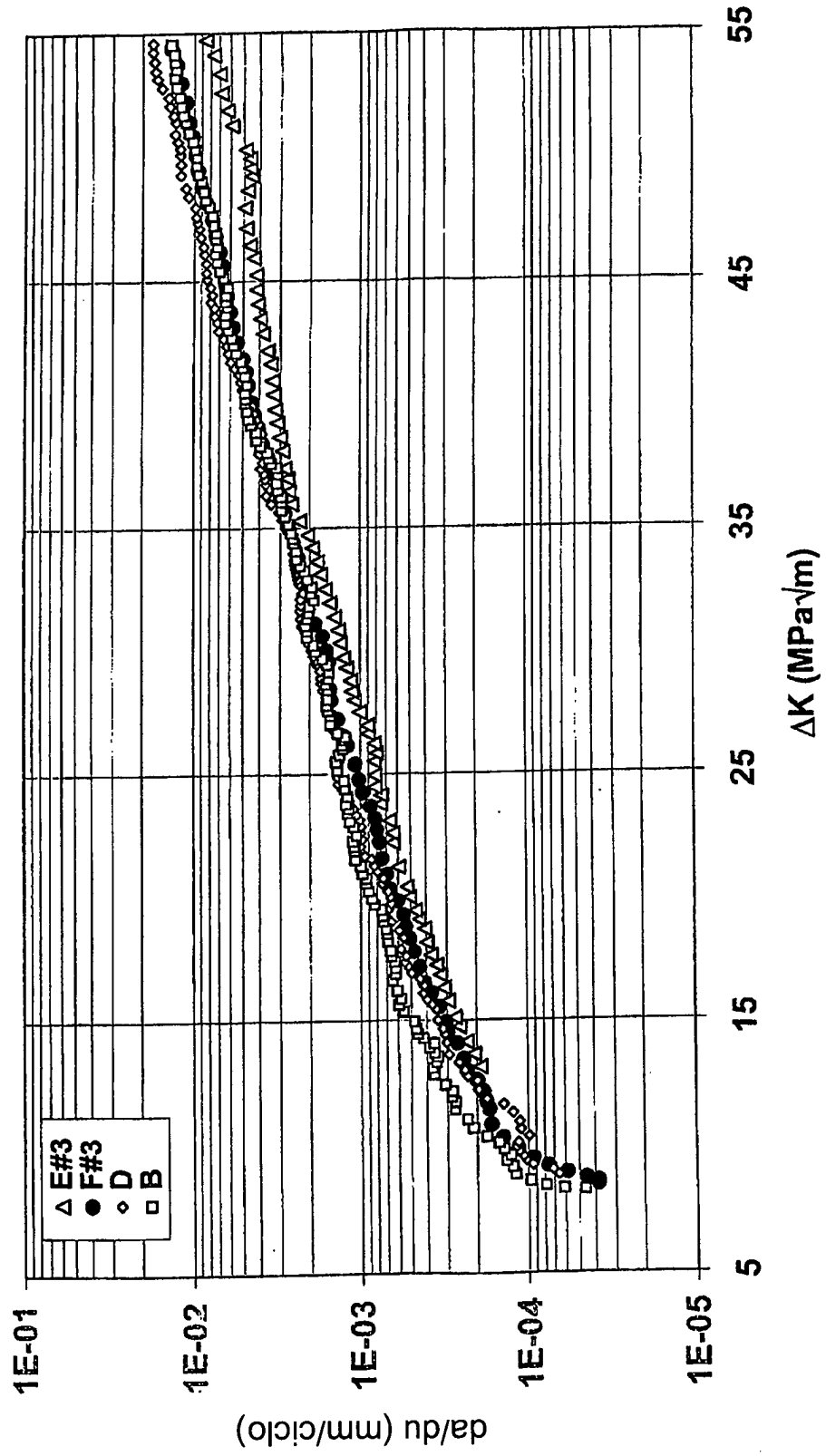
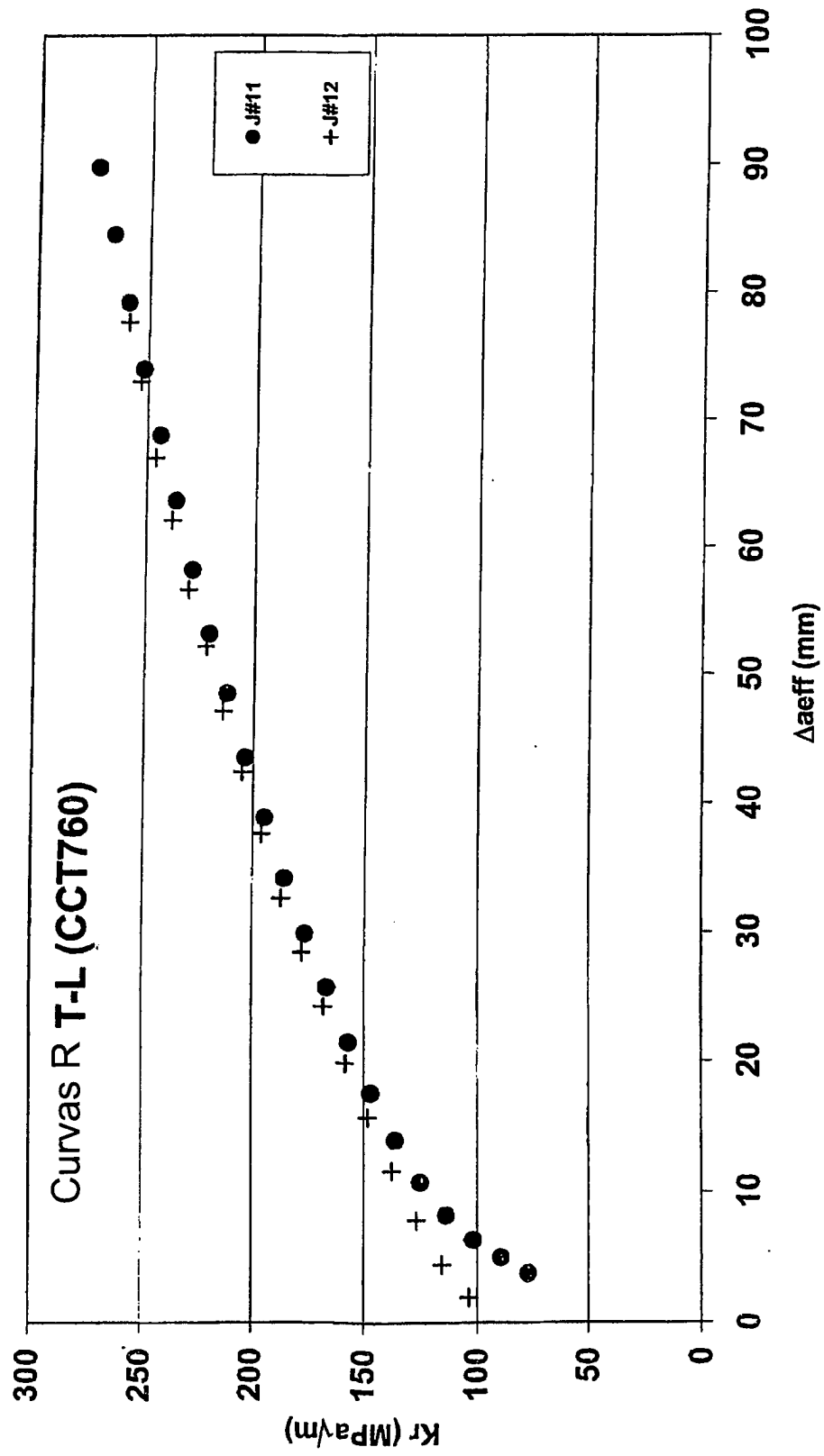


FIG 5



RESUMO

Patente de Invenção: "CHAPA EM ALUMÍNIO-COBRE-LÍTIO DE ELEVADA TENACIDADE PARA FUSELAGEM DE AVIÃO".

Uma liga à base de alumínio de pequena massa volúmica útil em uma estrutura de aeronave para as aplicações de chapa de fuselagem que tem uma resistência mecânica elevada, uma elevada tenacidade e uma elevada resistência à corrosão, compreendendo % em peso, 2,7 a 3,4 % em peso de Cu, 0,8 a 1,4 % em peso de Li, 0,1 a 0,8 % em peso de Ag, 0,2 a 0,6 % de Mg e um elemento, tal como Zr, Mn, Cr, Sc, Hf e Ti, ou uma combinação destes, cuja quantidade, em % em peso, é de 0,05 a 0,13 % para Zr, 0,05 a 0,8 % para Mn, 0,05 a 0,3 % para Cr e para Sc, 0,05 a 0,5 % para Hf e de 0,05 a 0,15 % para Ti. A quantidade de Cu e de Li é determinada segundo a fórmula $Cu (\% \text{ em peso}) + 5/3 Li (\% \text{ em peso}) < 5,2$.

Novo quadro reivindicatório (total de 23 reivindicações), incorporando as emendas às reivindicações conforme Relatório de Exame Preliminar.

REIVINDICAÇÕES

1. Processo de fabricação de uma chapa à base de liga de alumínio, tendo uma tenacidade e uma resistência mecânica elevadas, no qual:

- 5 a) se elabora um banho de metal líquido, compreendendo 3,0 a 3,4 % em peso de Cu, 0,8 a 1,2 % em peso de Li, 0,2 a 0,5 % em peso de Ag, 0,2 a 0,6 % em peso de Mg e pelo menos um elemento escolhido dentre Zr, Mn, Cr, Sc, Hf e Ti, a quantidade desse elemento, se for escolhido, sendo de 0,05 a 0,13 % em peso para Zr, 0,05 a 0,8 % em peso para Mn, 0,05 a 0,3 % em peso para Cr e para Sc, 0,05 a 0,5 % em peso para Hf e de 0,05 a 10 0,15 % em peso para Ti,

o resto sendo o alumínio e impurezas inevitáveis,

com a condição suplementar que a quantidade de Cu e de Li seja tal que

$$\text{Cu (\% em peso)} + 5/3 \text{ Li (\% em peso)} < 5,2;$$

- 15 b) se funde uma placa a partir desse banho de metal líquido;
c) se homogeneiza essa placa a uma temperatura compreendida entre 490 e 530°C durante um período de 5 a 60 horas;
d) se lamina essa placa em uma chapa que tem uma espessura final compreendida entre 0,8 e 12 mm;
20 e) se coloca em solução e se tempera essa chapa;
f) se traciona de forma controlada essa chapa com uma deformação permanente de 1 a 5 %;
g) se realiza um revenido dessa chapa por aquecimento a 140 a 170°C durante 5 a 30 horas.

25 2. Processo de acordo com a reivindicação 1, no qual essa espessura final está compreendida entre 2 e 12 mm.

3. Processo de acordo com a reivindicação 1 ou a reivindicação 2, no qual o teor em cobre desse banho de metal líquido está compreendido entre 3,1 e 3,3 % em peso.

30 4. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 3, no qual o teor em lítio desse banho de metal líquido está compreendido entre 0,9 e 1,1 % em peso.

5. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, no qual o teor em prata desse banho de metal líquido está compreendido entre 0,2 e 0,4 % em peso.

6. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 5, no qual o teor em magnésio desse banho de metal líquido é inferior a 0,4 % em peso.

7. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, no qual o teor em zircônio desse banho de metal líquido está compreendido entre 0,05 e 0,13 % em peso e o teor em escândio está compreendido entre 0,02 e 0,3 % em peso.

8. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 7, no qual o teor em zircônio desse banho de metal líquido está compreendido entre 0,09 e 0,13 % em peso.

9. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, no qual o teor em manganês desse banho de metal líquido é inferior a 0,05 % em peso.

10. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 9, no qual o martelamento a frio total após têmpera está compreendido entre 2,5 e 4 %.

11. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 10, no qual essa deformação permanente obtida por tração controlada está compreendida entre 2,5 e 4 %.

12. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 11, no qual esse revenido é realizado por aquecimento a 140-155°C, durante 10 a 30 horas.

13. Processo de fabricação de uma chapa de acordo com a reivindicação 1, no qual:

a) se elabora um banho de metal líquido, compreendendo 3,0 a 3,4 % em peso de Cu, 0,8 a 1,2 % em peso de Li, 0,2 a 0,5 % em peso de Ag, 0,2 a 0,6 % em peso de Mg e pelo menos um elemento escolhido dentre Zr, Mn, Cr, Sc, Hf e Ti, a quantidade desse elemento, se for escolhido, sendo de 0,09 a 0,13 % em peso para Zr, 0,05 a 0,8 % em peso para Mn, 0,05 a

0,3 % em peso para Cr e para Sc , 0,05 a 0,5 % em peso para Hf e de 0,05 a 0,15 % em peso para Ti,

o resto sendo o alumínio e impurezas inevitáveis,

com a condição suplementar que a quantidade de Cu e de Li

5 seja tal que

$\text{Cu (\% em peso)} + 5/3 \text{ Li (\% em peso)} < 5,0;$

b) se funde uma placa a partir desse banho de metal líquido;

c) se homogeneiza essa placa a uma temperatura compreendida entre 490 e 530°C durante um período de 5 a 60 horas;

10 d) se lamina essa placa em uma chapa que tem uma espessura final compreendida entre 2 e 9 mm;

e) se coloca em solução essa chapa a uma temperatura compreendida entre 490 e 530°C, por um período de 15 min a 2 horas, e se tempera essa chapa;

15 f) se traciona de forma controlada essa chapa com uma deformação permanente de 2,5 a 4 %;

g) se realiza um revenido dessa chapa por aquecimento a 140 a 155°C durante 10 a 30 horas.

14. Produto laminado extrudado e/ou forjado em liga de alumínio, compreendendo 3,0 a 3,4 % em peso de Cu, 0,8 a 1,2 % em peso de Li, 0,2 a 0,5 % em peso de Ag, 0,2 a 0,6 % em peso de Mg e pelo menos um elemento escolhido dentre Zr, Mn, Cr, Sc, Hf e Ti, a quantidade desse elemento, se for escolhido, sendo de 0,05 a 0,13 % em peso para Zr, 0,05 a 0,8 % em peso para Mn, 0,05 a 0,3 % em peso para Cr e para Sc, 0,05 a 0,5 % em peso para Hf e de 0,05 a 0,15 % em peso para Ti,

o resto sendo o alumínio e impurezas inevitáveis,

com a condição suplementar que a quantidade de Cu e de Li seja tal que:

$\text{Cu (\% em peso)} + 5/3 \text{ Li (\% em peso)} < 5,2.$

30 15. Produto laminado, extrudado e/ou forjado, de acordo com a reivindicação 14, tendo uma espessura compreendida entre 0,8 e 12 mm e, de preferência, entre 2 e 12 mm.

16. Produto de acordo com a reivindicação 14, ou a reivindicação 15, no qual o teor em Zr, se for escolhido, é superior a 0,09 % em peso, e no qual a quantidade de Cu e de Li seja tal que $\text{Cu (\% em peso)} + 5/3 \text{ Li (\% em peso)} < 5,0$.

5 17. Chapa em liga de alumínio produzida pelo processo, como definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 13, caracterizado pelo fato de, no estado T8:

(a) seu limite de elasticidade convencional medida a 0,2 % de alongamento no sentido L ser de pelo menos 440 MPa e

10 (b) sua tenacidade K_{app} , medida sobre amostras de tipo CCT760 (com $2a_0 = 253 \text{ mm}$), ser de pelo menos $110 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ no sentido T-L; e

(c) sua extensão de fissura $\Delta a_{eff(max)}$ do último ponto válido da curva R na direção T-L ser de pelo menos 30 mm.

15 18. Chapa em liga de alumínio produzida pelo processo, como definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 13, caracterizado pelo fato de no estado T8:

(a) seu limite de elasticidade convencional medida a 0,2 % de alongamento no sentido L ser de pelo menos 460 MPa, e

20 (b) sua tenacidade K_{app} , medida sobre amostras de tipo CCT760 (com $2a_0 = 253 \text{ mm}$), ser de pelo menos $130 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ no sentido T-L; e

(c) sua extensão de fissura $\Delta a_{eff(max)}$ do último ponto válido da curva R na direção T-L ser de pelo menos 40 mm.

25 19. Elemento de estrutura incorporando pelo menos um produto, como definido em qualquer uma das reivindicações 14 a 18 ou fabricado a partir desse produto.

20. Elemento de estrutura de acordo com a reivindicação 19, caracterizado pelo fato de se tratar de um painel de fuselagem de aeronave.

30 21. Elemento de estrutura de acordo com a reivindicação 19, quando depende das reivindicações 14 a 16, caracterizado pelo fato de se tratar de um enrijecedor.

22. Elemento de estrutura de acordo com qualquer uma das reivindicações 19 a 21, compreendendo uma construção soldada na qual o co-

eficiente de eficácia da junta é superior a 70 %.

23. Elemento de estrutura de acordo com a reivindicação 22, no qual essa construção soldada é soldada por soldagem por atrito malaxagem.