

MP74C1090



MORFOLOGIA DO EUTÉTICO ALUMÍNIO – URÂNIO

Francisco Ambrozio Filho e
Renato Rocha Vieira

PUBLICAÇÃO IEA 433
CMN 57

SETEMBRO/1976

MORFOLOGIA DO EUTÉTICO ALUMÍNIO – URÂNIO

Francisco Ambrozio Filho e
Renato Rocha Vieira

COORDENADORIA DE METALURGIA NUCLEAR
(CMN)

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
SÃO PAULO – BRASIL

APROVADO PARA PUBLICAÇÃO EM ABRIL/1976.

SUPERINTENDENTE

Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pironi

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11.049 (Pinheiros)
Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira"
SÃO PAULO - BRASIL

NOTA: Este trabalho foi conferido pelo autor depois de composto e sua redação está conforme o original, sem qualquer correção ou mudança.

MORFOLOGIA DO EUTÉTICO ALUMÍNIO – URÂNIO^{(1)(*)}

Francisco Ambrozio Filho⁽²⁾ e
Renato Rocha Vieira⁽³⁾

RESUMO

São analisados os fatores que devem influir na morfologia eutética. Discute-se, além dos fatores inerentes a cada sistema particular, as condições externas durante a solidificação. Estuda-se a morfologia eutética no Sistema Al-U, com o eutético composto de α , solução sólida de urânio em alumínio e UAl_4 . São observadas as estruturas obtidas em solidificação em lingoteiras e solidificação unidirecional. Verifica-se que o eutético apresenta uma tendência para o desenvolvimento da morfologia em espiral em forma de losango. Esta morfologia é discutida em função de algumas variáveis, ressaltando-se os característicos de crescimento das fases componentes do eutético, velocidade de crescimento e gradiente térmico no líquido.

1 – INTRODUÇÃO

Dentre as transformações do estado líquido para o estado sólido, resultando duas fases, a transformação eutética em sistemas binários tem sido a mais estudada. Uma liga de composição eutética tem ponto de fusão mais baixo que o dos componentes. Este é o motivo da sua designação eutético, proveniente do grego "Eutektos"⁽²⁴⁾ que significa mais fusível. Nesta transformação tem-se a mudança do estado líquido para duas fases sólidas, simultaneamente. Os estudos são desenvolvidos no sentido de se determinar os mecanismos da transformação, quais e como as variáveis influem na transformação. Com isto, poder-se-á ter maior controle na distribuição das fases, trazendo melhores perspectivas quanto à utilização dos eutéticos.

A técnica de solidificação unidirecional tem ajudado bastante nestes estudos, além de poder ter uma aplicação industrial. Os eutéticos obtidos desta maneira poderão fornecer materiais compostos, onde se tem uma fase reforçadora no interior de uma matriz metálica, ou ainda, utilizados em aplicações elétricas ou magnéticas⁽¹⁴⁾. Grandes foram os avanços obtidos nos últimos tempos para o conhecimento da reação eutética. Muitos fundamentos teóricos estão estabelecidos, apesar disto não é ainda possível se prever, precisamente, qual morfologia será formada em qualquer novo sistema eutético a ser investigado.

A Coordenadoria de Metalurgia Nuclear do Instituto de Energia Atômica desenvolve um programa de estudos de ligas Al-U, no que diz respeito a sua utilização em elementos combustíveis, tipo placa, para reatores de pesquisa^(12,5). É, portanto, de bastante interesse, um estudo detalhado das ligas Al-U. Neste trabalho, procura-se verificar as morfologias obtidas no eutético Al- UAl_4 , fazendo-se uma análise qualitativa em função das teorias existentes para a transformação eutética. Observar-se-á as estruturas obtidas em lingotes convencionais e por solidificação unidirecional. Procura-se, na medida do possível, comparar as morfologias obtidas pelos dois métodos.

(1) Contribuição Técnica nº 1 189 Apresentada ao XXIX Congresso Anual da ABM; Porto Alegre RS; julho 1974

(2) Membro da ABM Engenheiro Metalurgista e Mestre em Engenharia Metalúrgica; Coordenadoria de Metalurgia Nuclear do Instituto de Energia Atômica; São Paulo SP

(3) Membro da ABM Engenheiro Metalurgista e Doutor em Engenharia; Professor livre docente da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; Departamento de Engenharia Metalúrgica; São Paulo SP

(*) Trabalho baseado em dissertação de mestrado apresentada por Francisco Ambrozio Filho ao Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica da USP, 1973

2 – ESTRUTURAS EUTÉTICAS

Várias são as formas e arranjos possíveis entre as duas fases para um sistema eutético. São bastante conhecidas as terminologias utilizadas pela descrição da forma de apresentação das fases nas micrografias. Como exemplo, diz-se que o eutético é lamelar quando as duas fases se apresentam como lamelas, fibroso quando uma das fases é cilíndrica, globular quando uma das fases é de formato esférico, acicular quando uma das fases se apresenta em forma de agulhas. Existem, ainda, outras disposições regulares ou irregulares, que podem ser descritas pela forma com que se apresentam.

No decorrer do tempo foi grande a preocupação de agrupar as morfologias obtidas por meio de uma classificação. No entanto, verifica-se que nenhuma delas é completamente satisfatória, pois existem exceções para todas, além do fato de se obter várias morfologias com o mesmo sistema. Geralmente quando são apresentadas morfologias eutéticas é feita referência a uma destas classificações. Essas tentativas de classificação são importantes, porque salientam certos aspectos fundamentais na solidificação do eutético, onde são avaliados alguns parâmetros importantes que condicionam as morfologias. Em quase todas são considerados um ou mais fatores importantes para determinação da estrutura, podendo ser, inclusive, fator preponderante na morfologia. Deve-se lembrar que vários outros fatores devem intervir, além dos considerados para classificação.

Dois são as classificações mais usadas e aceitas. A primeira delas, e mais antiga, foi a proposta por Scheil⁽²⁵⁾, baseada principalmente no modo de crescimento. Ele separou as estruturas em duas classes distintas, chamando-as de microestruturas normais e anormais. As primeiras são, principalmente, lamelares ou fibrosas, formadas pelo crescimento das duas fases sólidas com uma interface comum com o líquido, onde as lamelas ou fibras são normais à interface sólido-líquido. Esta forma de crescimento daria lugar, em lingotes, a várias colônias que cresceriam a partir do núcleo com interfaces regulares. Os contornos entre as colônias são bem definidos. Esta é a principal característica metalográfica das microestruturas normais.

Nas microestruturas eutéticas anormais as velocidades de crescimento das duas fases são diferentes, provocando o crescimento de uma das fases, substancialmente à frente da outra. As duas fases crescerão portanto, sem uma frente de crescimento uniforme. A ausência de contornos regulares entre as colônias é tomada como sendo sua principal característica microestrutural, em contraste com a dos eutéticos normais.

A outra classificação é a de Jackson e Hunt⁽¹⁷⁾ e baseada no modo de crescimento individual de cada fase. Tem-se duas maneiras de crescimento, de acordo com conceito desenvolvido por Jackson⁽¹⁸⁾, para metais puros. O crescimento pode ser de forma isotrópica, independentemente do plano cristalográfico em contato com o líquido, dando origem a cristais ditos não-facetados, ou então, de forma anisotrópica, com a interface tendendo a consistir de planos cristalográficos de alta densidade atômica, dando origem aos cristais denominados facetados. No caso de eutéticos, temos a seguinte classificação, de acordo com as maneiras de crescimento das duas fases: não facetado não facetado com tendência a fornecer microestruturas lamelares ou fibrosas, não facetado facetado dando origem a estruturas regulares complexas ou irregulares e facetado-facetado com estruturas irregulares.

Verifica-se que existem exceções neste critério de classificação pois, sistemas classificados como não facetado-facetado pode apresentar estruturas lamelares. No entanto, quando se obtém estruturas irregulares, verifica-se que um dos componentes tem modo de crescimento anisotrópico, ou seja, tem caráter não metálico. Diz-se que uma fase tem caráter metálico quando apresenta isotropia de crescimento. Além destas classificações, uma outra classe muito mencionada é a dos eutéticos denominados divorciados⁽⁶⁾, onde a formação das fases ocorre separadamente, ou seja, em seqüência e não simultaneamente.

Nos eutéticos cujo crescimento é realizado com interface plana, principalmente os lamelares, foram realizadas análises quantitativas relacionando λ , espaçamento interlamelar e R, velocidade de

crescimento⁽²⁹⁾. Para eutéticos com interface de crescimento irregular a análise quantitativa é difícil de ser efetuada.

Passemos a uma análise de outros fatores importantes para que se formem as diversas morfologias e também quanto à possibilidade de mudança de estruturas.

Uma comparação simples pode ser feita em relação ao eutético lamelar e fibroso nos quais a forma de crescimento é semelhante. São encontradas relações de orientação entre as fases sólidas para ambas as formas de eutético⁽²⁰⁾. Isto sugere a tendência de produção de interfaces de baixa energia, mesmo no caso das fibras, pois geralmente estas se apresentam com geometria prismática. A existência de um plano de baixa energia deve favorecer o crescimento lamelar e quando houver varios planos de baixa energia poderá ocorrer o crescimento fibroso. Além desse fator encontra-se uma forte dependência em relação à fração volumétrica para sistemas que apresentam esta morfologia. Considerando-se somente a geometria sem considerar anisotropia de interface, uma estrutura fibrosa seria favorecida para uma relação volumétrica entre as fases menor que 0,28, enquanto que tenderia a lamelar para relações maiores do que esta⁽⁷⁾.

Nos casos de estruturas complexas regulares também podem ser encontradas relações de orientação entre as fases, caso do eutético espiral Zn-MgZn,⁽⁹⁾ Neste caso não se conseguiu correlacionar as relações de orientação em termos de baixa energia de interface. Para outros eutéticos complexos regulares (Al-Ge)⁽¹⁵⁾ não existem relações de orientação. Em ambos os casos a fase de crescimento facetado tem um avanço em relação a outra fase para manter a forma de crescimento. Para os eutéticos irregulares não existem relações de orientação entre as fases⁽¹⁶⁾.

São também importantes as variáveis externas ou seja, velocidade de crescimento R , gradiente térmico no líquido G , e composição. Normalmente estas 3 variáveis estão relacionadas entre si. Fato bastante conhecido, relacionando-as, e a ocorrência do crescimento celular, pela rejeição de impurezas por ambas as fases, dando origem a subestrutura celular. Um alto valor da relação G/R pode evitar a formação desta subestrutura celular⁽¹¹⁾. Fato menos comum de acontecer com eutéticos é a ocorrência de crescimento dendrítico, encontrado no entanto, em alguns casos⁽²²⁾. Da mesma forma que há uma analogia entre crescimento celular para eutéticos e ligas monofásicas, haveria para o crescimento dendrítico.

Existem evidências de mudanças de morfologias com alterações destas variáveis, não havendo, entretanto, teoria satisfatória para explicar estas mudanças. De qualquer forma, todas estas variáveis devem influir no arranjo das duas fases, podendo estar inter-relacionadas. Vejamos alguns exemplos envolvendo mudanças de morfologias.

Verificou-se que com aumento da velocidade de crescimento ocorria uma transição de lamelas para fibras no eutético Mg-Al⁽³⁰⁾, enquanto que para baixos valores de R no sistema CuAl₂-Al, foi encontrada morfologia degenerada, isto é, as lamelas se apresentam de forma irregular⁽⁴⁾. No caso de eutéticos irregulares, especificamente Al-Si^(2,8), com um alto valor de G/R , obteve-se estrutura regular na forma de fibras.

Quanto às impurezas, verifica-se que não só introduzem o crescimento celular, mas podem alterar as energias interfaciais entre as duas fases, bem como produzir mudanças tanto no fenômeno de nucleação como no crescimento, o que certamente acarretará mudanças de morfologias. Exemplos marcantes são a modificação da morfologia do eutético Al-Si pela adição de sodio⁽²⁶⁾ e a produção de ferro fundido nodular pela adição de cerio ou magnésio⁽²¹⁾. Também é encontrada, às vezes, uma mudança de morfologia quando há excesso de uma das fases, principalmente, da fase facetada num sistema facetado não facetado. No sistema Zn-Mg₂Zn₁₁, o eutético passa de lamelar para complexo regular, ao se aumentar a porcentagem de magnésio⁽¹⁹⁾.

Vê-se que as estruturas eutéticas dependem de varios fatores inerentes ao sistema, além das condições de solidificação.

3 – LIGA Al-U

O diagrama de equilíbrio das ligas alumínio-urânio (figura 1) foi, primeiramente, estudado por Gordon e Kaufmann⁽¹³⁾. Posteriormente outros estudos foram realizados quanto à determinação de diagrama de equilíbrio, sendo que determinações da linha liquidus apresentaram valores de temperatura maiores do que os apresentados no diagrama de equilíbrio⁽²⁸⁾. O ponto eutético tem 13% U e temperatura de fusão 640°C, sendo o eutético constituído de α , solução sólida de urânio em alumínio e o composto intermetálico UAl_4 . A estrutura cristalina de α é cubica de faces centradas e do UAl_4 ortorrômbica.

Poucos são os trabalhos sobre observações microestruturais dessas ligas, no estado bruto de fusão^(12,3). A fase α é observada com morfologia dendrítica e o UAl_4 em formas de agulhas ou losangos, quando presentes como fases proeutéticas. O eutético formado pela fase α e a UAl_4 foi sempre verificado interdendriticamente⁽³⁾.

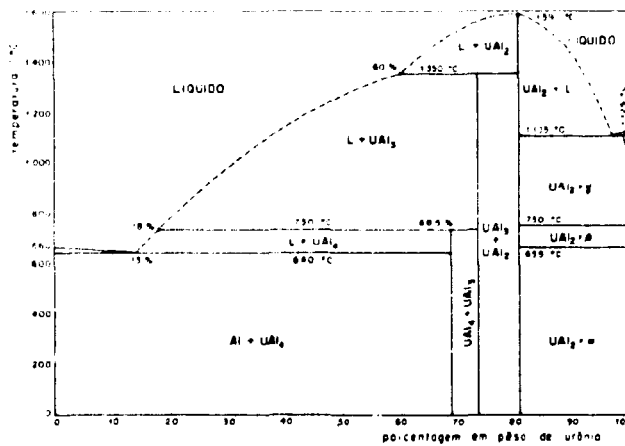


Figura 1 — Diagrama de equilíbrio alumínio urânio⁽²³⁾

4 – MÉTODOS EXPERIMENTAIS

As ligas preparadas em cadinhos de grafita utilizando forno de alta freqüência H. W. G. (1000 kHz) e de potência máxima 25 kW. Na sua preparação utilizou-se urânio metálico produzido na Coordenadoria de Metalurgia Nuclear^(10,11,27) e alumínio comercialmente puro, 99,5%, sendo que em alguns casos foi usado Al-99,999%. O método utilizado foi de dissolução de urânio metálico no alumínio líquido. Foram efetuadas cargas para se obter diversas composições em urânio, para se poder estudar o eutético. Após a homogeneização efetuava-se o vazamento em lingoteiras cilíndricas de grafita, pré-aquecidas a 200°C. Estes lingotes eram posteriormente utilizados para solidificação unidirecional. O método de solidificação unidirecional, cujo sistema é mostrado esquematicamente na figura 2, foi apresentado anteriormente⁽¹⁾.

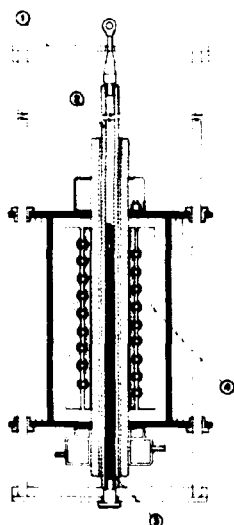


Figura 2 – Esquema do sistema de movimentação e aquecimento do dispositivo de solidificação unidirecional: 1) Estrutura movel; 2) Tubo cerâmico 3) Liga metálica; 4) Forno

O carregamento do lingote no dispositivo de solidificação unidirecional, era efetuado quando o forno já estava com temperatura a de operação. Esperava-se um certo tempo para obter-se a fusão e a homogeneização da temperatura do conjunto, quando se iniciava a movimentação descendente do sistema. As temperaturas utilizadas foram sempre superiores a 800°C . Nos ensaios realizados a velocidade de crescimento foram uniformes, sendo efetuadas experiências com velocidades no intervalo de 4 a 30 cm/h.

Na observação das morfologias resultantes foram utilizadas observações macroscópicas e microscópicas. As primeiras foram efetuadas nos lingotes de solidificação unidirecional, com a finalidade de observar a textura do material, utilizando ataque em solução aquosa de NaOH a 10%. Foram realizadas observações microscópicas dos lingotes obtidos antes e após a solidificação unidirecional. Utilizou-se a técnica de polimento mecânico manual e ataque químico em solução de ácido fluorídrico a 1% e também polimento eletrolítico após ter sido efetuado polimento mecânico em pasta de diamante até $6\mu\text{m}$.

O eletrólito usado tinha a seguinte composição volumétrica: ácido perclórico 20%, álcool etílico 70%, etileno glicol 10% e as características do aparelho durante o polimento foram as seguintes: diferença de potencial catodo-anodo: 30-40 V e catodo de aço inoxidável.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dois problemas surgiram no estudo da morfologia eutética dessas ligas. O primeiro foi que a transformação eutética nem sempre ocorria na composição eutética, e o segundo que estas ligas são sujeitas a segregação gravimétrica. Este fato é bastante pronunciado em solidificação unidirecional, onde a velocidade de solidificação é lenta e as partículas de UAi_4 se concentram no fundo do lingote. Isto pode ser observado numa macrografia da seção longitudinal e apresentada na figura 3.

Para contornar estas dificuldades foram fundidas ligas de várias composições e estudadas as morfologias eutéticas quando este constituinte se apresentava em maior proporção na microestrutura, bem como retirado material para análise química de regiões próximas às posições que se deveria obter amostras para análise micrográfica.

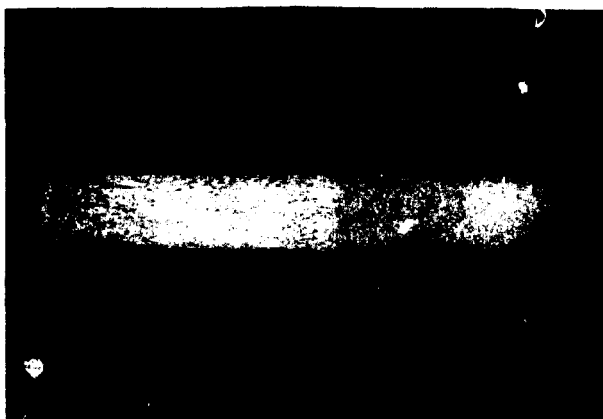


Figura 3 – Macrografia de liga de solidificação unidirecional com teor médio de 18%U. Na região inferior há uma grande quantidade de partículas de UAl_4 . No centro do lingote variou-se a velocidade de crescimento bruscamente. Ataque-solução a 10% de NaOH. Tamanho natural.

Quando nos lingotes convencionais, havia extensas áreas de constituinte eutético, encontrou-se, na maioria das vezes, colônias bastante definidas, como pode ser observado na figura 4. Este fato indica que nesta situação, o eutético pode ser considerado normal, de acordo com o critério de Scheil⁽²⁵⁾. Apesar deste fato ter sido mais freqüente foram também encontrados em alguns lingotes, uma estrutura eutética irregular. As figuras 5 e 6 apresentam micrografias de regiões com estas morfologias irregulares. Verifica-se, nestas figuras, que existe uma partícula de UAl_4 mantendo continuidade com a mesma fase do eutético, formado ao redor da mesma. Nas morfologias normais há uma continuidade aparente como proeutético α o que pode ser observado na figura 7. Estes dois fatos levam a crer que o possível fator determinante da morfologia, seria a fase da qual se origina o eutético, mostrando assim a importância da nucleação do eutético pelo proeutético.

O UAl_4 é uma fase intermetálica e tem caráter não metálico quanto ao crescimento. É comum em sistemas onde haja um excesso da fase facetada, em relação à composição eutética, apresentarem morfologias irregulares^(8,19). Pode ser o caso do sistema $\alpha-UAl_4$, onde o UAl_4 estaria em excesso e não se desenvolveria, completamente, na morfologia característica do proeutético.

A figura 8 apresenta um dos contornos de colônias com maior aumento. A região da micrografia, onde as plaquetas de UAl_4 se dispõem aproximadamente paralelas, corresponde a uma seção longitudinal do constituinte eutético e na outra colônia verifica-se que as plaquetas de UAl_4 estão dispostas segundo duas direções e constitui uma seção transversal. As seções transversais de colônias mostraram sempre o crescimento das plaquetas em duas direções preferenciais e às vezes, com uma estrutura em forma de losango completamente desenvolvida em espiral, como se verifica na figura 9.

As figuras de 10 a 12 apresentam as morfologias obtidas em solidificação unidirecional. A figura 10 mostra a seção longitudinal de um lingote obtido com velocidade de crescimento 4cm/h. Nota-se, nesta micrografia, que as partículas de UAl_4 se apresentam de forma descontínua como plaquetas, com uma divergência no sentido do crescimento.

A seção transversal do mesmo lingote apresenta a estrutura mostrada na figura 11. Verifica-se vários agrupamentos das duas fases, separadas entre si por uma faixa mais clara, onde se tem maior proporção da fase α . Esta formação tem aspecto semelhante à subestrutura das células obtidas para os eutéticos lamelares e fibrosos^(29,7,1). A figura 12 apresenta com maiores detalhes uma dessas células, onde se observa a presença de plaquetas e glóbulos de UAl_4 em matriz da fase α . As plaquetas se apresentam, principalmente, em duas direções preferenciais, o que contribui para a forma celular apresentada.



Figura 4 – Região do lingote mostrando o aspecto das colônias eutéticas. Liga Al-19%U. Ataque: HF a 1%. Aumento: 50 X.



Figura 5 – Morfologia eutética irregular. Liga Al-19,5%U. Ataque: HF a 1%. Aumento: 200 X. Ampliação: 2,5 X.



Figura 6 – Detalhe de regiões como as da figura 5, mostrando a continuidade do UAl_4 . Liga Al-19,5%U. Ataque: HF a 1%. Aumento: 500 X. Ampliação: 2,5 X.

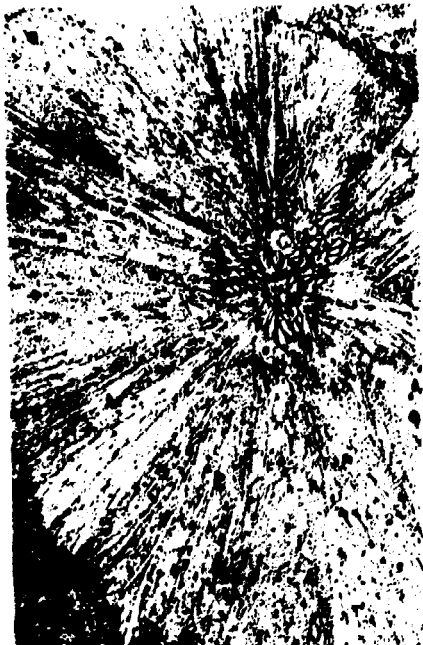


Figura 7 – Colônia eutética com a fase α na forma dendrítica no seu interior. Liga Al-19,5%U Polimento eletrolítico. Aumento: 200 X. Ampliação: 2,5 X.



Figura 8 – Detalhe de contorno de colônias, apresentando a separação entre as seções transversal e longitudinal de duas colônias adjacentes. Liga Al-19%U. Ataque: HF a 1%. Aumento: 1300 X.



Figura 9 – Morfologia eutética num corte transversal. Liga Al-19%U. Ataque: HF a 1%. Aumento: 500 X. Ampliação: 5 X.

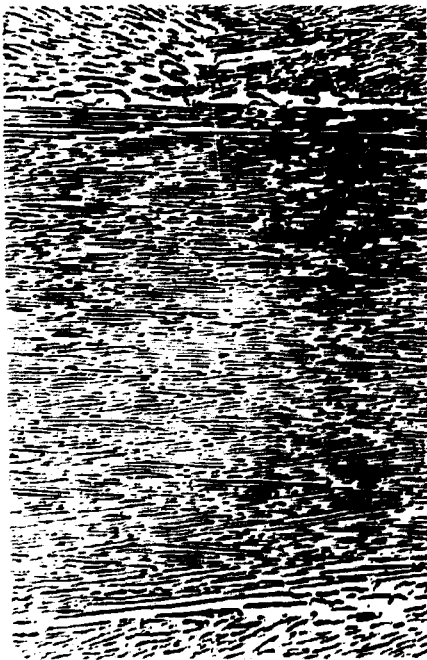


Figura 10 – Seção longitudinal da estrutura eutética em solidificação unidirecional. $R = 4 \text{ cm/h}$. Liga Al-13,8%U. Polimento eletrolítico. Aumento: 200 X. Ampliação: 2,8 X.

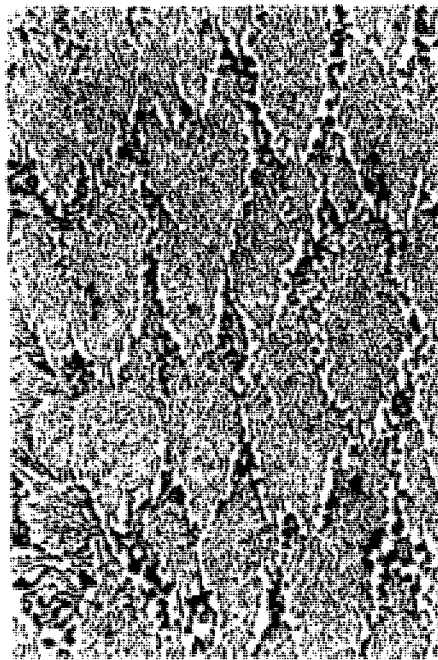


Figura 11 – Seção transversal de solidificação unidirecional, mostrando o arranjo das células eutéticas obtidas. $R = 4 \text{ cm/h}$. Liga Al-13,8%U. Polimento eletrolítico. Aumento: 100 X. Ampliação: 2,5 X.

Como as morfologias obtidas em solidificação unidirecional (figuras 10,11 e 12) se assemelham àquelas obtidas quando se tinha contornos de colônias definidos (figuras 8 e 9), considera-se que o sistema mostrou uma tendência para apresentar morfologias eutéticas normais.

A tendência para o crescimento em espiral do eutético é evidenciada pela observação dessas micrografias. Entretanto, em solidificação unidirecional não foi encontrada tal morfologia completamente desenvolvida em corte de seção transversal. Deve-se notar que existem interrupções e irregularidades na morfologia em questão, que impedem a formação da espiral perfeita. O UAl_4 se apresenta como plaquetas orientadas segundo duas direções, que parecem ser as mesmas da formação da espiral. Apesar de haver divergência de orientação no crescimento quando observada uma seção longitudinal, o UAl_4 também se apresenta como plaquetas, o que não permite a formação da espiral.

O arranjo do UAl_4 no constituinte eutético apresenta as mesmas tendências morfológicas verificadas para o proeutético UAl_4 e apresentadas na figura 13, caso de lingote convencional e figura 14, caso de solidificação unidirecional. Daí, acreditar-se, que a morfologia apresentada deve provavelmente estar relacionada com a anisotropia de crescimento da fase UAl_4 . No crescimento do eutético esta fase deve guardar os mesmos característicos de crescimento que no proeutético, mostrando a influência de se ter uma fase intermetálica como componente do eutético, o que foi sistematizado no critério de classificação proposto por Jackson e Hunt⁽¹⁷⁾. Desta forma, por este critério de classificação, o eutético $\alpha-UAl_4$ pode ser considerado como não facetado-facetado. Para que o crescimento de uma das fases seja o fator determinante da morfologia, o crescimento da mesma deve se dar à frente da outra, ou seja, ser a fase em avanço^(9,15,2). Dessa forma o crescimento do UAl_4 deve se dar à frente da fase α .

A subestrutura celular apresentada tem, nas seções transversais ao crescimento unidirecional, uma forma tendendo para o losango da mesma maneira que o UAl_4 . Como o UAl_4 tem direções preferenciais de crescimento, haveria dificuldades em se promover a mudança de sua direção de crescimento e ter-se-ia, praticamente, somente α nos contornos de células.

As variáveis que influem no crescimento celular são: gradiente térmico no líquido, velocidade de crescimento e pureza da liga. Estas variáveis podem também influir na morfologia apresentada pelo eutético. Realizou-se uma série de experiências com mudança destas variáveis, principalmente velocidade de crescimento e aumento da pureza do alumínio utilizado. A figura 15 apresenta micrografia de um lingote ensaiado com uma das maiores velocidades de crescimento utilizadas, e a figura 16 uma microestrutura obtida com alumínio de maior pureza. Ao se comparar as estruturas obtidas com estas diversas variações, verifica-se que não houve mudanças sensíveis para que se pudesse tirar qualquer conclusão sobre sua influência na formação da subestrutura celular. Não se constatou, também, mudança sensível na morfologia do interior de cada célula, com as variações introduzidas durante as experiências.

Encontrou-se também estrutura dendrítica para o eutético, $\alpha-UAl_4$, fenômeno que ocorre para outros sistemas com presença de impurezas⁽²²⁾. No presente caso as impurezas presentes eram relativamente altas devido aos materiais de partida utilizados e as condições de obtenção não foram bem controladas, isto é, a solidificação unidirecional foi realizada com uma placa refrigerada numa das extremidades do lingote. Isto pode ser observado nas figuras 17 e 18, onde são apresentadas as seções longitudinais dos lingotes que apresentaram esta estrutura.

Comparando-se as micrografias das seções transversais, obtidas com diferentes velocidades de crescimento, notou-se um aumento da distância entre as plaquetas de UAl_4 , medidas perpendicularmente a uma mesma direção, com diminuição da velocidade de crescimento. Apesar de se ter obtido estruturas eutéticas com ligas de diferentes composições, e não se ter verificado qual a relação entre a velocidade de crescimento e a distância entre plaquetas, parece que uma análise cinética, semelhante àquela realizada para eutéticos lamelares⁽²⁹⁾, pode ser efetuada para a liga Al-U.

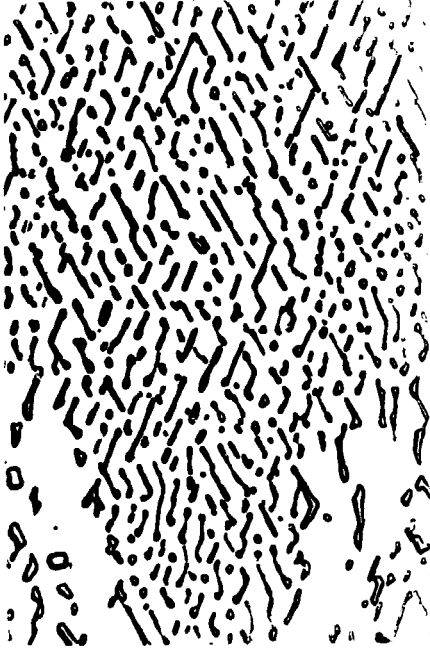


Figura 12 - Detalhe da figura anterior evidenciando o arranjo das fases, no interior das células eutéticas. R = 4 cm/h. Liga Al-13,8%U. Polimento eletrolítico. Aumento: 500 X. Ampliação: 2,5 X.



Figura 13 - Região central do lingote, apresentando as morfologias características do Al_4U proeutético. Liga Al-20%U Polimento eletrolítico. Aumento: 200 X. Ampliação: 2,5 X.

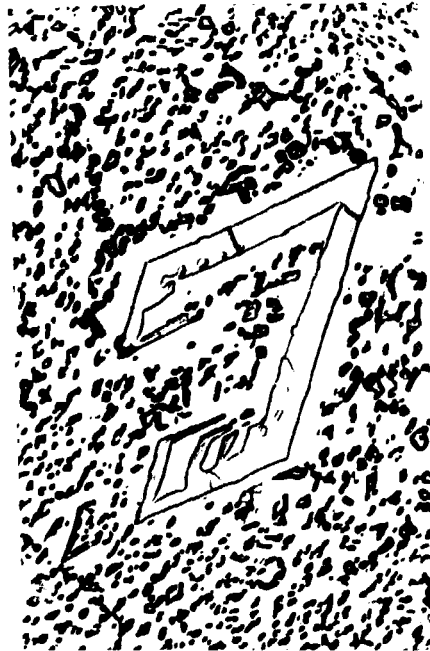


Figura 14 - Secção transversal de liga hipereutética, solidificada unidirecionalmente, mostrando a morfologia do Al_4U proeutético. R = 4 cm/h. Liga Al-18%U. Polimento eletrolítico. Aumento: 200 X. Ampliação: 2,5 X.

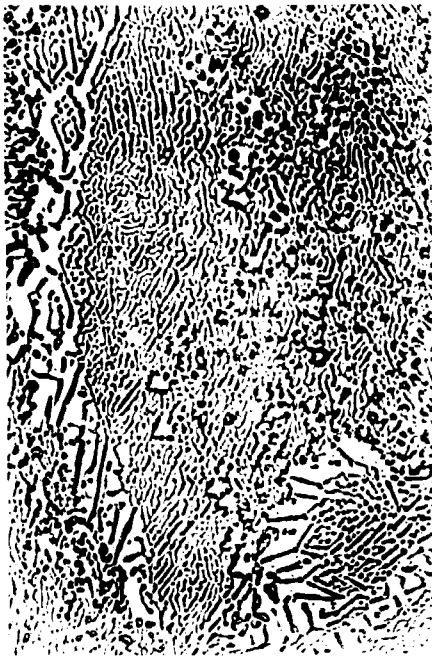


Figura 15 – Secção transversal de estrutura eutética em solidificação unidirecional. R = 27 cm/h Liga Al-15,5%U. Polimento eletrolítico. Aumento: 500 X. Ampliação: 2,5 X.



Figura 16 – Secção transversal de estrutura eutética em solidificação unidirecional obtida com materiais de maior pureza. R = 6 cm/h. Liga Al 13,3%U Polimento eletrolítico. Aumento: 500 X Ampliação: 2,5 X.

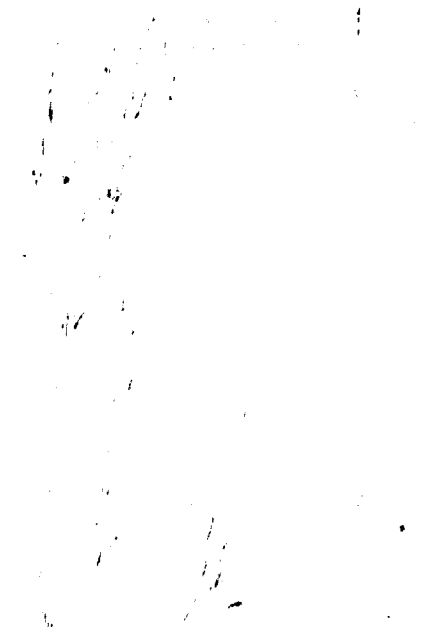


Figura 17 – Secção longitudinal da estrutura eutética obtida por vazamento sobre placa refrigerada. Verifique se um crescimento dendrítico. Liga Al 16%U. Ataque: HF a 1%. Aumento: 50 X.



Figura 18 – Detalhe da figura anterior evidenciando a maneira dendrítica de crescimento Liga Al 16%U. Ataque: HF a 1%. Aumento: 500 X.

6 – CONCLUSÕES

A parte experimental efetuada permitiu as seguintes conclusões:

- 1) Verificou-se a existência de continuidade aparente dos proeutéticos com as respectivas fases no eutético.
- 2) As morfologias eutéticas mostraram tendência para crescimento em espiral, independentemente do processo pelo qual foram obtidas.
- 3) O sistema α -UAl₃ apresentou tendência para apresentar eutéticos normais pelo critério de Scheil⁽²⁵⁾ e pode ser classificado como não facetado-facetado pelo critério de Jackson e Hunt⁽¹⁷⁾.
- 4) Não se constatou variação na morfologia do eutético, para solidificação unidirecional, na faixa de velocidades de crescimento ensaiadas. Observou-se uma subestrutura celular. Nas seções transversais as células tendiam para um formato de losango, enquanto nas longitudinais havia uma divergência de crescimento das plaquetas de UAl₃ no sentido do crescimento.
- 5) Verificou-se estrutura dendrítica para o eutético α -UAl₃, em solidificação unidirecional não controlada.
- 6) Um aumento da velocidade de crescimento provoca uma diminuição do espaçamento entre as plaquetas de UAl₃, no eutético.

ABSTRACT

The authors discuss the factors which might affect the eutectic structure, including external conditions during solidification as well as factors peculiar to each individual system. They studied the structure of the Al-U eutectic, consisting of the solid solution of uranium in aluminum and UAl₃, as obtained in ingot moulds and by unidirectional solidification, and found a tendency for the structure to develop in a spiral, in the form of a rhombus. They discuss this structure in terms of certain variables with emphasis on the growth characteristics of the phases comprising the eutectic, the velocity of growth and thermal gradient in the liquid.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMBROZIO FILHO, F. & GENTILE, E. F. Estudo sobre morfologia do eutético Pb-Sn. *Metallurgia*, São Paulo, 29:165-9, 1973.
2. BELL, J. A. & WINEGARD, W. C. Constitutional undercooling and the growth of eutectics. *J. Inst. Metals*, London, 93:457-9, 1964.
3. BRAMFITT, B. L. & LEIGHLY JUNIOR, H. P. A metallographic study of solidification and segregation in cast aluminum uranium alloys. *Metallography*, New York, 1:165-93, 1968.
4. CHADWICH, G. A. Solidification of CuAl₂-Al eutectic alloys. *J. Inst. Metals*, London, 91:169-73, 1962/63.
5. CINTRA, S. H. L. et alii. Desenvolvimento de placas combustíveis contendo núcleo de liga Al-20% U e Al-20% U-0,8% Si. *Metallurgia*, São Paulo, 24:781-7, 1968.
6. COLLINS, W. T. & MONDOLFO, L. F. Divorced eutectics. *Trans. metall. Soc. A. I. M. E.*, New York, 233:1671-6, 1965.

- 7 COOKSEY, D J S. et alii The freezing of some continuous binary eutectic mixtures. *Phil. Mag.*, London, 10:745-69, 1964
- 8 DAY, M. G Growth forms of eutectic silicon and metal-non metal eutectic systems. In: THE IRON AND STEEL INSTITUTE, London, *The solidification of metals* London, 1968. (ISI publication, 110) p 162-5
- 9 DIPPENCAR, A. et alii Nucleation and growth of the spiral eutectic Zn-MgZn₂. *J. Inst. Metals*, London, 99:137-42, 1971
- 10 FREITAS, C T. Redução de tetrafluoreto de urânio por magnésio: estudo da influência de algumas variáveis. *Metalurgia*, São Paulo, 24:131-8, 1968
11. _____ et alii Fusão e lingotagem de urânio sob vácuo em forno elétrico de laboratório. *Metalurgia*, São Paulo, 24:273-80, 1968
- 12 GENTILE, E. F. Metalografia de ligas alumínio urânio. *Metalurgia*, São Paulo, 24:187-92, 1968.
- 13 GORDON, P & KAUFMANN, A. R. Uranium aluminium and uranium iron. *Trans metall. Soc. A. I. M. E.*, New York, 188:182-94, 1950
14. HELLAWELL, A Melt growth of fibrous composite materials. In: THE IRON AND STEEL INSTITUTE, London *The solidification of metals: proceedings of the conference on..., held at Brighton from 4-7 December 1967* London, 1968 (ISI, publication-110) p 155-61
- 15 HELLAWELL, A The microstructure and crystallography of the Al-Ge eutectic. *Trans. metall. Soc. A. I. M. E.*, New York, 239:1049-55, 1967
16. HOGAN, L. M. et alii Eutectics grains. *Adv Mater. Res.*, New York, 5:83-216, 1971.
17. HUNT, J D. & JACKSON, K A. Binary eutectic solidification. *Trans. metall. Soc. A. I. M. E.*, New York, 236:843-52, 1966.
18. JACKSON, K A. Mechanism of growth. In: AMERICAN SOCIETY OF METALS, Metals Park, Ohio. *Liquid metals and solidification* Metals Park, Ohio, 1958. p 174-86
19. JONES, R R & KRAFT, R W The structure of the Zn-Mg₂Zn₁₁ eutectic. *Trans. metall. Soc. A. I. M. E.*, New York, 242:1891-5, 1968.
20. LIVINGSTON, J. D. Growth of duplex crystals. *Mater. Sci. Engng*, Lausanne, 7:61-70, 1971.
21. LUX, B On the theory of spheroidal graphite formation in cast iron. *Cast Metals Res. J.*, 8(2):49-65, 1972
22. ROHATGI, P K Colony to two-phase dendrite transition in Al-NiAl₃ eutectic structures by additions of barium, cerium and cesium to the melt. *Metals Trans.*, New York, 1:1041-3, 1970.
23. ROUGH, F A & BAUER, A. A. *Constitution of uranium and thorium alloys*. Columbus, Ohio, Battelle Memorial Institute, June 1958 (BMI-1300)
24. SALKIND, M. J. et alii Wisker composites by eutectic solidification. In: LEVITT, A. P., ed. *Wisker technology* New York, Wiley Interscience, 1970 p 343-98.
25. SCHEIL, E Eutectic crystallization. *Z. Metallk.*, Berlin, 45:298-309, 1954

26. SMITH, R. W. Modification of aluminum-silicon alloys. In: THE IRON AND STEEL INSTITUTE, London. *The solidification of metals*. London, 1968. (ISI publication, 110). p. 224-37.
27. SOUZA SANTOS, T. D. Comunicação pessoal, 1970.
28. STORHOK, V. W. et alii. *A study of the liquidus in aluminum-uranium alloys*. Columbus, Ohio, Battelle Memorial Institute, May, 1958. (BMI-1264).
29. TILLER, W. A. Polyphase solidification. In: AMERICAN SOCIETY OF METALS, Metals Park, Ohio. *Liquid metals and solidification*. Metals Park, Ohio, 1958. p. 276-318.
30. YUE, A. S. Origin of rod-like eutectic. *J. Inst. Metals*, London, 92:248, 19^o3/64.

