

CAPÍTULO 8

INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MECÂNICAS DE TRAÇÃO COM A ADIÇÃO DE 0,3% DE NI NA LIGA AL-SI



<https://doi.org/10.22533/at.ed.152152503028>

Data de aceite: 20/02/2025

Alicia Regina Zanon Barbosa

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais
Ananindeua – Pará
<http://lattes.cnpq.br/2085252897942870>

Eric Erian Lima Espíndola

Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/1193834237116588>

Yan Christian Silva de Araújo

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais
Ananindeua – Pará
<http://lattes.cnpq.br/5136415587850242>

Luane Luiza Pereira Marques

Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/9438927804105514>

Lailson Souza Meireles

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais
Ananindeua – Pará
<http://lattes.cnpq.br/6255277396258296>

Amanda Lucena de Medeiros

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Mecânica, Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/7734539626373520>

Deibson Silva da Costa

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais
Ananindeua – Pará
<http://lattes.cnpq.br/1521124351431087>

RESUMO: A constante demanda por energia elétrica nos centros urbanos e setores industriais, impulsiona o desenvolvimento de um material com propriedades adequadas e com um custo econômico, visando a expansão das redes de transmissão e distribuição de energia elétrica. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi investigar as propriedades elétricas e mecânicas de tração com a adição de 0,3% de Ni na liga Al-0,5%Si. Foi realizado o ensaio de resistência elétrica os dados obtidos foram convertidos para %IACS, em seguida foi efetuado o ensaio de resistência à tração. Os resultados evidenciaram que o Ni provocou uma pequena redução de 0,09% na liga Al-Si, porém obteve um pequeno aumento de

0,23% comparado ao Al 1350. Para os resultados de resistência à tração, a presença do Ni resultou em um aumento de 18,79% comparado a liga Al-Si e de 37,42% em relação ao Al 1350. Portanto, verificou-se que a adição de Ni proporcionou pouca variação na condutividade elétrica e um aprimoramento na propriedade mecânica da liga.

PALAVRAS-CHAVE: Alumínio; Al-Si-Ni; Propriedades Elétrica; Resistência à Tração.

INVESTIGATION OF THE ELECTRICAL AND TENSILE MECHANICAL PROPERTIES WITH THE ADDITION OF 0.3% NI TO THE AL-SI ALLOY

ABSTRACT: The constant demand for electric power in urban centers and industrial sectors drives the development of materials with suitable properties and cost-effectiveness, aiming to expand transmission and distribution networks. In this context, the objective of this study was to investigate the electrical and tensile mechanical properties with the addition of 0.3% Ni to the Al-0.5%Si alloy. An electrical resistance test was conducted, and the obtained data were converted to %IACS. Subsequently, a tensile strength test was performed. The results showed that Ni caused a slight reduction of 0.09% in the Al-Si alloy but led to a small increase of 0.23% compared to Al 1350. Regarding the tensile strength results, the presence of Ni resulted in an increase of 18.79% compared to the Al-Si alloy and 37.42% compared to Al 1350. Therefore, it was found that the addition of Ni caused little variation in electrical conductivity while improving the mechanical properties of the alloy.

KEYWORDS: Aluminum; Al-Si-Ni; Electrical Properties; Tensile Strength.

INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda por energia elétrica nos setores industriais e o crescimento dos centros urbanos, torna-se necessária a expansão da rede de transmissão e distribuição de energia. Para atender a essa necessidade, são realizadas pesquisas para o desenvolvimento de materiais com propriedades adequadas para a produção de cabos elétricos a um custo viável (Prazeres, 2023).

Para a elaboração de sistemas de transmissão e distribuição requer um estudo sobre os cabos que possibilitam a transferência de energia elétrica. Nesse contexto, o alumínio (Al) possui características interessantes como sua condutividade elétrica, leveza e economia, todavia o Al comercialmente puro não possui uma elevada resistência mecânica (Abal, 2023; Prazeres, 2016; Agência Nacional de Energia Elétrica, 2021). Dessa forma, busca-se diversas formas de adequar as propriedades do material para uma determinada aplicação.

Um dos métodos mais utilizados é a adição de elementos de liga, frequentemente aplicada para aprimorar propriedades específicas de um material. Essa prática varia a quantidade dos elementos que podem implicar em alterações na propriedade do material (Scheid, 2010).

Dessa forma, mesmo com a adição de uma pequena quantidade de um elemento, possibilita obter modificações nas propriedades do produto. Ao se utilizar o níquel (Ni) em até 2% em peso, ocorre um aumento da resistência da liga, embora haja uma redução em sua ductilidade (Batalu; Georgeta; Angel, 2006). Além disso, o Ni apresenta excelentes propriedades, como resistência à oxidação, propriedades magnéticas e ópticas (Kaya et al., 2012, *apud* Braga, 2022).

Outro fator que pode provocar alterações nas propriedades é o processo de conformação, mais especificamente a laminação a frio. A laminação a frio ocorre quando a temperatura de trabalho é inferior à temperatura de recristalização do material. Esse processo aumenta a resistência mecânica e dureza da liga, além de melhorar o acabamento superficial do material. Adicionalmente, causa o encruamento no material, o que, consequentemente, modifica suas propriedades (Corassini; Magnabosco, 2013, Silva, 2022).

Portanto, a finalidade do estudo proposto foi investigar as propriedades elétricas e mecânicas de tração da adição de 0,3% de Ni na liga Al-0,5% Si.

MATERIAIS E MÉTODOS

Iniciou-se a pesquisa com a fabricação da liga por fundição, seguida pelo seccionamento das amostras para os ensaios de resistência elétrica e de tração. O fluxograma esquemático, que ilustra a metodologia aplicada no estudo, mostrado na Figura 1.

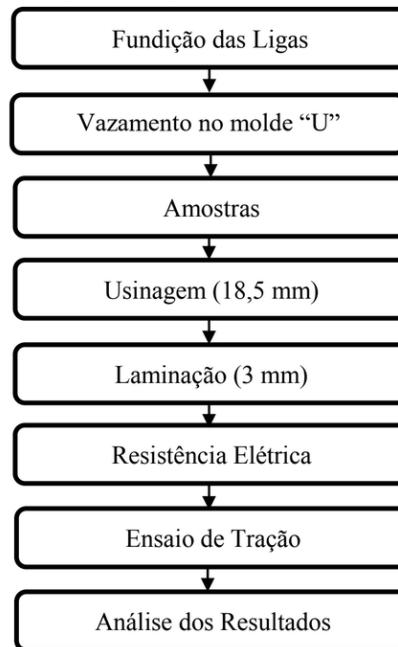


Figura 1 – Fluxograma dos processos realizados nas ligas.

Fonte: Autores, 2025.

Fundição

O processo de produção da liga iniciou-se com o cálculo estequiométrico para determinar a quantidade em peso do silício (Si) e Ni em relação a 800 gramas de Al. O Al utilizado na fundição foi o Al 1350, fornecido pela Alubar Metais e Cabos S.A. Posteriormente, os elementos foram inseridos em um cadinho de carbeto de silício (SiC) revertido com alumina em suspensão, a fim de evitar a aderência do metal líquido no cadinho, e colocados no forno mufla da marca GREFORTEC a 900 °C para a fundição dos materiais.

Após à homogeneização dos elementos, o metal líquido foi vazado em um molde de coquilha metálica em formato de “U” revestido com alumina, conforme mostrado na Figura 2. Após a solidificação das ligas, foram seccionadas amostras para os ensaios de resistência elétrica e mecânico de tração.



Figura 2 – Vazamento do metal líquido no molde.

Fonte: Autora, 2025.

Preparação dos Corpos de prova

Para a obtenção dos fios para o ensaio de condutividade elétrica e mecânico de tração, foi realizado o processo de usinagem, que, além de melhorar o acabamento superficial, reduziu o diâmetro de 22,0 mm para 18,5 mm. Após o processo de laminação, os fios foram finalizados com o diâmetro de 3 mm. Foram utilizados dois laminadores elétricos duo reversíveis da marca MENAC, conforme ilustrado na Figura 3.



Figura 3 – Laminadores utilizados.

Fonte: Autora, 2025.

Resistência Elétrica

No ensaio de resistência elétrica, utilizou-se o microhmímetro MegaBras 2000e, mostrado na Figura 4. Realizado conforme as normas NBR 5118, NBR 6814 e NBR 6815. Os resultados obtidos foram convertidos para condutividade na escala “International Annealed Copper Standard” (% IACS).



Figura 4 – Microhmímetro para a medição da resistência elétrica.

Fonte: Autora, 2025.

Ensaio de Tração

Após o ensaio de resistência elétrica, foi utilizado a máquina universal KRATOS, modelo IKCL1-USB, acoplada a um computador com sistema de aquisição de dados, conforme ilustrado na Figura 5. Seguiu-se a norma NBR 6810, que especifica que o comprimento de cada corpo de prova ensaiado deve ser de 200 mm, com um comprimento útil de 150 mm.

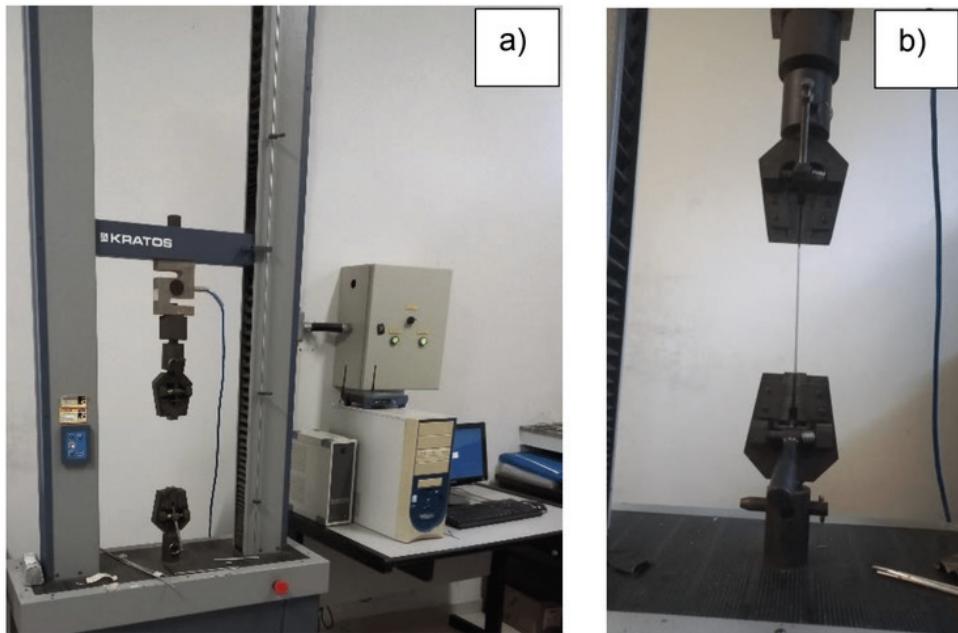


Figura 5 – a) Máquina de tração usada no ensaio mecânico; b) ensaio de tração realizado em fio.

Fonte: Autora, 2025.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Condutividade Elétrica

Na Figura 6, observou-se que o Al 1350 apresentou um valor de 61% IACS, enquanto a liga Al-0,5%Si registrou 61,32%, e a liga Al-Si-0,3%Ni obteve 61,23%. Isso demonstra uma diferença de 0,32% da liga Al-Si e o Al 1350, e uma variação de 0,23% entre a liga Al-Si-Ni e o Al 1350.

Condutividade Elétrica das Ligas

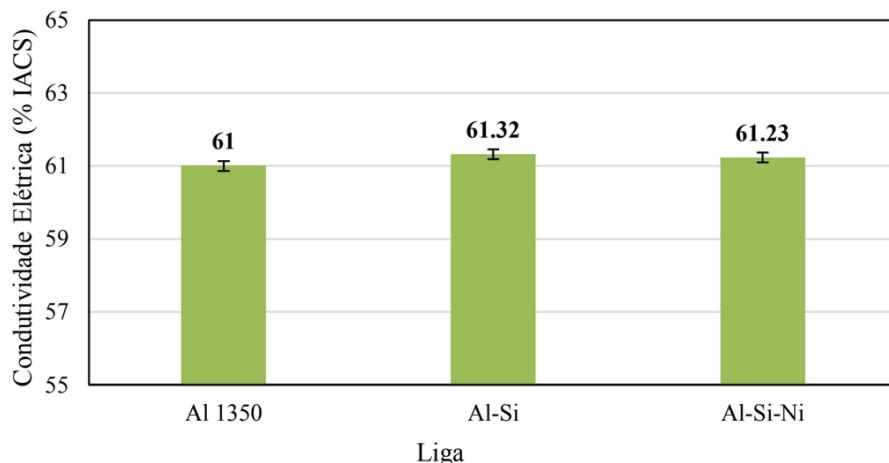


Figura 6 – Gráfico da condutividade elétrica.

Fonte: Autora, 2025.

Essas variações na propriedade elétrica podem ser influenciadas pela mobilidade dos elétrons, que pode ser afetada por fatores que atuam como obstáculos ao fluxo. A presença de impurezas, as vibrações térmicas e o encruamento são condições que reduzem a mobilidade dos elétrons e, consequentemente, diminuem a condutividade elétrica do material (Souza, 2021). Dessa forma, pode-se sugerir que a presença de Si e do Ni na matriz de Al atuaram como obstáculos no fluxo de elétrons, de modo que esses elementos tiveram pouca influência no aumento da condutividade elétrica das ligas Al-Si e Al-Si-Ni em comparação ao Al 1350.

Porém, o acréscimo de Ni na liga Al-Si possivelmente dificultou a movimentação dos elétrons, refletindo em uma pequena diminuição de 0,09%. Isso provavelmente ocorre devido à concentração de Ni, que atua como soluto e pode formar a fase (trialumineto de níquel) na matriz. Essa interação gerou áreas de maior tensão, o que, por sua vez, pode causar desvios (efeito de espalhamento), que pode provocar uma perda de elétrons (Pinto, 2023; Wang et al., 2021).

Outra possibilidade para esse comportamento é a diluição dos elementos, o que pode ter possibilitado a formação de ramos dendríticos, que gerou uma convecção térmica na formação da zona coquilha (Marques, 2023). Portanto, possivelmente houve uma boa diluição dos elementos Si e Ni na matriz de Al que possibilitou um pequeno aprimoramento da propriedade elétrica da liga em comparação ao Al 1350.

Limite de Resistência à Tração

Na Figura 7, foi possível observar que o Al 1350 exibiu um valor de 185,00 MPa, enquanto a liga Al-0,5%Si atingiu 214,00 MPa e a liga Al-Si-0,3%Ni alcançou 254,23 MPa. Esses resultados indicaram uma diferença de 15,67% entre a liga Al-Si e o Al 1350, e uma variação de 37,42% entre a liga Al-Si-Ni e o Al 1350. Ao comparar a liga Al-Si com a liga Al-Si-Ni, observou-se um aumento de 18,79%.

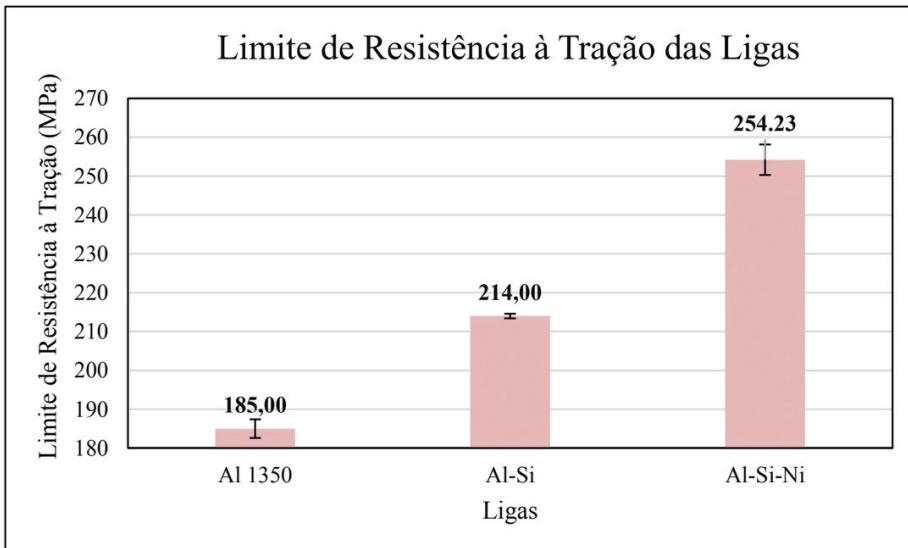


Figura 7 – Gráfico do limite de resistência à tração.

Fonte: Autora, 2025.

Essas diferenças de valores podem ser atribuídas ao encruamento, que resulta no aumento da densidade de discordâncias. Esse fenômeno endurece o material, o que eleva a tensão de escoamento e reduz a ductilidade (Marques, 2023; Callister, 2016). Assim, à medida que o número de discordâncias aumenta, a movimentação desses defeitos na estrutura cristalina se torna mais difícil. Essa dificuldade na movimentação das discordâncias resultou no aumento da propriedade mecânica do material.

O grau de deformação no fio também pode alterar as propriedades da liga, o que permite a saturação do armazenamento de defeitos cristalinos pelos grãos, por sua vez, gera microestruturas de subgrãos. Esse fenômeno é conhecido como recuperação dinâmica (Prazeres, 2016). Portanto, é provável que o comportamento das ligas Al-Si e Al-Si-Ni esteja relacionado à eficiência da recuperação dinâmica, com destaque para a liga com a adição de 0,3% de Ni.

Além disso, a presença de Ni confere maior resistência, possivelmente devido à formação de partículas de , que atuam como reforço da matriz dúctil rica em alumínio e influenciam as propriedades mecânicas das ligas (Pinto, 2023). Esse composto intermetálico restringe o emaranhamento de discordâncias formadas na liga, o que, consequentemente, aumenta o limite de resistência à tração da liga (Prazeres, 2016).

CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que a adição de Ni à liga Al-0,5%Si resultou em uma pequena diminuição de 0,09% na condutividade elétrica. Este efeito pode ser atribuído à formação de , que possivelmente criou obstáculos ao fluxo de elétrons. Além disso, a eficiência na diluição do Si e Ni pode ter contribuído para o pequeno aprimoramento da condutividade das ligas comprada ao al 1350.

Em relação ao limite de resistência à tração, os resultados indicaram que a adição de Ni à liga Al-Si resultou em um aumento de 18,79%. Esse aumento pode ser atribuído à formação do intermetálico e ao efeito do encruamento, que eleva a densidade de discordâncias, dificultando sua movimentação. Além disso, o Ni pode ter aprimorado a eficiência da recuperação dinâmica da liga.

AGRADECIMENTOS

Os professores orientadores e os autores desse trabalho agradecem o apoio da Universidade Federal do Pará (UFPA), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Alubar Metais e Cabos S.A., Grupo de Pesquisa em Materiais Metálicos (GPEMM) e ao Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais (GPEMAT).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5118**: Fios de alumínio 1350 nus, de seção circular, para fins elétricos. Rio de Janeiro, ago. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6814**: Fios e cabos elétricos – Ensaio de resistência elétrica. Rio de Janeiro, mar. 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6815**: Fios e cabos elétricos – Ensaio de determinação da resistividade em componentes metálicos. Rio de Janeiro, ago. 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6810**: Fios e cabos elétricos – Tração à ruptura em componentes metálicos. Rio de Janeiro, ago. 1981.

ABAL- Associação Brasileira do Alumínio, 2023. **Fundamentos e aplicações do alumínio**. Disponível em: <https://abal.org.br/aplicacoes/industria-eletrica/>. Acesso em 21 jul. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Perdas de Energia elétrica na Distribuição-1/2021.** Disponível em: https://antigo.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia+_Edi%C3%A7%C3%A3o+1-2021.pdf/143904c4-3e1d-a4d6-c6f0-94af77bac02a.

BATALU, D.; GEORGETA, C.; ANGEL, A. **Critical analysis of Al-Ni phase diagrams.** Metallurgia International, v. 11, n. 8, p. 36-45, 2006.

BRAGA, D. S.; SENA JÚNIOR, M. A.; NASCIMENTO, L. G. S.; SALOMÃO, C. O. **Relação entre parâmetros térmicos, microestrutura e dureza de um liga hipereutética do sistema Al-Ni, solidificada em regime transitório de fluxo de calor.** In: Pesquisas e Inovações em Engenharias, Ciências Exatas e da Terra: Produções Científicas Multidisciplinares no Século XXI, v. 3, 2022. Capítulo 11. DOI: 10.5523/1084003.11.

CORASSINI, E.; MAGNABOSCO, R. **Influência do grau de encruamento e tratamento térmico de recocimento nas propriedades mecânicas do aço ABNT 1006.** In: Congresso anual da ABM, 68, 2013, Belo Horizonte, ABM, Brasil. Anais... Belo Horizonte: ABM, 2013, 68V.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Tecnologia de Materiais: uma introdução.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

MARQUES, L. L. P. **Correlação das características macroestruturais com as propriedades elétricas das ligas de Al-0,5% e 1,5% Ni tratadas termicamente à 280 °C e 400 °C.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2023.

PRAZERES, E.R. **Desenvolvimento de ligas de alumínio nanoestruturadas para a utilização em cabos elétricos.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais na Amazônia, Belém, 2023.

PRAZERES, E.R. **Avaliação da modificação da liga base Al-Cu-Mg por teores de N e Ti quanto a caracterização estrutural, elétrica e mecânica, a partir de ligas solidificadas em molde “U”.** Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

PINTO, M. B. **Estudo da influência da solidificação unidirecional em regime transitório de fluxo de calor na macro e microestrutura de ligas dos sistemas Al-Ni e Al-Cu-Ni.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Ananindeua, 2023.

SCHEID. **Ligas de Alumínio: Materiais para engenharia,** Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2010.

SOUZA, S.H. **Estudo do encruamento, recristalização e evolução da textura cristalográfica da liga de alumínio AA 7108.** Tese (Doutor em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

SILVA, T. T. L. **Comportamento termoelástico de fios de Ni-Ti com efeito memória de forma processados por laminação a frio.** 2022. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) -Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

WANG, B.; ZHANG, M.; WANG, J. **Quantifying the effects of cooling rates and alloying additions on the microporosity formation in Al alloys.** Materials Today Communications, v. 28, p. 102524, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102524>.