

**Parâmetros térmicos, estrutura e propriedades mecânicas resultantes da solidificação horizontal das ligas de Alumínio com adição de 3 e 5% de Níquel****Thermal parameters, structure and mechanical properties resulting from the horizontal solidification of aluminum alloys with the addition of 3 and 5% Nickel**

DOI:10.34117/bjdv6n12-215

Recebimento dos originais: 10/11/2020

Aceitação para publicação: 10/12/2020

**Ricardo Nazareno Costa França**

Mestre em Engenharia Industrial

Instituição: Universidade Federal do Pará (UFPA)

Endereço: R. Augusto Corrêa, 01 - Guamá, Belém - PA, 66075-110

E-mail: ricardoncf86@gmail.com

**Gregory de Oliveira Miranda**

Graduando em Engenharia Mecânica

Instituição: Universidade Federal do Pará (UFPA)

Endereço: R. Augusto Corrêa, 01 - Guamá, Belém - PA, 66075-110

E-mail: gregmirandamail@gmail.com

**Laércio Gouvêa Gomes**

Professor Doutor Permanente

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais - PPGEMAT/UFPA e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial - PPGEI/UFPA

Endereço: R. Augusto Corrêa, 01 - Guamá, Belém - PA, 66075-110

E-mail: laercio.gouvea@gmail.com

**RESUMO**

O objetivo do estudo experimental é avaliar os parâmetros de solidificação, a estrutura e as propriedades mecânicas no processo de solidificação horizontal de ligas binárias de composição Al-3%Ni e Al-5%Ni e efetuar a correlação entre os mesmos. Foram realizados ensaios de microdureza e tração, além de análise micro e macroestrutural. Os parâmetros de solidificação foram obtidos através de aquisição de dados de temperatura. Os resultados encontrados mostraram uma zona intermediária entre a zona colunar e equiaxial denominada de zona de grãos plumosos. Os ensaios mecânicos mostraram que os maiores valores de microdureza e de LRT localizam-se nas regiões com maiores espaçamentos dendríticos.

**Palavras-chave:** Solidificação horizontal, Ensaio de tração, Microdureza, Ligas Al-Ni.**ABSTRACT**

The objective of the experimental study is to evaluate the solidification parameters, the structure and the mechanical properties in the horizontal solidification process of binary alloys of Al-3% Ni and Al-5% Ni and to correlate them. Microhardness and tensile tests were performed, in addition to micro and macrostructural analysis. The solidification parameters were obtained through the acquisition of temperature data. The results found showed an intermediate zone between the columnar and equiaxial

zones called the feathery grains zone. The mechanical tests showed that the highest values of microhardness and UTS are located in regions with larger dendritic spacing.

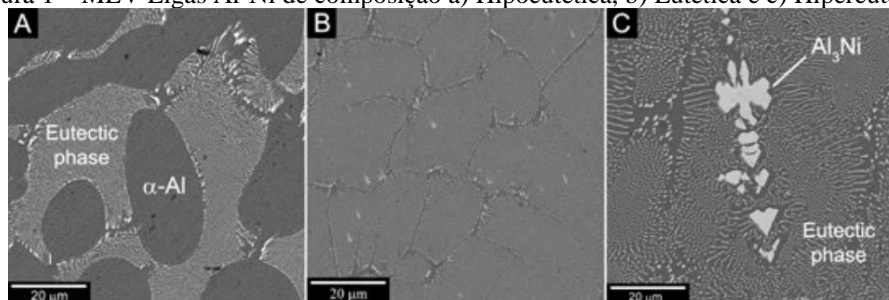
**Keywords:** Horizontal solidification, Tensile test, Microhardness, Al-Ni alloys.

## 1 INTRODUÇÃO

O alumínio e suas ligas são os materiais estruturais mais importantes para aplicações industriais devido as suas excelentes propriedades mecânicas e resistência à corrosão combinadas com sua baixa densidade, possibilitando combinar suas propriedades, permitindo a fabricação e utilização em larga escala (MARTÍNEZ-VILLALOBOS et al, 2016).

Considerando o particular estudo de ligas Al-Ni, dentro da faixa de composições hipoeutéticas (Figura 1a), a microestrutura de solidificação é compreendida de uma matriz dendrítica de fase  $\alpha$  rica em alumínio, com uma mistura eutética na região interdendrítica formada por  $(\alpha)$ , e o composto intermetálico  $Al_3Ni$ .

Figura 1 – MEV Ligas Al-Ni de composição a) Hipoeutética, b) Eutética e c) Hipereutética.

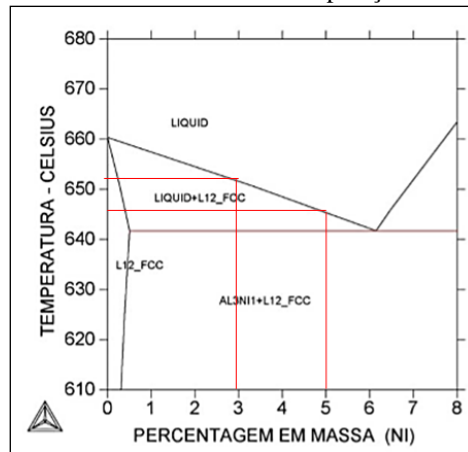


Fonte: MARTÍNEZ-VILLALOBOS et al., 2016.

Desta forma, o objetivo do estudo experimental é avaliar os parâmetros de solidificação, a estrutura e as propriedades mecânicas no processo de solidificação horizontal de ligas binárias de composição Al-3%Ni e Al-5%Ni e efetuar a correlação entre os mesmos.

A Figura 2 exibe o trecho do diagrama de equilíbrio Al-Ni nas composições utilizadas neste trabalho (3 e 5%). De forma cooperativa, o crescimento dessa mistura eutética ocorre durante a solidificação e se mantém localizada entre os braços dendríticos (JONES, 2005).

Figura 2 – Diagrama de equilíbrio Al-Ni destacando as composições de 3 e 5% utilizadas neste trabalho.



## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 OBTENÇÃO DAS LIGAS

A liga utilizada foi obtida a partir de alumínio com pureza comercial (98,31%) e níquel com (98,16%) de pureza. O corte do alumínio foi realizado com o auxílio de uma serra de fita e o níquel foi preparado em forma de limalha e pesado com o auxílio de uma balança. O alumínio foi colocado em um cadinho de carbetto de silício, e em seguida foi levado a um forno tipo mufla. Devido às temperaturas de fusão dos componentes da liga serem muito diferentes, aproximadamente 660°C para o Al e 1453 °C para o Ni, a liga foi obtida mediante o mecanismo de difusão do soluto na matriz líquida do solvente, o que ocorreu da seguinte forma: Após a total fusão do alumínio o cadinho foi retirado do forno e o níquel na forma de cavacos foi adicionado ao metal líquido. A Figura 3 exibe os materiais utilizados nesta etapa.

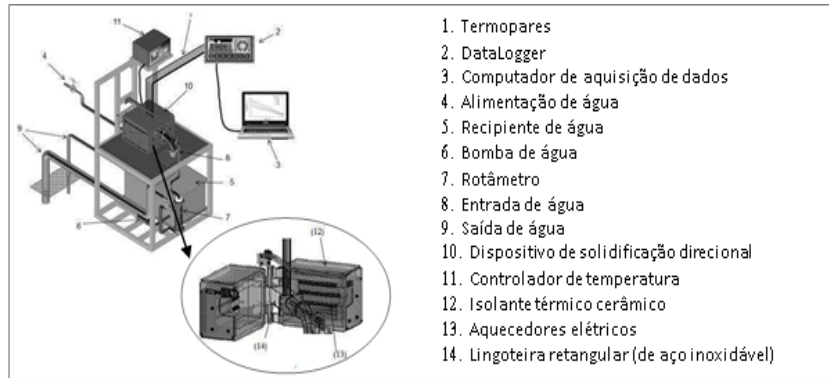
Figura 3 – Materiais utilizados na fundição do alumínio: A) Balança digital. B) Cadinho e C) Forno MUFLA.



Fonte: Do Autor, 2019.

Para o processo de solidificação, foi utilizado o dispositivo de solidificação horizontal esquematizado na Figura 4, o qual foi projetado de tal maneira que o calor do metal líquido fosse extraído somente através de um sistema refrigerado à água, localizado em uma das extremidades do molde, promovendo assim a solidificação direcional horizontal.

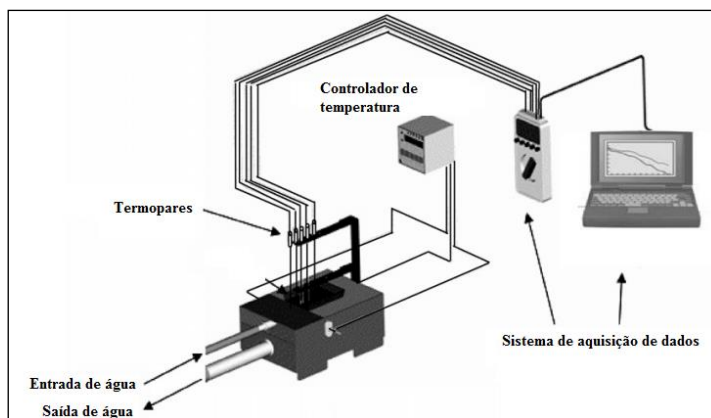
Figura 4 - Representação esquemática do dispositivo de solidificação, e sua interface com o sistema de registro de temperaturas.



Fonte: Adaptado de Araújo, 2015

Neste trabalho, devido à faixa de temperaturas em que ocorre o processo de solidificação, foram utilizados termopares de Chromel-Alumel do tipo K com diâmetro de 1,5 mm com faixa de utilização até 1260 °C para mapear horizontalmente os lingotes. Estes aparelhos foram calibrados com base no ponto de fusão do alumínio indicando flutuações em torno de 1 °C e conectados através de cabos coaxiais a um sistema de aquisição de dados em um computador. Na Figura 5 é esquematizado o aparato para aquisição dos dados.

Figura 5 – Esquemático do aparato para obtenção das curvas de solidificação acoplado ao dispositivo de solidificação horizontal.



Fonte: Adaptado de Silva, 2009.

As ligas pertencentes ao sistema Al-Ni, escolhidas como objeto de estudo, apresentam as seguintes concentrações em massa de Ni: 3% e 5%.

## 2.2 CARACTERIZAÇÕES MACRO E MICROESTRUTURAL

Após a solidificação, foi realizado o corte transversal do lingote, objetivando avaliar a variação na macro e microestrutura a partir da região de resfriamento (interface metal/molde). Posteriormente,

a superfície foi atacada com um reagente cuja composição foi 15 ml de  $\text{HNO}_3$ , 10 ml de  $\text{HCl}$ , 5 ml de  $\text{HF}$  e 70 ml de  $\text{H}_2\text{O}$  (solução de Keller). A Figura 6 esquematiza este corte obtido.

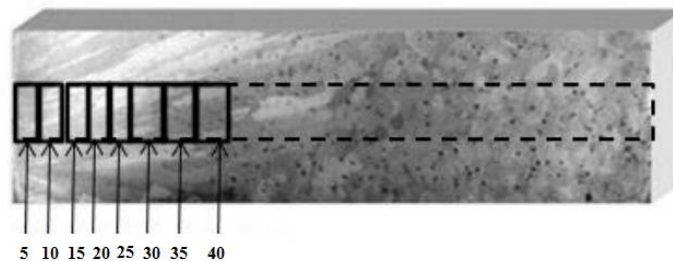
Figura 6 – Obtenção da seção transversal para análise macroestrutural



Fonte: Do Autor, 2019

Para avaliação a nível microestrutural, foram extraídos oito corpos de prova de cada liga estudada, a partir da seção transversal nas posições correspondentes a 5 mm; 10mm; 15 mm; 20 mm; 25 mm; 30 mm, 35 mm, 40 mm e 50 mm em relação à interface metal/molde (Figura 7). Os corpos de prova foram devidamente identificados de acordo com suas respectivas posições, embutidos a frio e posteriormente lixados com lixas de granulação de 100 a 1200 mesh e polidos com solução de Alumina  $1,0\mu\text{m}$ .

Figura 7 – Esquemático da obtenção de amostras para análise microestrutural



Fonte: Adaptado de Silva, 2015.

### 2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Com o objetivo de estabelecer correlações entre as variáveis de solidificação e as propriedades mecânicas das ligas do sistema Al-Ni foram efetuados ensaios de tração para determinar os limites de escoamento e de resistência à tração. Para esse propósito foram extraídos corpos de prova transversalmente ao lingote (Figura 8). Após a usinagem dos corpos de prova em conformidade com a

norma ASTM E8M, eles foram submetidos aos ensaios de tração, efetuados segundo a norma NBR 6152.

Figura 8 – Seção transversal dos lingotes e corpos de prova de tração extraídos.



Fonte: Do Autor, 2019.

## 2.4 ENSAIO DE MICRODUREZA

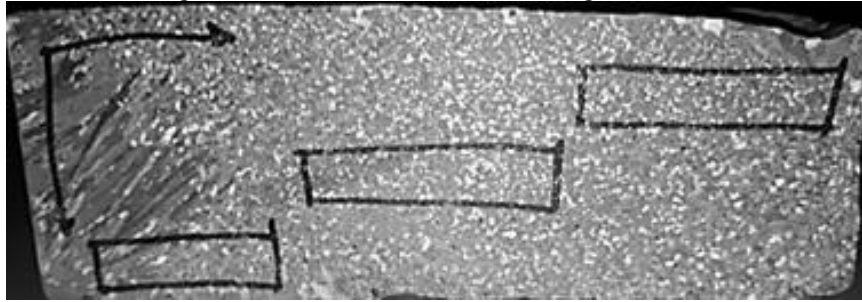
Os ensaios de microdureza Vickers (HV) foram realizados de acordo com o método proposto por Dias Filho (2013). Foram realizadas 3 medições para cada posição analisada ao longo do comprimento do lingote. As indentações foram realizadas nos corpos de prova preparados previamente para caracterização microestrutural.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 MACROESTRUTURA

A macroestrutura transversal do lingote é exibida na Figura 9. Nota-se o crescimento de grãos colunares com extensão predominante até 40 mm em relação interface metal/molde, ocorrendo paralelamente à direção do fluxo de calor desde o início do lingote, o que ratifica a existência de fluxo de calor perpendicular à superfície de refrigeração e a direcionalidade do processo de solidificação.

Figura 9 – Macroestrutura resultante. Liga Al-3%Ni.



Fonte: Do Autor, 2019.

Em seguida, observa-se o surgimento de grãos alongados e com direção diferente do crescimento preferencial (em destaque na Figura 9), os quais são denominados grãos plumosos. Acredita-se que o surgimento dos “grãos plumosos” pode ser promovido sob condições específicas, tais como: elevadas taxas de resfriamento nos instantes iniciais do processo de solidificação, presença de convecção e ação de certos elementos de ligas. (HENRY et al., 2004). Em seguida com parte dominante no final do lingote têm-se grãos equiaxiais.

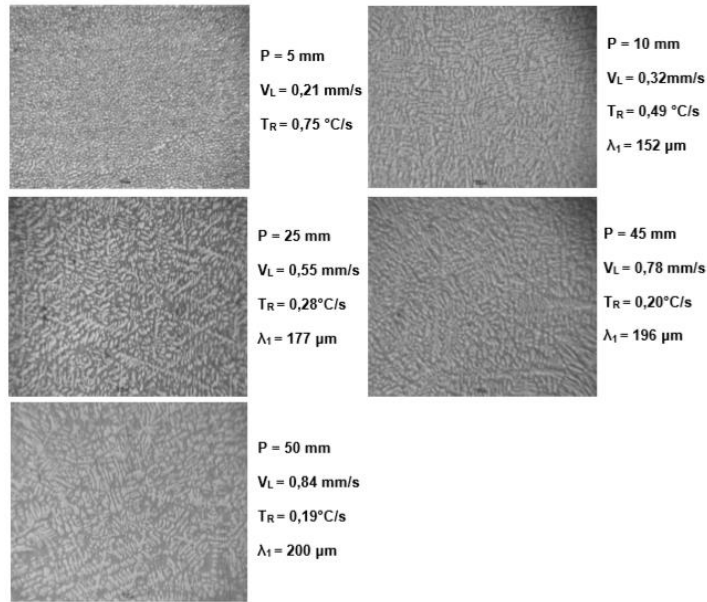
O surgimento da zona de transição colunar/plumosos (TCP) aconteceu numa faixa de 5 a 40 milímetros e da zona de transição plumosos/equiaxial (TPE) numa faixa de 5 a 120 milímetros. Esses desvios na zona de transição indicam que correntes convectivas estão presentes nessa configuração e, como consequência deste escoamento natural de fluido, ocorrem perturbações que geram tais desvios nessas regiões. Vale ressaltar que, para o caso de um dispositivo de solidificação direcional horizontal, o efeito da convecção termossolutal é intensificado pela ação da gravidade, uma vez que a gravidade age perpendicularmente à direção da frente de solidificação da liga (KONNO, 2015).

Nota-se na macroestrutura da liga Al-3%Ni e Al-5%Ni que os grãos plumosos nucleiam a partir dos grãos colunares. Tal observação contraria a tese de que os grãos plumosos sejam apenas o desvio de crescimento dos grãos colunares. Sugere-se então a possibilidade de que estes grãos não sejam apenas estruturas colunares com orientação refletida por alguma perturbação física, mas que trata-se de uma macroestrutura com características particulares, como condições de nucleações, direção de crescimento e morfologia dendrítica.

### 3.2 MICROESTRUTURA

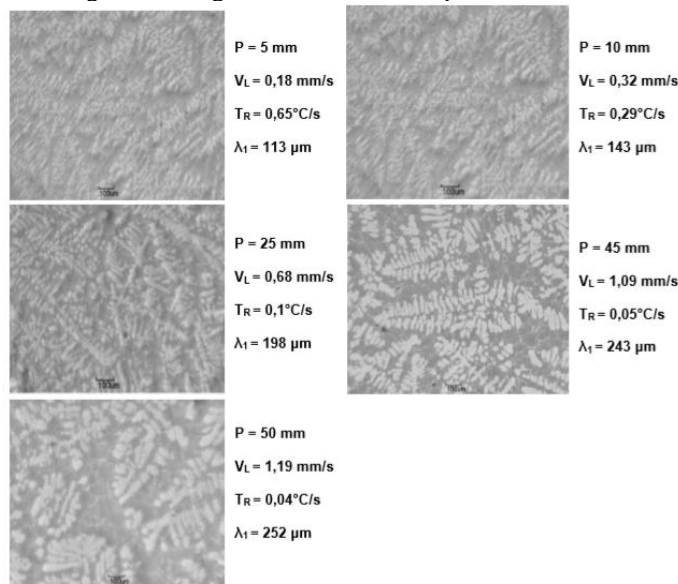
Nas Figura 10 e 11, são apresentadas micrografias da liga Al-3%Ni e Al-5%Ni e os respectivos valores de  $V_L$  (Velocidade da isoterma *liquidus*),  $T_R$  (Taxa de Resfriamento) e  $\lambda_1$  (Espaçamento dendrítico primário) em seis diferentes posições do lingote de modo a permitir representar e comparar a evolução das microestruturas dendríticas.

Figura 10- Micrografias da liga Al-3%Ni com os correspondentes valores de VL, TR e  $\lambda_1$ .



Fonte: Autor, 2020.

Figura 11- Micrografias da liga Al-5%Ni os correspondentes valores de VL, TR e  $\lambda_1$ .

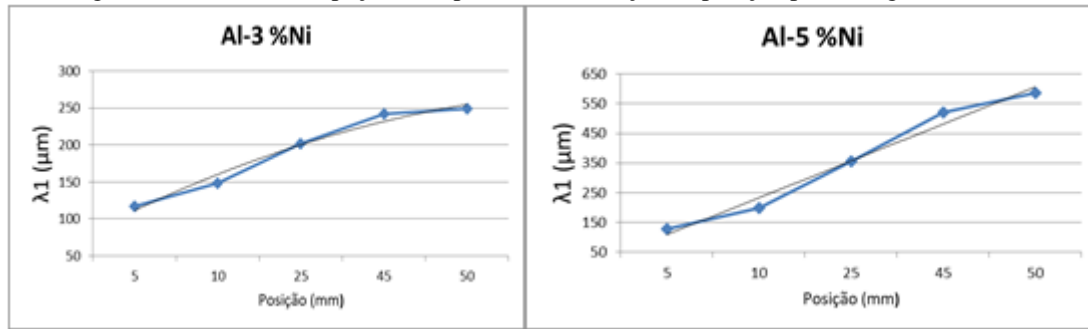


Fonte: Autor, 2020.

As curvas da Figura 12 apresentaram a variação em função da posição, a partir da base do lingote, do espaçamento dendrítico primário ( $\lambda_1$ ) e para ambas as curvas se observou que quanto mais distante da fonte de extração de calor maior é o valor de  $\lambda_1$ .



Figura 12 - Curvas de espaçamento primário em função da posição para as ligas estudadas.



Fonte: O Autor (2020).

Também é observada uma grande variação a partir de posições mais próximas da base (até 10mm), onde a microestrutura apresenta-se mais refinada, até outras regiões mais distantes onde o espaçamento primário aumenta consideravelmente.

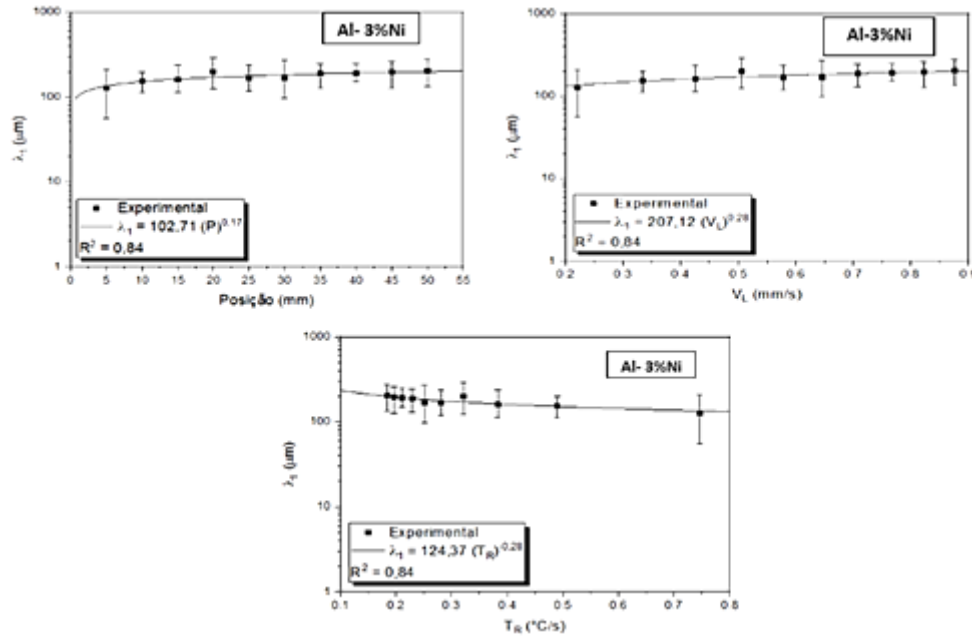
Os valores de 3% e 5% tem uma relação de aumento do espaçamento primário à medida que o teor de soluto aumenta e os dois valores estão acima de 2,5% que conforme Canté (2009) possuem uma equação experimental específica.

### 3.3 CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS TÉRMICOS E MICROESTRUTURA

As Figuras 13 e 14 apresentam, respectivamente, a correlação dos espaçamentos dendríticos primários em função da posição, da velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* e da Taxa de Resfriamento. Verifica-se pelas mesmas o aumento desses espaçamentos para posições mais afastadas da interface metal/molde, isto é, para posições do lingote mais distantes da câmara refrigerada (interface metal/molde) mais grosseira é a estrutura dendrítica e, conseqüentemente, maior o espaçamento primário ( $\lambda_1$ ).

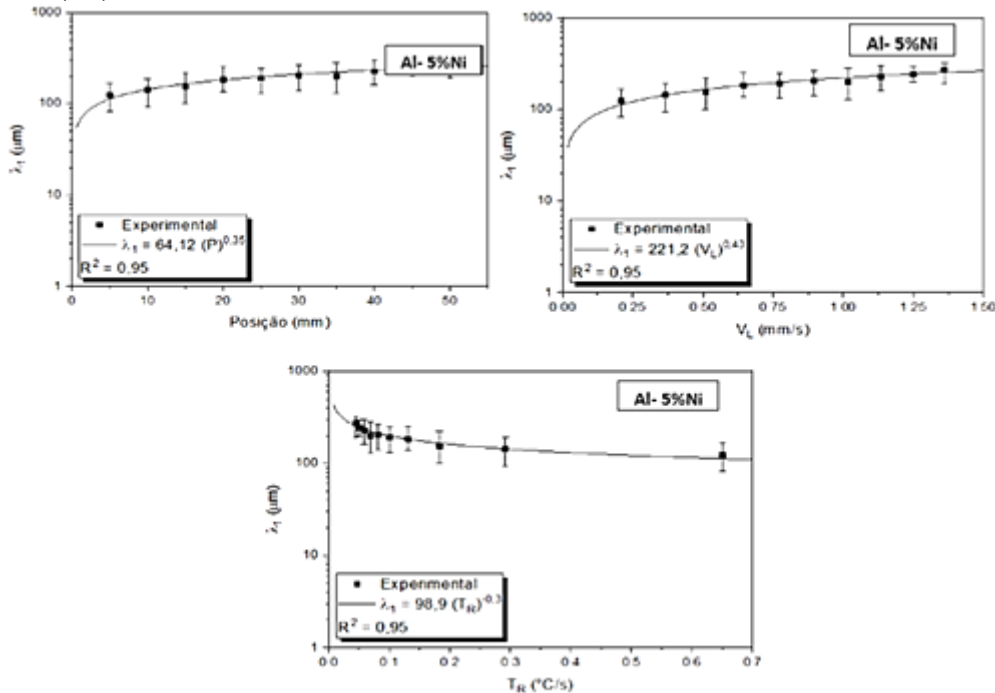
Ao analisar observou-se que a ação do fluido de refrigeração impôs valores de velocidades e taxas de resfriamento bastante elevadas próximo à interface metal/molde e que estes diminuem gradativamente durante a solidificação em função do aumento da resistência térmica promovida pela progressiva formação do metal sólido. Tal efeito influencia diretamente os espaçamentos dendríticos primários, determinados experimentalmente para a liga investigada.

Figura 13- Correlação entre os espaçamentos dendríticos primários e as variáveis térmicas Al-3%Ni :  $\lambda_1 = f(P)$ ,  $\lambda_1 = f(V_L)$  e  $\lambda_1 = f(T_R)$ .



Fonte: O autor (2020).

Figura 14 – Correlação entre os espaçamentos dendríticos primários e as variáveis térmicas Al 5% Ni Eutético:  $\lambda_1 = f(P)$ ,  $\lambda_1 = f(V_L)$  e  $\lambda_1 = f(T_R)$ .

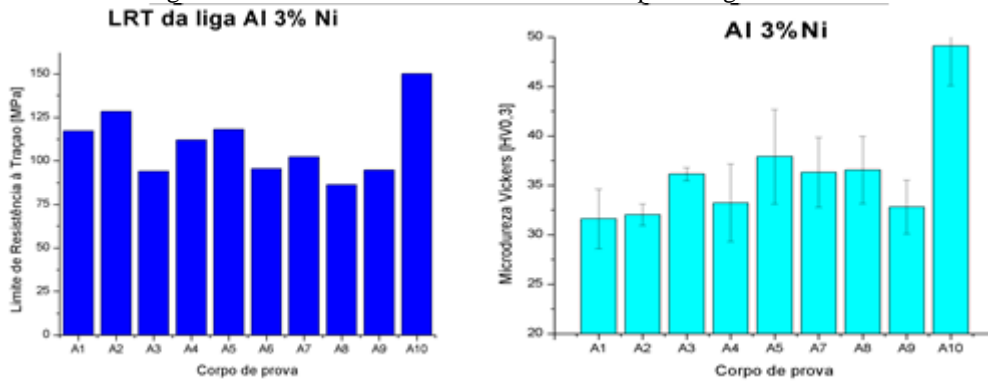


Fonte: O autor (2020).

### 3.4 CORRELAÇÃO ENTRE ENSAIO DE TRAÇÃO E MICRODUREZA

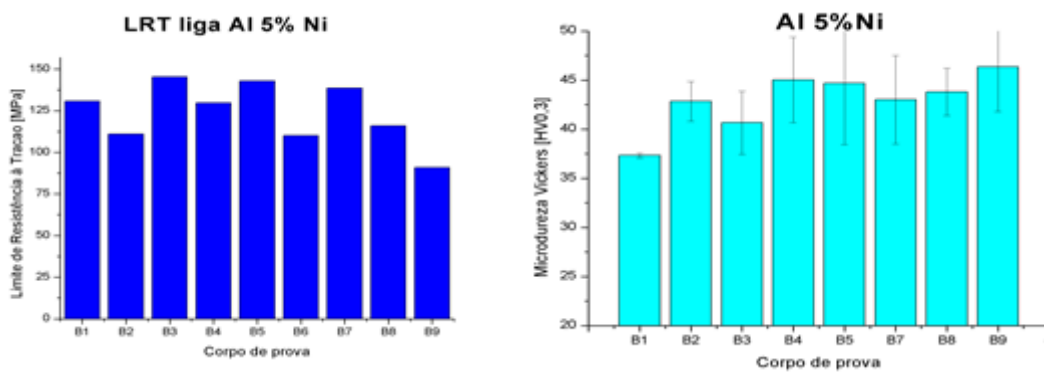
As Figura 15 e 16 ilustram os resultados de limite de Resistência à tração e microdureza obtidos para a liga Al- 3% Ni. Os corpos de prova A1 são mais próximos da interface metal/molde.

Figura 15- Resultados de LRT e Microdureza para a liga Al-3 %Ni.



Fonte: O autor (2020).

Figura 16- LRT e Microdureza para a liga Al- 5 %Ni.



Fonte: O autor (2020).

O que se observa é que quanto maior o espaçamento dendrítico, mais extensiva é a distribuição das partículas de Al<sub>3</sub>Ni nas regiões interdendríticas, contribuindo, dessa forma, para o aumento da resistência mecânica. As partículas de Al<sub>3</sub>Ni atuam como um reforço da matriz dúctil rica em alumínio, isto é, quanto menor a periodicidade com que essas estruturas mais duras se distribuem maior será a resistência mecânica resultante. Como pode ser comprovado em vários trabalhos da literatura para alguns sistemas de ligas de alumínio (QUARESMA et al.2010; OSÓRIO, 2000), a estrutura dendrítica exerce uma grande influencia na resistência à tração dos materiais metálicos.

Essa estrutura quando refinada melhora as propriedades mecânicas, ou seja, a distribuição mais uniforme dos produtos de segregação microscópica atua como obstáculos para o movimento de discordâncias (GARCIA, 2001).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A observação da macroestrutura permitiu comprovar a direcionalidade do processo de solidificação, evidenciada pelo crescimento dos grãos colunares e plumosos paralelamente à direção do fluxo de extração de calor.

O aparecimento de grãos plumosos pode estar relacionado às correntes convectivas causadas pelos elementos da liga com diferentes densidades (alumínio e níquel), em determinadas concentrações em um dispositivo horizontal, cujo efeito da convecção também é mais acentuado, bem como em elevadas taxas de resfriamento, que é o caso para os experimentos realizados nesse trabalho;

Os espaçamentos dendríticos primários aumentam progressivamente da interface metal/molde para o interior do lingote devido ao aumento da resistência térmica promovida pela progressiva formação da camada de metal sólido. Quanto à microestrutura da liga Al-3%Ni e Al-5%Ni, verifica-se uma eficiente extração de calor desde as primeiras posições, onde ramos dendríticos se apresentam nitidamente com pequenas dimensões, tornando-se cada vez maiores para as posições mais afastadas da parede refrigerada.

A partir dos resultados de tração e microdureza, foi verificado que os maiores valores de resistência mecânica e microdureza se apresentam na região de menores espaçamentos dendríticos devido a maior densidade de partículas de Al<sub>3</sub>Ni que garantem um reforço na matriz.

**REFERÊNCIAS**

JONES, H. Some effects of solidification kinetics on microstructure formation in aluminium base alloys, *Materials Science and Engineering A* v. 413–414, pp.165–173, 2005

JUAREZ-HERNANDEZ, A, Jones, H. Growth temperature measurements and solidification microstructure selection of primary Al<sub>3</sub>Ni and eutectic in the  $\alpha$ Al- Al<sub>3</sub>Ni system. *Scripta Materialia*, v.38, N5, pp. 729-734, 1998.

MERTINGER, V., SZABÓ, G., BÁRCZY, P., KOVÁCS, Á., CZÉL, G. Gravity influenced convection in Al-Ni melt, *Materials Science Forum* v.215-216, pp. 331-338, 1996.

ZHUANG, Y. X., ZHANG, X. M., ZHU, L. H., HU, Z. Q. Eutectic Spacing and Faults of Directionally Solidified Al-Al<sub>3</sub>Ni Eutectic. *Science and Technology of Advanced Materials*, v. 2, pp. 3739, 2001.

DIAS FILHO, José Marcelino da Silva. Análises térmica e microestrutural na solidificação de ligas monofásica e peritéticas do sistema Zn-Ag. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Campinas, Campinas, 2013.

KONNO, Camila Yuri Negrão. Caracterização da Liga Monotética Al-1,2%Pb Solidificada em Regime Transitório: Propriedades Microestruturais, Microdureza e Usinabilidade. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Pará, Belém- Pará, 2015.

HENRY, S., RAPPAZ, M., MINGHETTI, T. Dendrite Growth Morphologies in Aluminium Alloys. *Acta Metallurgica Inc*, v. 46, n. 18, p. 6431-6443, 1998B.

CANTÉ, Manuel Venceslau. Solidificação Transitória, Microestrutura e Propriedades de Ligas Al-Ni. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

OSÓRIO, Wislei Riuper Ramos. Correlação entre Parâmetros da Solidificação, Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Ligas Zn-Al. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Campinas, Campinas, 2000.

QUARESMA, J. M. V., SANTOS, C. A.; GARCIA, A. Correlation between unsteady-state solidification conditions, dendrite spacings and mechanical properties. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 31A, p.3167-3178, 2000.

GARCIA, A. Solidificação: Fundamentos e Aplicações, Editora da Unicamp, São Paulo, Brasil, 2001.

MARTÍNEZ-VILLALOBOS, Manuel Alejandro et al. Microstructural evolution of rapid solidified Al-Ni alloys. *Journal of the Mexican Chemical Society*, v. 60, n. 2, p. 67-72, 2016.

ARAÚJO, R. L. M. Parâmetros Térmicos, Espaçamento Dendríticos Primários e Microdureza durante a Solidificação Direcional Horizontal de uma Liga Al-Cu-Si (319.1). Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal do Pará, Pará, 2015.

SILVA, José N. et al. The columnar to equiaxed transition during the horizontal directional solidification of Sn–Pb alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 478, n. 1-2, p. 358-366, 2009.