CRESCIMENTO DIRECIONAL E CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO MATERIAL COMPÓSITO IN SITU Al_3Nb-Nb_2Al

C.T. Rios, E.A.O. Trevisan, F. Andreotti, A. A. Coelho* e R. Caram

DEMA/FEM/UNICAMP, C.P. 6122, Campinas SP, 13.083-970
caram@fem.unicamp.br
* IFGW/UNICAMP

Palavras-chave: Crescimento de Cristais, Ligas Eutéticas.

RESUMO

As ligas eutéticas solidificadas direcionalmente constituem uma alternativa interessante na fabricação de componentes submetidos a temperaturas elevadas. Um sistema com potencial na obtenção desses materiais estruturais é o eutético formado pelos elementos Al e Nb e que exibe as fases intermetálicas Al_3Nb e Nb_2Al. O presente trabalho objetiva analisar o modo de crescimento e a influência da taxa de crescimento na microestrutura de solidificação da liga Al-Nb, de composição eutética. O trabalho envolveu experimentos associados ao uso da técnica Bridgman, com aquecimento indutivo e atmosfera controlada por uma bomba de vácuo mecânica e injeção de argônio. Após o processamento, as amostras tiveram suas microestruturas caracterizadas no tocante às condições de solidificação. Os resultados obtidos possibilitaram a compreensão do modo de solidificação das ligas estudadas, bem como da influência da taxa de crescimento na microestrutura de solidificação.

ABSTRACT

Directionally solidified eutectic alloys constitute an interesting choice in manufacturing components to be used at high temperatures. A promising system for the preparation of high temperature structural materials is the eutectic based on the Al-Nb system, which involves the Al_3Nb and Nb_2Al phases. This paper deals with the study of the growth nature and the influence of the growth rate on the solidification microstructure of the eutectic Al-Nb alloy. The samples were directionally solidified in a Bridgman equipment, with induction heating, under vacuum and argon atmosphere. After processing, the samples were characterized as a function of the growth conditions. The results obtained allow one to understand the eutectic Al-Nb solidification nature, as well as the influence of the growth rate on the solidification microstructure.

1. INTRODUÇÃO

Embora a transformação líquido/sólido em materiais metálicos tenha sido abordada cientificamente há quase um século, parcela significativa do conhecimento atualmente disponível foi adquirido a partir dos anos 50, com a divulgação de uma série de investigações[1-6].

A compreensão dos fenômenos presentes durante um processo de solidificação é de grande importância, à medida que os mesmos influenciam significativamente diversos processos de fabricação, tais como a preparação de monocristais, a fundição de ligas metálicas ou a soldagem de componentes. O controle de um processo de solidificação é fundamental na obtenção de microestruturas adequadas para um determinado fim e pode ser obtido pela manipulação da taxa de crescimento, da taxa de nucleação, da distribuição de temperaturas junto à interface sólido/líquido e da direção de crescimento da fase sólida. Na solidificação de uma liga metálica, um dos fenômenos mais interessantes e com grande potencial de aplicação industrial é o crescimento controlado de ligas de composição eutética.

A transformação eutética envolve o equilíbrio entre um número mínimo de duas fases sólidas e uma fase líquida, em uma condição única de composição e temperatura. Quando essa transformação é executada dentro de uma situação de solidificação direcional, a microestrutura resultante exibe as fases orientadas em uma direção única e paralelas à direção de resfriamento. Em função da natureza da distribuição de fases, a estrutura resultante é definida como material compósito "in situ"[7].

Investigações associadas à solidificação de ligas eutéticas têm recebido significativo volume de esforços nas últimas décadas. Tal interesse e o conhecimento atualmente disponível se devem, principalmente, à importância dessas ligas junto a alguns setores da indústria metalúrgica. Basicamente, as ligas eutéticas exibem as seguintes características[8]:

a. Exibem temperatura de transformação líquido/sólido menor que as temperaturas de fusão das fases constituintes da estrutura eutética. Este fato é conhecido há muitos anos e está associado à palavra eutético, que em grego significa algo de fácil fusão;

b. Exibem microestruturas bastante distintas das observadas nas demais ligas metálicas, podendo ser constituídas de estruturas com alto grau de anisotropia.

Em função de ser constituída por mais de uma fase, a microestrutura de solidificação das ligas eutéticas é bastante variada e depende de diversos fatores, tais como a fração volumétrica de cada fase, as taxas de transformação líquido/sólido e principalmente, do modo de crescimento das fases sólidas.

Dentre os inúmeros arranjos microestruturais em sistemas eutéticos, os regulares, também definidos como normais, são os de maior interesse e dão origem a dois tipos de morfologias de grande interesse, quais sejam: estrutura lamelar e estrutura

fibrosa[9-10]. As estruturas lamelares caracterizam-se por apresentar duas fases em forma de lamelas que crescem lado a lado. No caso das estruturas fibrosas, uma das fases, em forma de fibra, cresce envolvida pela outra fase, ou seja, pela matriz. Existem também arranjos microestruturais definidos como irregulares ou anômalos.

Tais microestruturas são formadas quando, por qualquer razão, as fases sólidas não apresentam taxas de crescimento iguais e nesse caso, a obtenção de estruturas lamelares ou fibrosas torna-se difícil, pois a fase de crescimento mais rápido se formará à frente da outra fase. Tal situação resulta em microestruturas com regularidade limitada e com arranjo de fases distante da forma ordenada encontrada nos eutéticos regulares.

O interesse em se estudar o crescimento de ligas eutéticas é motivado pela possibilidade da solidificação controlada dessas ligas produzir materiais onde o arranjo de fases pode ser programado, podendo resultar em um material compósito[11-14]. Tecnicamente, qualquer material polifásico pode ser considerado como material compósito. Entretanto, na prática esta denominação é limitada aos materiais em que as fases são arranjadas de tal forma que o material resultante tem características e propriedades não encontradas nos componentes individuais do material compósito. As fases constituintes do material compósito são usualmente selecionadas de maneira que se obtenha vantagens dos atributos positivos das mesmas e as deficiências destas não deteriorem o material resultante.

A aplicação da técnica de solidificação direcional no processamento de ligas eutéticas teve início na década de 60, estimulada por diversos estudos, dentre os quais destacam-se o de Jackson e Hunt[3] sobre o crescimento regular de eutéticos, de Hunt e Jackson[4] a respeito da natureza das microestruturas eutéticas e de Galasso[7], voltado a aplicações potenciais dessas ligas. Tais investigações estimularam a elaboração de um número considerável de pesquisas tendo como meta principal a concepção de um método eficiente de produção de tais materiais compósitos.

Atualmente, grande parte dos estudos voltados à solidificação de ligas eutéticas tem como objetivo a concepção de materiais estruturais para a fabricação de equipamentos para operação em altas temperaturas. O uso de compósitos "in situ" obtidos de ligas eutéticas tem como vantagem em relação a outros tipos de compósito, o fato de apresentar estabilidade interfacial em altas temperaturas, pois o arranjo de fases é termodinamicamente estável. No caso de fases da microestrutura eutética serem formadas por compostos intermetálicos, a natureza dos mesmos, em geral, representa temperatura de fusão elevada, o que é ideal para um material estrutural refratário.

A liga formada pelos elementos Al-Nb, na sua composição eutética, apresenta como característica o fato de se obter, pela sua solidificação controlada, um material compósito do tipo "in situ", que se coloca como um possível candidato para o uso em funções estruturais em temperaturas elevadas[15].

O objetivo do presente trabalho é analisar o modo de crescimento e a influência da taxa de crescimento na microestrutura de solidificação da liga eutética Al-Nb.

2. SISTEMAS EUTÉTICOS

A reação eutética está presente nos sistemas chamados anisomorfos, ou seja, nos sistemas em que os seus componentes, quando sólidos, exibem mais de uma fase. Nestes sistemas, a solubilidade total não é possível, ou por existir um limite de solubilidade de um constituinte no outro, ou pelo surgimento de fases intermediárias estáveis. A reação eutética é possível em uma ou mais composições do sistema, e se caracteriza pelo líquido, que ao se resfriar e solidificar, dá origem a duas ou mais fases sólidas distintas, que podem ser constituídas por metais puros, compostos ou soluções sólidas.

A diversidade morfológica apresentada pelas estruturas eutéticas constitui um problema complexo, o que limita a existência de uma classificação conclusiva e abrangente. Tal fato é resultado de um comportamento pouco compreendido, e que envolve diversos fenômenos químicos e físicos. Em geral, a microestrutura de uma liga eutética depende das condições de crescimento, da natureza das fases constituintes, e de detalhes do diagrama de fases do sistema envolvido. As primeiras tentativas de se classificar as ligas eutéticas foram realizadas no início desse século. Porém, após quase um século, nenhuma forma de agrupamento totalmente satisfatória foi obtida.

A figura 1 exibe, de maneira extremamente simplificada, microestruturas observadas em diversos sistemas eutéticos. É oportuno salientar que qualquer consideração sobre o tipo microestrutural apenas torna-se conclusiva ao se tratar o problema nas três dimensões, abordando também, a maneira com que o crescimento das fases sólidas ocorreu. Em tal ilustração são mostradas microestruturas regulares ou normais (figuras 1.a e 1.b) e irregulares ou anômalas (figuras 1.c e 1.d). Na mesma ilustração, a importância da fração volumétrica é também salientada: nas figuras 1.a e 1.c, as frações volumétricas têm valores semelhantes. Nas figuras 1.b e 1.d, as frações volumétricas são bastante diferentes. De acordo com Taran[16], nas décadas de 10 e de 20 foram apresentadas as primeiras sugestões sobre a classificação das ligas eutéticas. Tais propostas eram baseadas, principalmente, na descrição das características morfológicas das microestruturas analisadas. Tal opção não se mostrou eficiente, à medida que a aplicação das mesmas permitia obter resultados considerados limitados.

De acordo com Hogan et al.[17], apenas em meados dos anos 50 é que o estudo das ligas eutéticas deixou de ser baseado apenas na observação de aspectos microestruturais, para ser, também, investigado o modo de crescimento das fases. Nesse sentido, o trabalho pioneiro foi desenvolvido por Scheil[2]. Scheil propôs que as ligas eutéticas fossem classificadas, de acordo com suas microestruturas, como: normais, anômalas e globulares. Microestruturas normais são aquelas em que uma das fases se encontra disposta de forma ordenada, e com a mesma morfologia em uma matriz constituída pela outra fase. Essas microestruturas foram classificadas como lamelares ou fibrosas e são obtidas pelo crescimento simultâneo das duas fases do eutético. Na proposta de Scheil, as fases podiam crescer de forma paralela, uma em relação a outra, apresentando a mesma

velocidade de crescimento. Por outro lado, estruturas anômalas eram classificadas como aquelas em que, por qualquer motivo, as fases sólidas não cresciam com velocidades iguais, e conseqüentemente, as microestruturas resultantes não apresentavam um arranjo ordenado das fases. Os estudos de Scheil também indicaram que um modo de se distinguir estruturas normais de estruturas anômalas era verificar que nessas últimas não eram formados contornos de grão, enquanto em estruturas normais, sim.

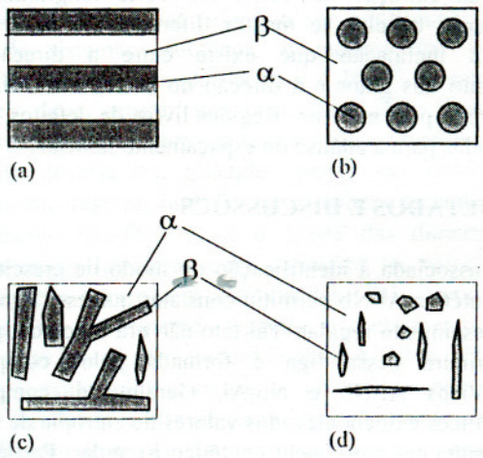

Figura 1. Diagrama esquemático das estruturas eutéticas regulares e irregulares: (a) estrutura regular lamelar; (b) estrutura regular fibrosa; (c) estrutura irregular com fase facetada de alta fração volumétrica; (d) estrutura irregular com fase facetada de baixa fração volumétrica[8].

Em 1963, Chadwick[5] classificou as ligas eutéticas como: contínuas, descontínuas e espirais. As primeiras duas classes estão associadas à continuidade das fases na direção de crescimento. Porém, as microestruturas anteriormente descritas como descontínuas crescem, na verdade, de maneira contínua.

Em 1966, Hunt e Jackson[4] apresentaram o trabalho que pode ser considerado como fundamental para o desenvolvimento de estudos sobre crescimento de ligas eutéticas e sua classificação. O modelo sugerido pelos autores, de forma geral, propõe classificá-las baseando-se no fato de que a morfologia de crescimento do eutético é governada pelas características de crescimento de suas fases, de forma individual. Essa classificação é a mais aceita e difundida e é baseada na entropia de fusão das fases constituintes da estrutura eutética. Os princípios desta análise estão fundamentados na teoria de crescimento para materiais puros, concebida pelo próprio Jackson[1].

Algumas ligas de composição eutética, durante a transformação líquido/sólido, apresentam um mecanismo de crescimento único. Nele, cada uma das fases componentes do sistema, para poder efetuar o seu desenvolvimento, depende do material segregado ao líquido pela fase adjacente. Este processo de redistribuição do soluto, que está presente na formação simultânea das fases, é denominado de crescimento cooperativo. Em um sistema eutético de fases sólidas α e β, a transformação eutética ocorre a partir do líquido, que se solidifica e promove o surgimento das duas fases sólidas, com composições diferentes da apresentada pelo líquido. Neste caso, a fase α é rica no elemento A, enquanto a fase β no elemento B, ambas em relação à composição eutética. Assim, para a formação da fase α, a quantidade de átomos do tipo B no líquido a se solidificar deve decrescer em relação à composição eutética, o que ocorre a partir da segregação desses átomos, para o líquido. Com isso, forma-se uma região rica em átomos B no líquido que se encontra junto à interface, à frente de α. Da mesma maneira, o crescimento da fase β acontece com a diminuição de átomos de A, concentrando-os, da mesma forma, na região líquida junto à interface, à frente da fase β.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A transformação eutética no sistema Al-Nb ocorre na temperatura de 1.550°C e composição Nb-71,5%Nb em peso, que corresponde, em termos de percentagem em átomos, a Al-42,2%Nb[18]. São formadas, pela reação, duas fases sólidas constituídas pelos compostos intermetálicos Al_3Nb e Nb_2Al, respectivamente.

Os experimentos de solidificação direcional foram precedidos por um minucioso estudo do modo de crescimento da liga Al-Nb. Inicialmente, amostras de composição eutética foram preparadas em forno a arco, sob atmosfera controlada por sistema de vácuo e injeção de argônio de alta pureza. As ligas foram preparadas a partir de alumínio e nióbio de pureza comercial. A fusão foi realizada em cadinho de cobre refrigerado com fluxo de água, o que limita a contaminação das amostras. A figura 2 exibe detalhes do forno de fusão a arco.

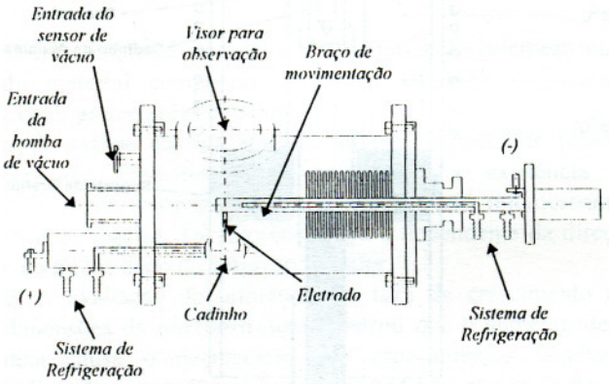

Figura 2. Diagrama esquemático do forno de fusão a arco.

Na obtenção de estruturas eutéticas com alta regularidade, é necessário implementar, de forma eficiente, antes do processamento por solidificação direcional, a homogeneização da liga. O procedimento de homogeneização foi alcançado repetindo-se diversas vezes, a fusão da liga, associada à quebra e mistura da mesma. Tal procedimento permitiu obter amostras com composição

altamente uniforme. Como o alumínio é volátil em altas temperaturas, procedeu-se a análise de perda de peso do mesmo no procedimento de homogeneização, o que mostrou variação insignificante.

Ao final da preparação das amostras, as mesmas foram analisadas no tocante à microestrutura e em função de diferentes taxas de resfriamento.

O processamento da liga por solidificação direcional foi executado com o uso de cadinhos de alumina com diâmetro interno de 0,8cm e 6,0cm de comprimento. Para se obter crescimento direcional, utilizou-se a técnica Bridgman vertical. No método Bridgman vertical, o crescimento direcional é obtido ao se movimentar lentamente a amostra processada de uma região de alta temperatura, para outra de temperatura inferior. Em função das características do equipamento utilizado, é possível controlar, dentro de certos limites, os principais parâmetros que interferem na microestrutura de solidificação da liga eutética, tais como a taxa de crescimento e, principalmente, o gradiente na interface sólido/líquido. O crescimento eutético foi implementado em equipamento com aquecimento por indução eletromagnética, com arranjo de espiras variável, em atmosfera também controlada por sistema de vácuo e injeção de argônio de alta pureza. Um diagrama desse sistema é apresentado na figura 3. Todos experimentos de solidificação direcional foram implementados com temperaturas variando de 1100°C a 1700°C. O controle térmico foi efetuado a partir de um pirômetro óptico.

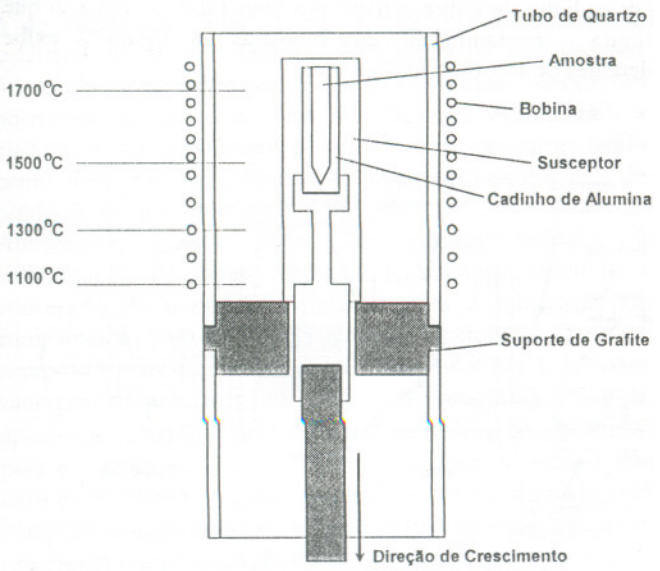

Figura 3. Diagrama esquemático do equipamento de solidificação direcional Bridgman vertical.

Após a etapa inicial de preparação da liga e em seguida ao crescimento direcional, as amostras da liga eutética Al-Nb foram seccionadas objetivando a análise da microestrutura em função das condições de solidificação. As partes seccionadas foram polidas mecanicamente e atacadas rapidamente em solução constituída por 1 parte de HF, 3 partes de HNO_3 e 6 partes de ácido lático. A estrutura eutética foi examinada pelo uso de microscopia óptica e eletrônica de varredura.

No exame das dimensões da microestrutura eutética obtidas do crescimento direcional, foram utilizadas amostras seccionadas transversalmente, pois nesse caso, um grande número de grãos eutéticos pode ser formado, apresentando direções de crescimento nem sempre coerentes com a direção da extração do calor. No corte longitudinal, o espaçamento lamelar se mostra diferente em cada grão, devido à inclinação que existe entre a direção de crescimento dos grãos e a direção do corte, inviabilizando seu emprego para este fim. Regiões livres de defeitos foram selecionadas para a análise do espaçamento lamelar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A etapa associada à identificação do modo de crescimento da liga eutética Al-Nb permitiu constatar que essa liga pode exibir crescimento regular. Tal fato não era esperado, pois a microestrutura dessa liga é formada pelos compostos intermetálicos Al_3Nb e Nb_2Al. Geralmente, compostos intermetálicos exibem elevados valores de entropia de fusão, o que resulta em crescimento eutético irregular. Partindo-se do diagrama de fases da liga Al-Nb e considerando a fração volumétrica das fases, a microestrutura do tipo lamelar era esperada, o que foi confirmado após a análise microestrutural das ligas no estado bruto de fusão, preparadas no forno a arco. Observou-se também, que a microestrutura de solidificação dessa liga é intensamente dependente da taxa de solidificação, bem como da direção de resfriamento. Em geral, no crescimento de eutéticos irregulares, a microestrutura não é totalmente governada pela direção e intensidade da solidificação, pois a mesma exibe algumas direções de crescimento preferenciais.

Os resultados obtidos durante o crescimento direcional foram bastante interessantes. Inicialmente, foram confirmados os resultados extraídos das amostras no estado bruto de fusão, que evidenciavam a possibilidade de se exercer o controle da microestrutura de solidificação a partir da manipulação dos parâmetros operacionais do processo de solidificação. Usando taxas de crescimento controladas, na faixa de 0,5 a 7,0 cm/h, como também de direções específicas de crescimento, o processo Bridgman permitiu examinar o crescimento eutético de maneira mais profunda.

A análise do comportamento dos espaçamentos lamelares com a variação na taxa de solidificação indica que o aumento dessa taxa provoca o refino da microestrutura. O efeito da velocidade de crescimento no espaçamento lamelar já foi averiguado para um grande número de sistemas binários[9] e, normalmente, existe concordância entre os resultados experimentais e os previstos pela teoria proposta por Jackson e Hunt[3]. No sistema eutético Al-Nb, a relação entre a velocidade de crescimento e o espaçamento lamelar está de acordo com a clássica equação de Jackson e Hunt, $V\lambda^2$=constante[3]. Os valores obtidos nestes experimentos indicam que o valor da constante é igual a $1{,}15 \times 10^{-7} cm^3/h$.

A relação entre taxa de crescimento e dimensões microestruturais pode ser sintetizada no fenômeno exibido pela figura 4. O aumento repentino na taxa de crescimento produziu uma variação abrupta nos espaçamentos lamelares. Além de mostrar uma forte dependência entre espaçamento lamelar e taxa de crescimento, tal fenômeno indica a natureza da seleção do espaçamento lamelar durante o crescimento eutético. De acordo com Jackson e Hunt[3], o crescimento eutético ocorre em condições definidas como extremas, onde o superesfriamento interfacial é próximo ao mínimo. Apesar de tal princípio ser confirmado em uma série de sistemas metálicos, o mesmo não tem base científica. Ainda segundo Jackson e Hunt[3], o crescimento eutético deve ocorrer em uma faixa de valores muito pequena para uma determinada condição de crescimento. Tal conceito deveria ser aplicado apenas aos sistemas com crescimento regular, onde as fases exibem característica de crescimento não-facetado e o ajuste das dimensões dos espaçamentos lamelares com variações na velocidade de solidificação ocorre sem dificuldades. Tal comportamento não deveria ser esperado quando o crescimento eutético forma duas fases intermetálicas como o Al_3Nb e o Nb_2Al
Ainda considerando a figura 4, observa-se que o ajuste ocorre rapidamente através da ramificação das fases. Após a estabilização do crescimento, o espaçamento lamelar adquire um valor essencialmente uniforme.

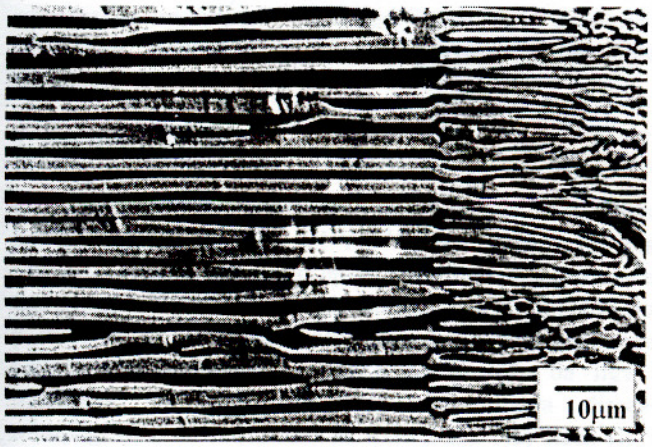

Figura 4. Alteração microestrutural provocada pelo aumento repentino na taxa de crescimento.

Um outro fato interessante observado no crescimento da liga eutética Al-Nb está ligado à sensibilidade da microestrutura à presença de fase primária. Constatou-se que um pequeno volume de fase primária pode acarretar na degeneração total da microestrutura regular eutética, pois a direção de crescimento ao redor desta fase primária é alterada, como mostra a figura 5.
Finalmente, no tocante à regularidade da microestrutura eutética, constatou-se que a formação de defeitos também depende das taxas de solidificação impostas ao sistema eutético. Provavelmente, a formação de defeitos como células eutéticas e falhas no arranjo lamelar se devem à ocorrência de superesfriamento constitucional, pela presença de elementos estranhos ao sistema Al-Nb.

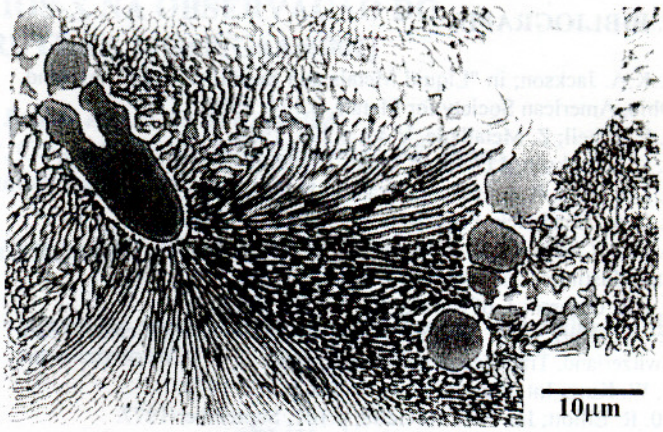

Figura 5. Microestrutura eutética obtida por solidificação direcional e degenerada pela presença de fase primária.

Sob baixas taxas de crescimento (0,5 cm/h), a estrutura lamelar apresentou alto grau de regularidade. À medida que essa taxa foi incrementada, a presença de defeitos tornou-se acentuada, exibindo, em alguns casos, transição microestrutural do tipo lamelar-fibrosa (7,0 cm/h). Apesar da estrutura lamelar se apresentar como a morfologia dominante nas microestruturas obtidas, o experimento em que foi empregada a velocidade de 7,0 cm/h produziu uma microestrutura com regiões onde a morfologia fibrosa foi formada. É necessário salientar que as regiões de morfologia fibrosa foram formadas ao lado da morfologia lamelar. A razão para tal formação não é totalmente compreendida, mas provavelmente, tem relação direta com a taxa de solidificação e a presença de superesfriamento constitucional.

5. CONCLUSÕES

O crescimento direcional e a caracterização microestrutural do material compósito "in situ" Al_3Nb-Nb_2Al permitiu extrair as seguintes conclusões:
a. A análise da liga eutética no estado bruto de fusão e crescidas direcionalmente evidenciou a existência de crescimento cooperativo, resultando em uma microestrutura lamelar regular. Tal microestrutura é dependente da direção e da intensidade da extração de calor.
b. A avaliação da influência da taxa de crescimento nas dimensões da microestrutura mostrou que o aumento dessa taxa causa o decréscimo dos espaçamentos lamelares, indicando concordância com a clássica equação de Jackson e Hunt: $V\lambda^2$=constante. Dos resultados obtidos, obteve-se o valor de tal constante como sendo igual a $1{,}15 \times 10^{-7}$ cm^3/h. Além disso, observou-se que o aumento da taxa de crescimento provoca a formação de defeitos no arranjo lamelar, podendo provocar transições lamelar-fibrosa.

6. AGRADECIMENTOS

Ao DEMAR/FAENQUIL-Lorena SP, pelo fornecimento do nióbio e à FAPESP e FAEP, pelo financiamento da pesquisa.

7. BIBLIOGRAFIA

1. K.A. Jackson; in "Liquid Metals and Solidification", Cleveland, Ohio, American Society for Metals, p.174, 1958.
2. E. Scheil; Z. Metallkde, V.45, p.298, 1954.
3. K.A. Jackson; J.D. Hunt; Trans. AIME, V.236, p.1129, 1966.
4. J.D. Hunt; K.A. Jackson; Trans. AIME, V.96, p.843, 1966.
5. G.A. Chadwick; Prog. Mat. Sci., V.12, p.97, 1963.
6. G.A. Chadwick; in "The Solidification of Metals", The Iron and Steel Institute, London, p.138, 1967.
7. F.S. Galasso; J. of Metals, V.19, p.17, 1967.
8. W. Kurz; D.J. Fisher; Fundamentals of Solidification, 3ed. Switzerland, TransTech Publications, 1992.
9. W. Kurz; Int. Met. Reviews, V.5/6, p.177, 1979.
10. R. Elliott; Int. Met. Reviews, p.161, September/1977.
11. K. Chang et al.; J. of Metals, V.44, p.59, 1992.
12. J. May; Metals and Materials, p.44, September/1975.
13. E.A.O. Trevisan; Crescimento Direcional e Caracterização Microestrutural do Material Compósito In Situ Al_3Nb-Nb_2Al, Tese de Mestrado, UNICAMP, 1997.
14. G. Frommeyer et al.; Z. Metallkde, V.81, p.307, 1990.
15. T. Kumagai,; S. Hanada; Microstructure of Nb_2Al-$NbAl_3$ eutectic alloys produced by unidirectional solidification, v.152, p.349, 1992.
16. J.N. Taran; in "Microstrucutural Design by Solidification Processing", The Minerals, Metals and Materials Society, p.193, 1992.
17. M. Hogan; R.W. Kraft; F.D. Lemkey; in "Advances in Materials Research", Wiley-Interscience, V.5, p.91, 1971
18. T.B. Massalski; Binary Alloy Phase Diagrams, American Society for Metals, 2.ed, v.1, p.139, 1987.