



AVALIAÇÃO DA MORFOLOGIA MICROESTRUTURAL DAS LIGAS Al-Si EUTÉTICO E Al-15%Si SOLIDIFICADAS UNIDIRECIONALMENTE¹

Fabício Dias Magalhães²
Marcelo Torres de Oliveira³
Flaviano dos Santos Rodrigues⁴
Adriano Alves Rabelo⁵

Resumo

A solidificação unidirecional é um processo que busca dar preferência a uma direção de extração de calor, para que uma estrutura de solidificação possa nuclear e crescer. Um forno adaptado a um sistema de refrigeração, com termopares acoplados, foi construído para podermos registrar a evolução da temperatura, estabelecendo relações entre parâmetros térmicos e morfologia das ligas em função da composição, avaliando diferentes microestruturas e ensaios de dureza da liga Al-Si eutética e hipereutética. Com a metalógrafia realizada foi possível estudar a microestrutura, foram quantificadas as porcentagens de precipitados, e análise da morfologia na forma de placas e agulhas de Si dispersas na estrutura dos lingotes, e determinação de um perfil de dureza das estruturas foi obtido. Foram Avaliadas nas estruturas das ligas confeccionadas uma variação morfológica em virtude da concentração de soluto nas ligas Al-12 e 15%Si. A liga Al-15%Si apresentou em sua estrutura precipitados na forma de agulhas e grande concentração de placas de diversos tamanhos. Tanto as formas de agulhas e de placas dos precipitados ganharam uma orientação preferencial em virtude da extração de calor direcional. A dureza tem comportamento diretamente proporcional ao teor de Si, apresentando decréscimo de dureza da base para o topo do lingote.

Palavras-chave: Solidificação; Estruturas; Espaçamentos.

EVALUATION OF MICROSTRUCTURAL MORPHOLOGY OF THE ALLOY Al-Si EUTECTIC AND Al-15%Si SOLIDIFY VALVE

Abstract

The unidirectional solidification is a process that seeks to give preference to a direction of extraction of heat, so that solidification structure to nuclear and grow. An oven set for a refrigeration system, coupled with thermocouples, was built to be able to record the evolution of temperature, correlating thermal parameters and morphology of the alloys as a function of composition, evaluating different microstructures and hardness tests of the Al-Si eutectic and hypereutectic. With the metallography could be carried out to study the microstructure were quantified as percentages of precipitates, and analysis of morphology in the form of plates and needles of Si dispersed in the structure of ingots, and determination of a hardness profile of the structures was obtained. Evaluated were the structures of alloys prepared a morphological variation due to the concentration of solute in the alloys Al-12 and 15% Si The alloy Al-15% Si presented in its structure precipitates in the form of needles and large concentration of plates of various sizes. Both types of needles and plates of precipitates won a preferred orientation due to the extraction of directional heat. The hardness behavior is directly proportional to the concentration of Si, showing a decrease of hardness from the base to the top of the block.

Key words: Solidification; Structures; Spacing.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Aluno de Graduação de Engenharia de Materiais – UFPA – Fabricio742@hotmail.com

² Aluno de Graduação de Engenharia de Materiais – UFPA - oliveira.engmat@gmail.com

³ Aluno de Graduação de Engenharia de Materiais – UFPA - rodriguesengmat05@hotmail.com

⁴ Professor Dr. do curso de Engenharia de Materiais – UFPA - adrianoalves@ufpa.br



1 INTRODUÇÃO

As ligas Al-Si conhecidas como ligas da série A3XX.X, perfazem aproximadamente 90% de todos os produtos fundidos de Alumínio. A razão para a ampla utilização desta série deve-se à atrativa combinação entre propriedades mecânicas e a excelente fundibilidade. As propriedades das ligas Al-Si são fortemente dependentes do processo de fundição usado, das adições de elementos para modificação do eutético, da estrutura granulométrica, da morfologia do silício primário e do tratamento do metal líquido.⁽¹⁾ A busca por materiais que apresentem uma boa relação resistência/densidade aliada a outras propriedades tecnológicas de importância para a indústria, geralmente, leva à seleção de uma liga não-ferrosa. As ligas de alumínio encontram uma grande variedade de uso na indústria, pela combinação única de propriedades, tais como: a baixa densidade; alta resistência mecânica; resistência à corrosão; reciclagem; durabilidade; ductilidade e boa condutividade térmica e elétrica.⁽²⁾

Parâmetros microestruturais tais como o tamanho de grão, espaçamento celular e dendrítico, segregação e formação de porosidade são fortemente influenciados pelo comportamento térmico do sistema metal/molde durante a solidificação, impondo uma relação estreita entre este e a microestrutura resultante. A análise da correlação entre microestrutura e parâmetros de solidificação é facilitada quando se impõe uma solidificação unidirecional.

Predições de espaçamentos dendríticos confiáveis na solidificação transitória são de importância primordial para uma estrutura sem defeitos, já que esta classe de fluxo de calor predomina na maioria dos processos industriais de solidificação. Bouchard e Kirkaldy estabeleceram um compêndio de formulações para determinação de espaçamentos dendríticos primários e secundários, tanto para solidificação em regime estacionário quanto transitório.⁽³⁾

Gündüz e Çadirli, também realizaram experimentos de solidificação unidirecional com diferentes ligas do sistema Al-Cu em função dos parâmetros de solidificação, como gradiente de temperatura, taxa de crescimento e composição. As ligas foram solidificadas com gradiente de temperatura constante. Os parâmetros microestruturais como: espaçamentos dendríticos primários (λ_1) e secundários (λ_2), raio da ponta da dendrita e profundidade da zona pastosa foram medidos e expressos em função dos parâmetros de solidificação. Os resultados tiveram boa concordância com resultados experimentais prévios e modelos teóricos sugeridos para o crescimento dendrítico.⁽⁴⁾

As ligas Al-12%Si e Al-15%Si foram produzidas para estudo da morfologia das placas e agulhas de silício, dispersas na matriz de alumínio. Após realização de uma medição dos ângulos preferenciais de deposição das placas de silício foi realizado o estudo microestrutural, para quantificação dos espaçamentos dendríticos secundários e ensaio de dureza.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As ligas Al-12%Si e Al-15%Si utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho foram obtidas a partir dos elementos comercialmente puros, fundidos em um forno tipo mufla a temperatura de 760 °C. A solidificação foi realizada por meio de um dispositivo de solidificação unidirecional vertical ascendente, que consiste em um forno tubular aquecido radialmente com resistências do tipo global, acrescido de um sistema de refrigeração a água na parte inferior Figura 1 e 2. Foi utilizada uma

lingoteira, de seção cônica, de aço inoxidável SAE 310 com 150 mm de altura. Neste trabalho adotou-se superaquecimento de 10% acima da temperatura *liquidus* das ligas.

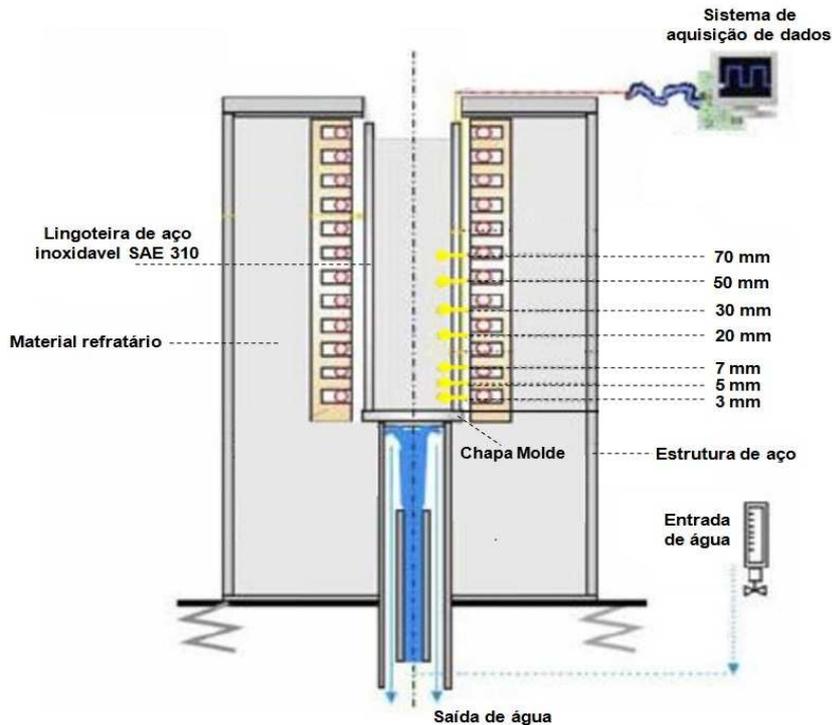


Figura 1. Representação esquemática do sistema de solidificação unidirecional.⁽⁵⁾



Figura 2. Forno vertical refrigerado a água utilizado no processo de solidificação.

A temperatura no metal foi monitorada durante a solidificação através de um conjunto de 7 termopares tipo K, dispostos ao longo da lingoteira nas posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm em relação à base da lingoteira. Todos os termopares foram conectados a um registrador ligado a um computador para aquisição automática de dados.

Após a confecção dos lingotes, os mesmos foram seccionados longitudinalmente e posteriormente lixados, em lixadeira rotativa utilizando-se uma seqüência de lixas de carbetto de silício 100 mesh, 220 mesh, 320 mesh, 400 mesh e 600 mesh. Para revelação da macroestrutura as superfícies das amostras foram atacadas com solução ácida composta por 20 ml HCl, 20 ml HNO₃ e 5 ml HF em

25 ml de H₂O.⁽⁵⁾ Após a caracterização macroestrutural foram retiradas 7 amostras referentes as posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm, em relação a base do lingote, Figura 3, estas foram submetidas a um novo lixamento com uma seqüência de lixas de carbeto de silício 100 mesh, 220 mesh, 320 mesh, 400 mesh, 600 mesh, 800 mesh, 1.000 mesh e 1.200 mesh e polimento em uma polítriz rotativa. Foi utilizado como abrasivo pasta de diamante de 9 μ , 6 μ , 3 μ , 1 μ e 1/4 μ . As faces polidas foram atacadas com o reagente 5%NaOH em água destilada, para revelar suas microestruturas.⁽⁵⁾

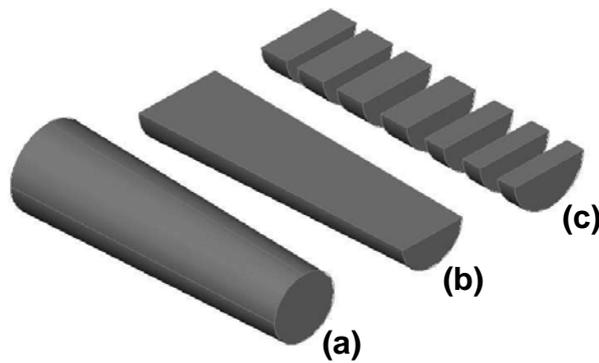


Figura 3. Esquema referente à preparação das amostras: (a) Lingote inteiro, (b) Corte longitudinal para caracterização macroestrutural e (c) cortes para caracterização microestrutural.

A caracterização continuou com a captura de imagens da microestrutura das amostras por meio de um microscópio óptico metalográfico seguido da quantificação dos espaçamentos dendríticos secundários (EDS), representados por λ_2 . Os valores de λ_2 foram medidos de acordo com esquema mostrado na Figura 4. Este método consiste em calcular o valor de λ_2 através da média das distâncias entres os braços adjacentes (ramificações secundárias) sobre a seção longitudinal (paralela ao fluxo de calor ou a direção de crescimento) de uma dendrita primária, onde n é o número de braços secundários. Desta forma foram realizadas vinte medições de λ_2 para cada posição, a partir da interface metal/molde.

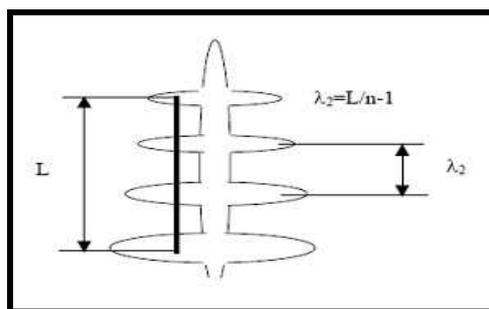


Figura 4. Esquema para quantificação do parâmetro λ_2 .⁽⁵⁾

Os procedimentos experimentais foram finalizados com o ensaio de dureza HLD, realizados em uma máquina da marca equotip 3, foi realizada uma varredura nas posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm da base do lingote.

No final da primeira fase de trabalho foram realizadas investigações nas formas morfológicas do silício presente na matriz de Al.

3 RESULTADOS

Na Figura 5 são apresentadas as imagens das macroestruturas de solidificação para as ligas Al-12%Si e Al-15%Si, onde se nota a presença de grãos equiaxiais grosseiros na liga Al-12%Si compreendendo quase 50% da estrutura, na liga Al-15%Si se verifica uma zona equiaxial e uma zona colunar refinada.

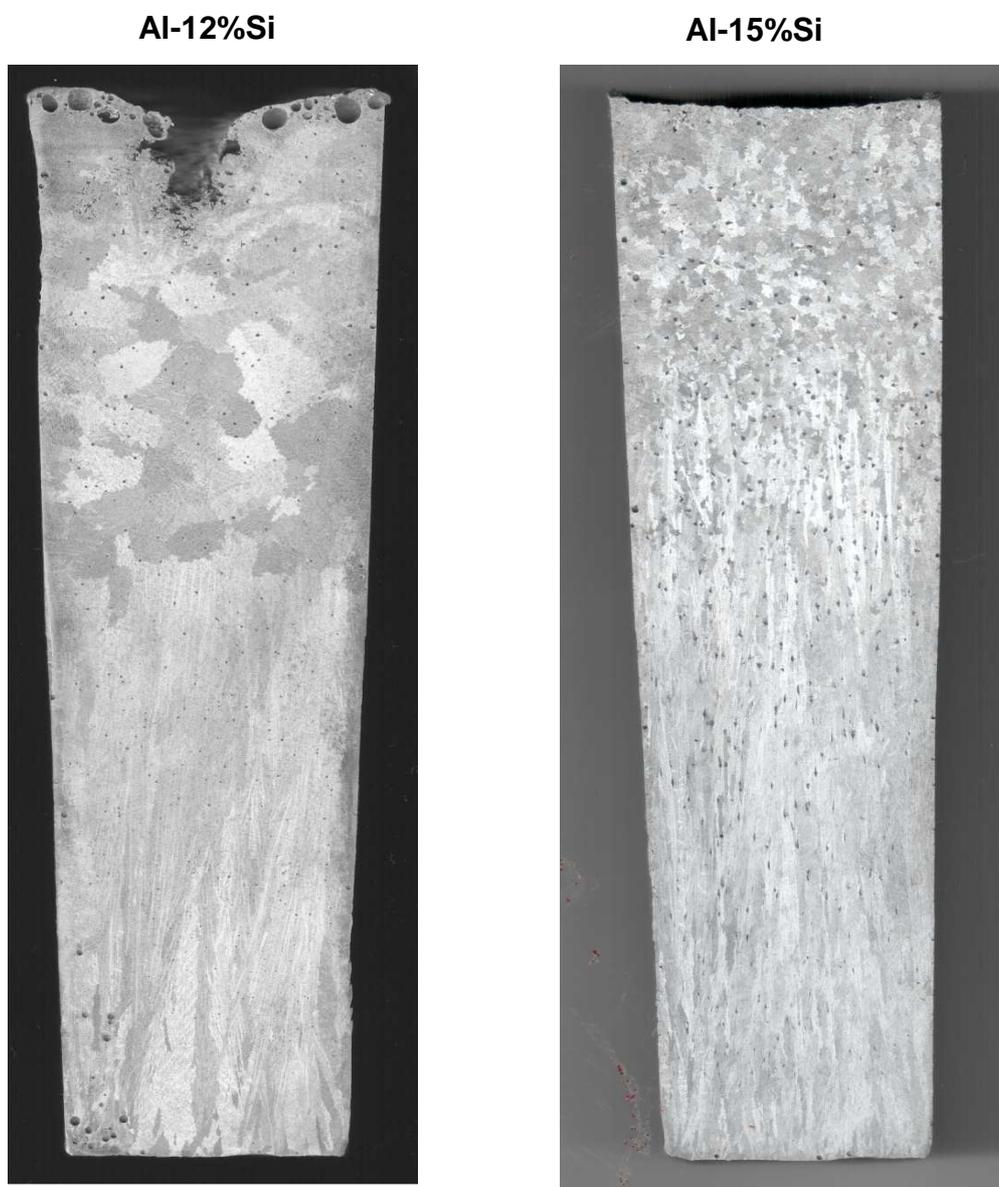


Figura 5. Macroestruturas das ligas: (a) Al-12%Si e (b) Al-15%Si, solidificadas unidirecionalmente.

Através das macroestruturas foram determinadas as posições da transição colunar/equiaxial para os dois lingotes submetidos à solidificação direcional. As posições em relação à base do lingote são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Posição da TCE em relação à base do lingote

Liga	TCE
Al – 12%Si	80 mm
Al – 15%Si	85 mm

Nas Figuras 6 e 7, são mostradas imagens das microestruturas para as ligas de trabalho. É possível verificar, através das imagens que os espaçamentos dendríticos secundários tornam-se cada vez maiores à medida que se avança a solidificação.

Al-12%Si

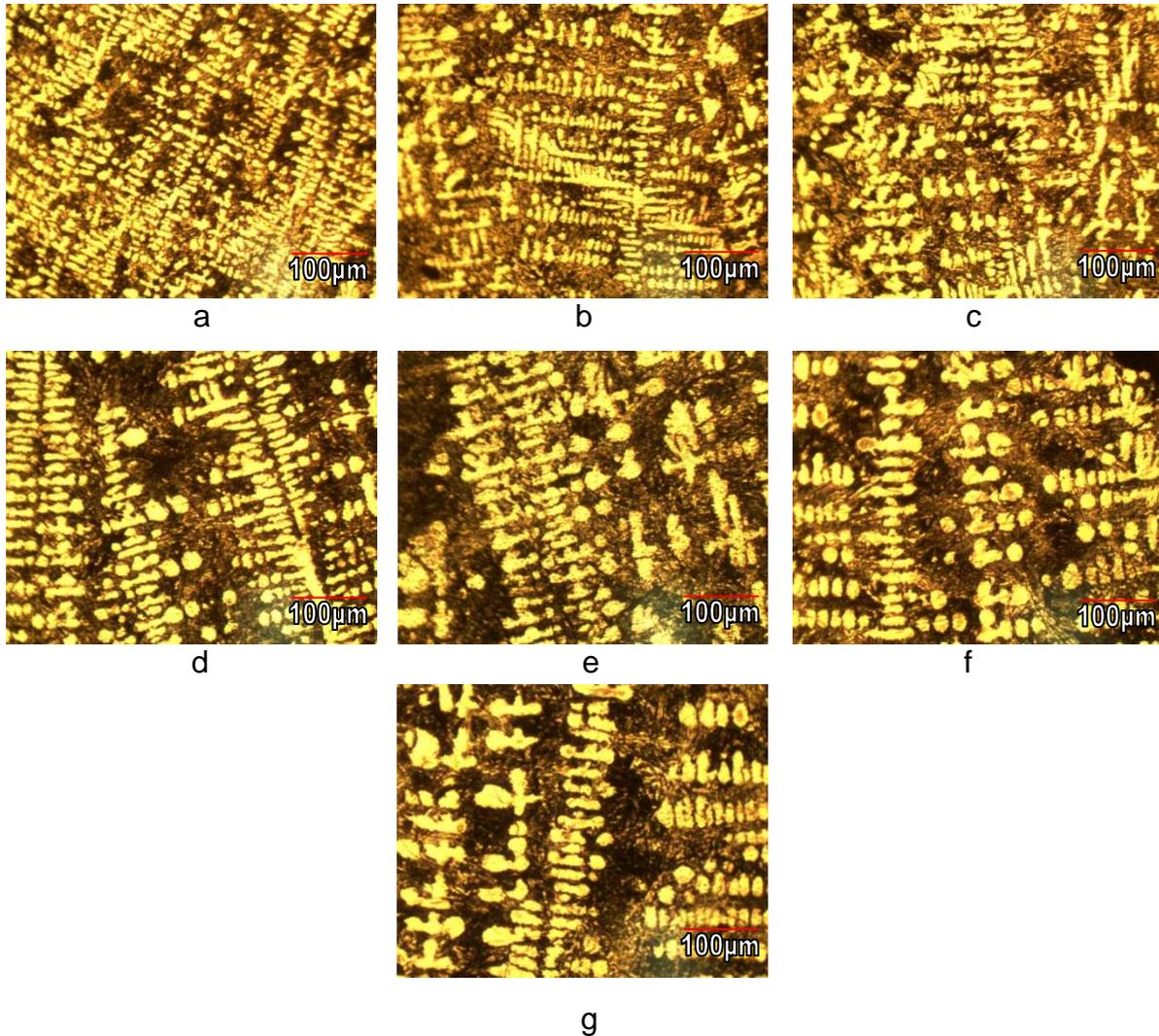


Figura 6. Micrografias da liga Al-12%Si contendo os espaçamentos dendríticos secundários para as posições (a) 3 mm, (b) 5 mm, (c) 7 mm, (d) 20 mm, (e) 30 mm, (f) 50 mm e (g) 70 mm em relação a base da lingoteira (aumento de 100x).

Al-15%Si

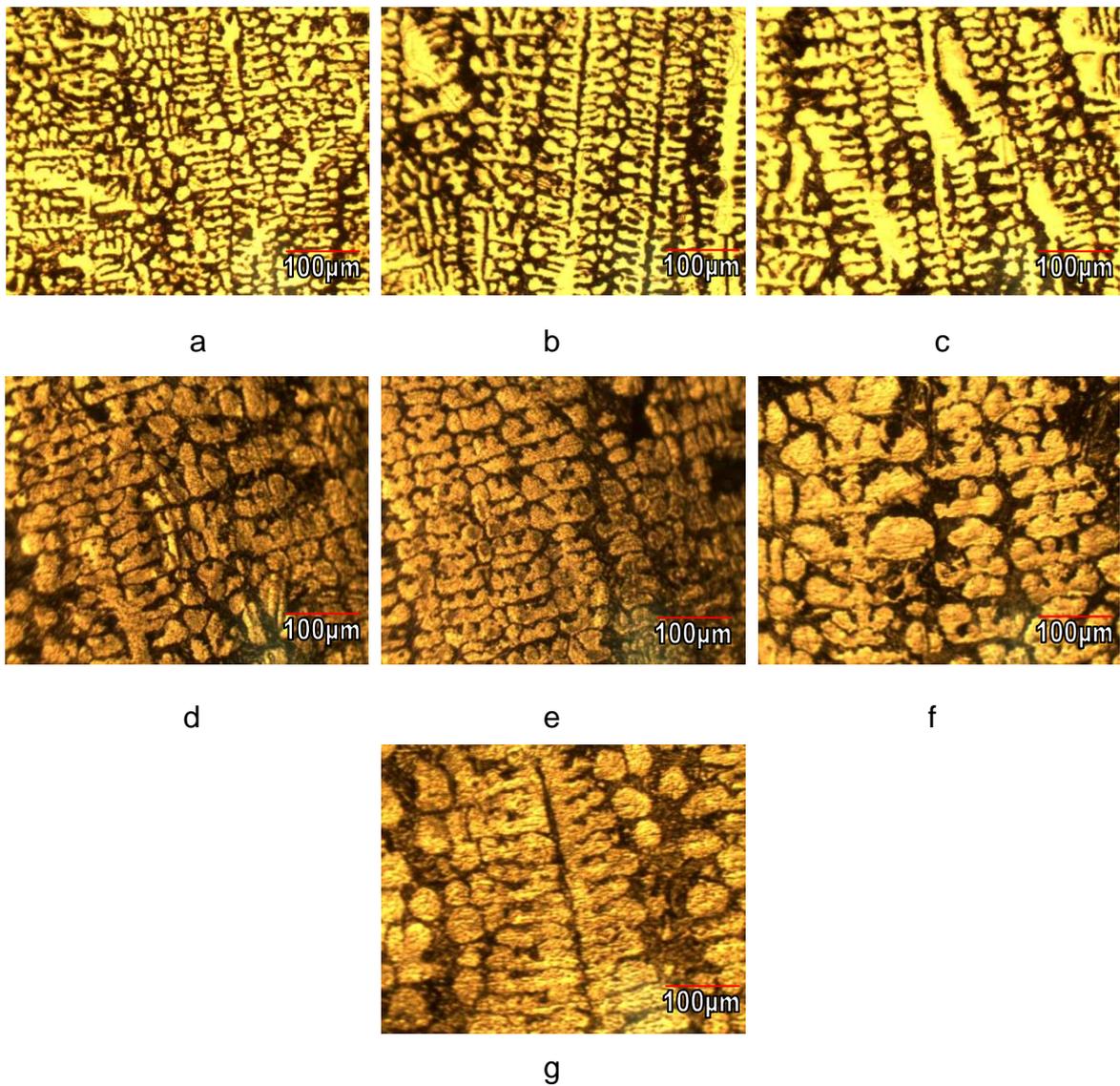


Figura 7. Micrografias da liga Al-15%Si contendo os espaçamentos dendríticos secundários para as posições (a) 3 mm, (b) 5 mm, (c) 7 mm, (d) 20 mm, (e) 30 mm, (f) 50 mm e (g) 70 mm em relação a base da lingoteira. (aumento de 100x)

Na liga Al-12%Si é possível observar a ocorrência de uma fase interdendrítica de grande concentração entre os braços dendríticos e em todas as posições estudadas. Na liga Al-15%Si essa fase interdendrítica é maior nas posições mais afastadas da base do lingote (50 mm e 70 mm)

As médias dos resultados dos espaçamentos dendríticos secundários são mostradas na Tabela 2.



Tabela 2. Valores médios dos EDS (λ_2)

Posições (mm)	λ_2 (μm)	
	Al - 12%Si	Al - 15%Si
3	15,8	22,2
5	17,8	26,3
7	21,7	30,8
20	23,3	37,7
30	25,6	47,5
50	26,1	66,9
70	30,4	66,8

Pode se notar na tabela que os EDS da liga Al-12%Si apresentaram uma redução quando comparados com os EDS da liga Al-15%Si, uma concentração mais acentuada de uma fase interdendrítica na liga Al-12%Si pode ter ocasionado um refino das estruturas dendríticas na liga.

Nos fráficos das Figuras 8 e 9 estão representados os espaçamentos dendríticos das ligas Al-12 e 15%Si onde se observa a evolução do λ_2 .

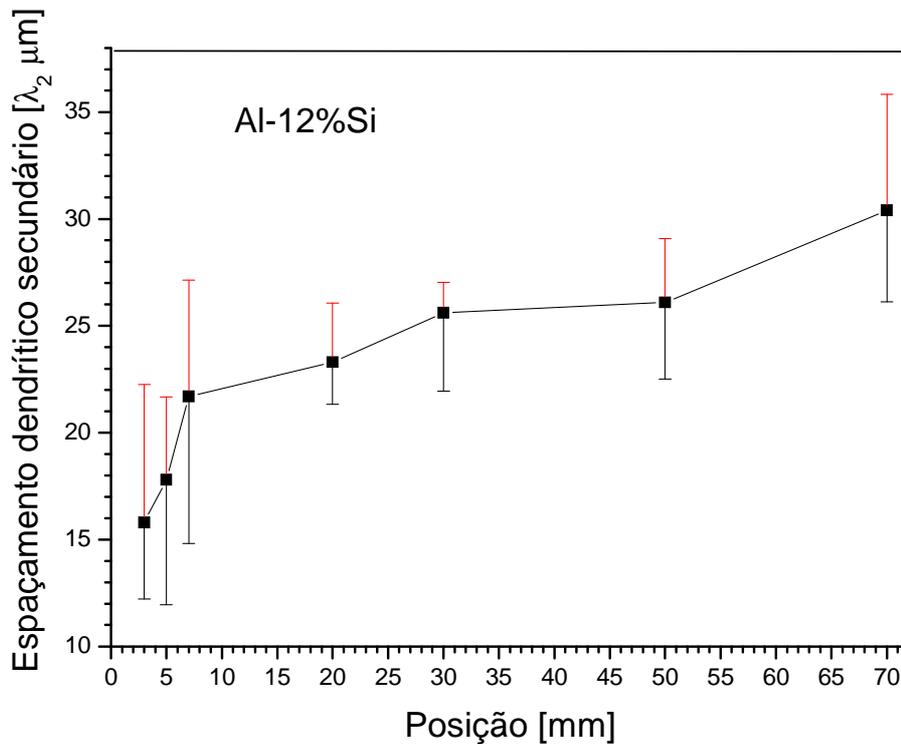


Figura 8. Espaçamentos dendríticos secundários para as posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm em relação à base do lingote, liga Al-12%Si.

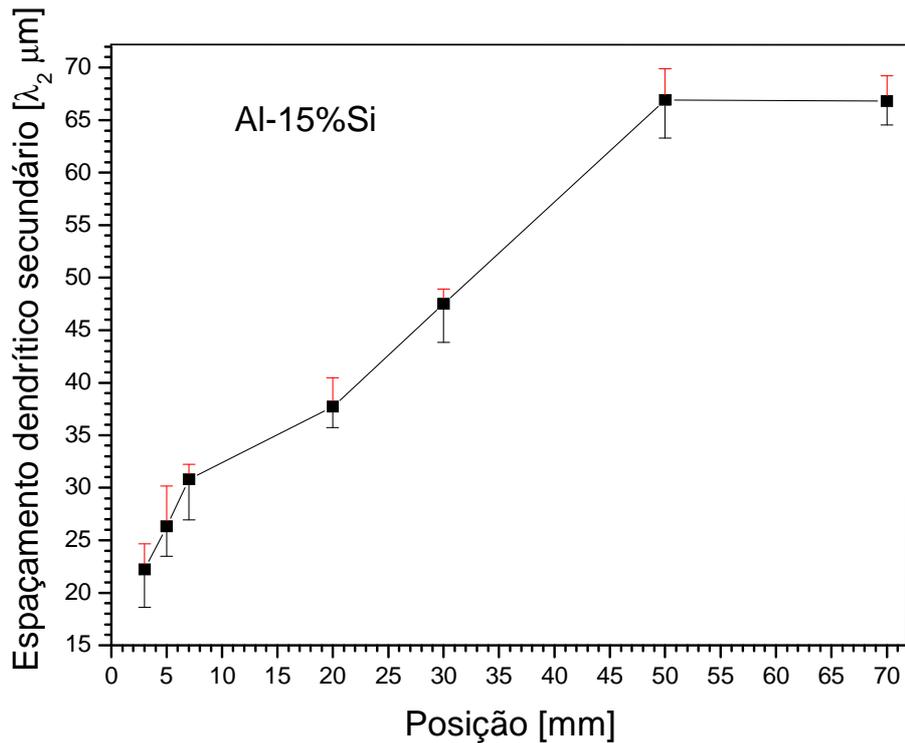


Figura 9. Espaçamentos dendríticos secundários para as posições 3 mm, 5 mm, 7 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm em relação à base do lingote, liga Al-15%Si.

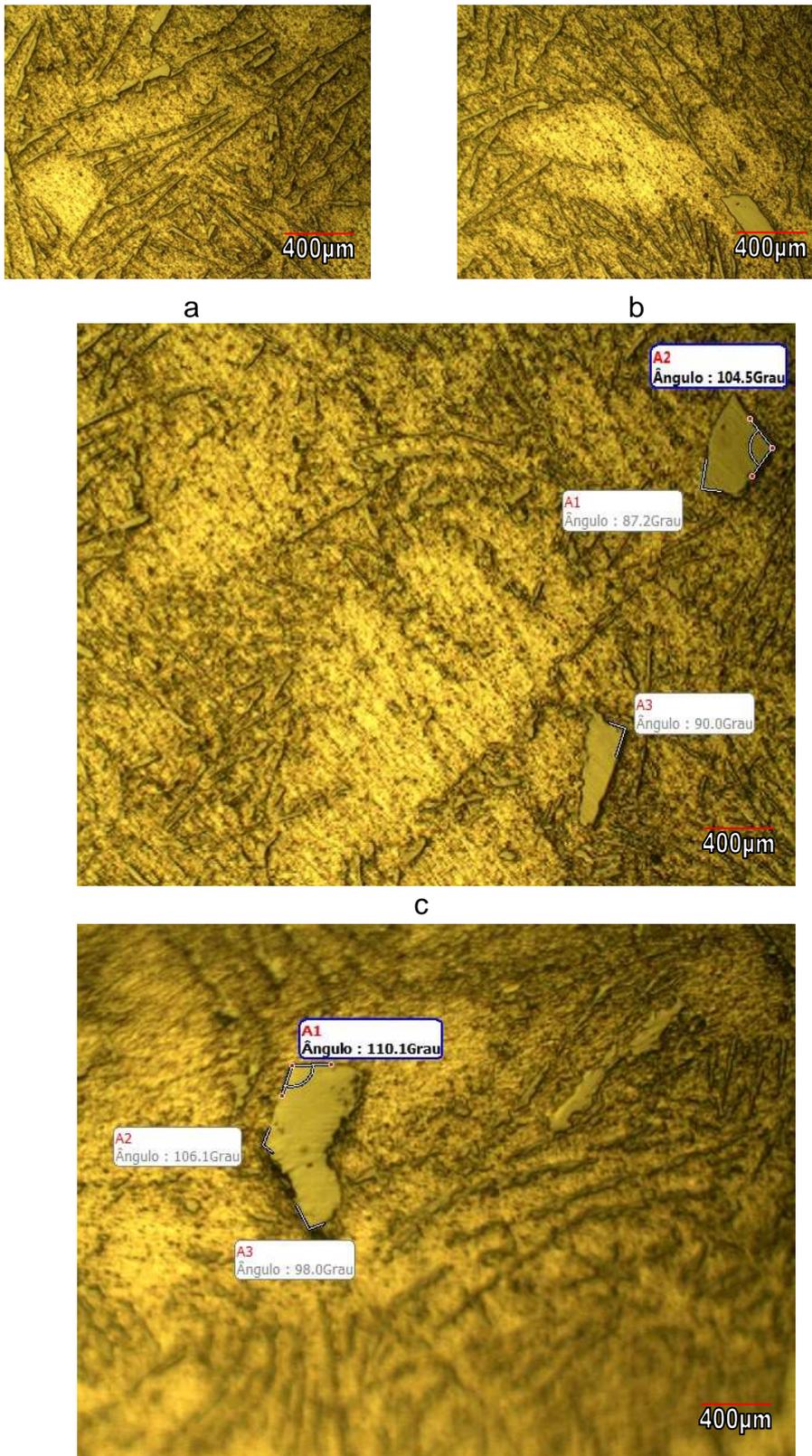
A Tabela 3 mostra os resultados obtidos por meio de ensaio de dureza HLD.

Tabela 2. Valores médios para o ensaio de dureza

Posições (mm)	Dureza HLD	
	Al - 12%Si	Al - 15%Si
3	128	133
5	127	131
7	116	128
20	98	112
30	93	109
50	87	95
70	88	98

As ligas apresentaram uma redução de dureza entre as posições 3 e 70 mm da base do lingote, a liga Al-15%Si proporcionou uma dureza maior que a liga Al-12%Si. A morfologia das ligas Al-12%Si e Al-15%Si (forma dos precipitados de agulhas e placas de Si depositados entre as ramificações dendríticas) são mostradas respectivamente nas Figuras 10 e 11 (aumento de 400x).

Al-12%Si



d

Figura 10. Micrografias da liga Al-12%Si contendo as formas dos precipitados (formas de agulhas e placas) de Si depositados entre as ramificações dendríticas, originados durante a solidificação unidirecional, posição (a), (b), (c) e (d) 20 mm da base do lingote. (aumento de 400x)

Al-15%Si

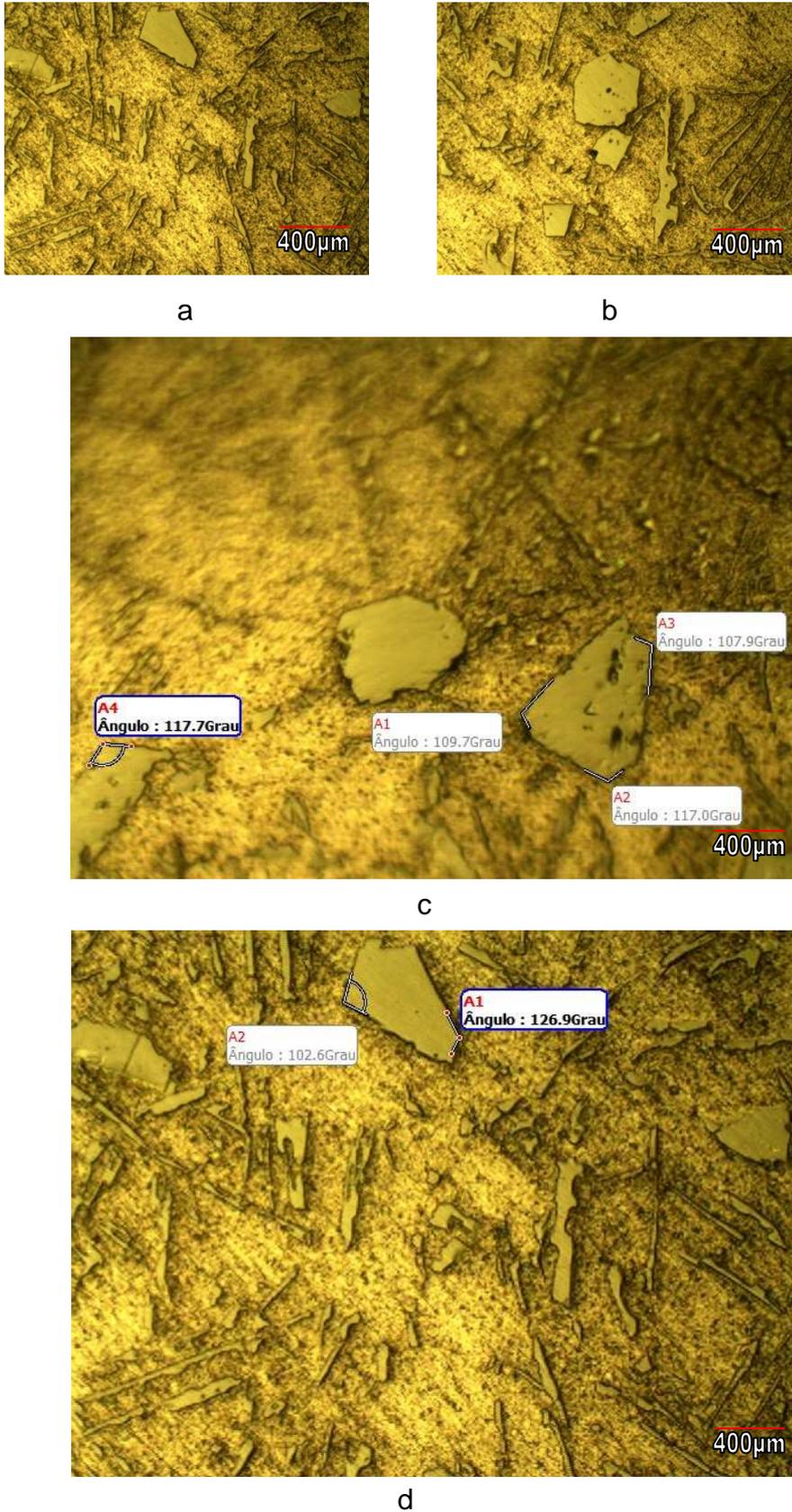


Figura 11. Micrografias da liga Al-15%Si contendo as formas dos precipitados (formas de agulhas e placas) de Si depositados entre as ramificações dendríticas, originados durante a solidificação unidirecional, posição (a), (b), (c) e (d) 20 mm da base do lingote. (aumento de 400x)

Com as micrografias obtidas, no aumento de 400x foi possível determinar o ângulo preferencial de deposição dos precipitados de silício, na forma de placas, para as ligas Al-12%Si e Al-15%Si na posição de 20 mm da base do lingote, conforme Tabela 4.

Tabela 4. Valores médios para os ângulos preferências de deposição

Ângulos (medidos na posição 20 mm)	
Al - 12%Si	Al - 15%Si
104,5	117,7
87,2	109,7
90	117
110,1	107,9
106,1	102,6
98	126,9

4 DISCUSSÃO

Os lingotes produzidos pela solidificação unidirecional nas composições Al-12%Si e Al-15%Si sofreram grandes variações macroestruturais, em função do teor de Si, a liga Al-12%Si apresentou grãos de estruturas grosseiras e a liga Al-15%Si grãos de estrutura refinada, a posição da TCE não sofreu variação com o aumento do teor de soluto.⁽⁵⁾ Os espaçamentos dendríticos secundários das microestruturas aumentaram conforme o avanço da solidificação da base para o topo do lingote.⁽⁶⁾ As medidas dos EDS da liga Al-15%Si, mostraram que em virtude do aumento do teor de Si nessa faixa de composição, os EDS tornaram-se maiores, o que resultou em uma redução da fase interdendrítica presente em grande concentração na liga Al-12%Si. A liga Al-15%Si teve sua dureza em média superior a liga Al-12%Si. As posições mais próximas a base do lingote apresentaram uma concentração maior de agulhas de Si, nas posições mais distantes da base, os precipitados ganharam um formato esférico devido o tempo de solidificação superior, dando condições dos precipitados crescerem, esse maior tempo de solidificação resultou em um aumento dos ângulos em função da posição (mm) no lingote.

5 CONCLUSÃO

A liga Al-12%Si apresentou uma grande concentração de fase interdendrítica, que causou uma redução nos espaçamentos dendríticos secundários, redução da dureza em relação à liga Al-15%Si, os precipitados (agulhas e placas) apresentaram se distribuídos por toda estrutura com uma concentração de placas superior nas posições 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm da base do lingote. A liga Al-15%Si apresentou uma pequena concentração da fase interdendrítica nas posições 20 mm, 30 mm, 50 mm e 70 mm da base do lingote, a propriedade mecânica dureza da liga Al-15%Si aumentou em relação à dureza da liga Al-12%Si, os espaçamentos dendríticos secundários aumentaram com o teor de Si. A liga Al-15%Si apresentou concentração maior de precipitados na forma de placas com ângulos na faixa de 110°.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Pará pelo incentivo aos alunos.

REFERÊNCIAS

- 1 Zoqui, E.J. Obtenção e Caracterização de Ligas Al-Si Reofundidas, **Tese de Livre Docência, Unicamp**, SP, 2001.
- 2 P.R Goulart, J.E. Spinelli, W.R. Osório, A. Garcia, Mater. **Sci. ENG.** A 421 (2006) 245-253.
- 3 Bouchard, D; Kirkaldy, J. S., 1997, Prediction of Dendrite Arm Spacings in Unsteady and Steady-State Heat Flow of Unidirectionally Solidified Binary Alloys, **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 28B, pp.651-663.
- 4 Gündüz, M.; Çadirli, E. Directional solidification of aluminium–copper alloys. **Materials Science and Engineering A**, v.327, p.167-185, 2002.
- 5 PERES, M.D. Desenvolvimento da macroestrutura e da microestrutura na solidificação unidirecional transitória de ligas Al-Si, Tese de doutorado, **Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP**, Campinas – São Paulo. 2005.
- 6 GARCIA, A.; Solidificação: **Fundamentos e Aplicações**, Editora da **UNICAMP**, São Paulo 2001. cap. 8, p. 281-294.