

ACOMPANHAMENTO MICROESTRUTURAL E MORFOLÓGICO DA DEGRADAÇÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO APLICADA EM VEÍCULOS AUTOMOTIVOS USANDO COMO MEIO CORROSIVO MEIOS CLORETO E BIOCOMBUSTÍVEIS

Palavras-Chave: Ligas à base de Al, Degradação por corrosão, Cloreto de sódio

Autores:

Fábio Ricardo Guimarães Barbato (ETE Trajano de Camargo)

Ícaro de Freitas Paes (E.E. Prof. William Silva)

Julia Vitoriano de Oliveira (ETE Trajano de Camargo)

Orientadora: Giovana da Silva Padilha – FCA/UNICAMP

INTRODUÇÃO

O uso de materiais leves em veículos reduz o consumo de combustível e a emissão de gases causadores do efeito estufa. Nos últimos 20 anos, a pesquisa e desenvolvimento de ligas leves, como as à base de alumínio (Al), se tornaram cruciais no setor automotivo, substituindo o aço convencional. Essas ligas são amplamente utilizadas na fabricação de componentes de veículos, desde rodas até partes dos motores. Apesar da resistência à corrosão do alumínio puro, ele é combinado com elementos como Si para melhorar suas propriedades. No entanto, essas ligas podem sofrer corrosão devido à presença de partículas intermetálicas anódicas e catódicas, que podem causar corrosão uniforme ou localizada. As pesquisas e experimentos no laboratório ressaltam a importância da engenharia no desenvolvimento de tecnologias que impactam a vida cotidiana. A demanda por materiais resistentes, leves, duráveis e sustentáveis coloca os engenheiros diante do desafio de criar compostos que atendam a esses critérios. Henry Petroski destaca que, enquanto a ciência busca entender o mundo, a engenharia aplica esse conhecimento para criar soluções práticas e úteis. Integrar engenharia e sustentabilidade é essencial para um futuro equilibrado e próspero. Para contribuir com esses estudos, foi fundamental entender conceitos básicos de química, ciência dos materiais e técnicas de aprendizado eficazes, como mapas mentais.

METODOLOGIA

Nas etapas foram utilizadas técnicas de aprendizado e compreensão dos conceitos fundamentais para estabelecer uma base sólida para as análises laboratoriais e atividades práticas subsequentes:

- 1- Pesquisas e Mapas mentais:** Foram realizadas pesquisas sobre métodos de estudo, capacidades cognitivas e psicologia comportamental. Atividades teóricas sobre as propriedades dos materiais e suas aplicações também foram desenvolvidas, com aprofundamento nos conceitos abordados. Foram criados mapas mentais sobre engenharia química e de materiais para facilitar o aprendizado.
- 2- Estudo de estruturas cristalinas:** A primeira atividade de laboratório focou no estudo das estruturas cristalinas. Células unitárias foram modeladas usando bolas de isopor e palitos de madeira, flash cards foram criados para ajudar na memorização do conteúdo. Além disso, foi realizado um experimento de crescimento de cristais a partir de uma solução supersaturada de sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). 200 g de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ foi dissolvido em 250 mL água destilada morna até atingir o ponto de saturação e a solução foi então despejada em um béquer contendo uma semente do cristal aparado com palito de churrasco e barbante.
- 3- Estudo das principais rotas de manufatura: Fundição e Metalurgia do pó (MP):** Na terceira atividade, foi realizada a fundição da liga Al/Si para criar os corpos de prova. O metal foi fundido em mufla e, em seguida, vertido em um molde, onde foi deixado para resfriar e formar o corpo de prova. Para estudar a técnica de metalurgia do pó, pós de Al e Si previamente limados e pesados na concentração desejada foram adicionados a uma matriz de

aço ferramenta e compactado usando pressão de ~600 MPa para a sua consolidação. Após, o corpo de prova obtido via MP foi sinterizado em forno tipo mufla a 615°C por 3 h.

- 4- **Ensaio de tensão de engenharia x deformação:** Os ensaios dos corpos de prova foram realizados utilizando Máquina Universal de Ensaio Mecânicos WDW-100E (Equilam). Os corpos de prova foram posicionados na máquina e submetidos a cargas até que ocorresse ruptura e/ou deformação. O software *Origin* foi usado para analisar os dados e gerar gráficos referentes aos ensaios.
- 5- **Ciência e Arte nas Férias (CAF):** O projeto contou com a colaboração de alunos do programa Ciência e Arte nas Férias, que realizaram experimentos no Laboratório de Engenharia de Processos e participaram de diversas atividades. Dentre essas atividades, destacam-se o desenvolvimento de um polímero natural à base de amido e pectina, bem como o ensaio de biodegradação em solo. Os alunos também realizaram um teste de corrosão caseiro utilizando materiais metálicos, frutas e sal, além de participarem de discussões sobre sustentabilidade. Adicionalmente, foram produzidos sabonetes e cremes artesanais, e exploraram novos conceitos laboratoriais não descritos no projeto inicial.
- 6- **Conceitos e ensaio de levitação magnética:** No estudo de materiais, conceitos específicos da física foram revisados, como supercondutores e a influência da temperatura em certos materiais, utilizando nitrogênio líquido. Esses conceitos foram aplicados de forma prática em um ensaio de levitação magnética. Um supercondutor de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ foi resfriado com $\text{N}_2(\text{liq})$ e um ímã foi colocado sobre ele, permitindo a observação da levitação do ímã devido ao efeito Meissner, concluindo assim que diferentes materiais podem apresentar propriedades únicas sob determinadas condições.
- 7- **Ensaio de degradação por corrosão usando NaCl:** O ensaio de corrosão foi com solução salina (30 g de NaCl em 1000 mL de água destilada - 3% NaCl) utilizando as liga de Al/7,5%Si obtidas pelas duas rotas de manufatura: fundição e metalurgia do pó. Durante 80 dias (1920 h), foram feitas análises espaçadas em ~15 dias, retirando as peças nos períodos estimados para documentar as mudanças em sua massa e espessura, além das mudanças observadas no meio corrosivo NaCl antes de submergi-las novamente na solução salina renovada. Cada ensaio teve dois corpos de prova de cada rota de manufatura para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as atividades a seguir foram supervisionadas pela professora responsável pelo projeto:

- **Atividade 1. Mapa mental sobre engenharia química e engenharia dos materiais:** Esta atividade foi solicitada para que os alunos compreendessem os desafios e perspectivas dessas duas áreas da engenharia no desenvolvimento do projeto.

- **Atividade 2. Classificação dos materiais:** Os alunos foram instruídos a pesquisar e classificar diversos materiais em categorias como polímeros, metais e cerâmicas.

- **Atividade 3. Formação de cristais usando sal:** Para aprofundar o entendimento sobre a organização espacial dos materiais, foi realizado um experimento de crescimento de cristal a partir de uma solução de sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). O resultado desse experimento revelou uma estrutura monoclinica, caracterizada por três faces distintas e um ângulo que difere de 90°, conforme mostra a Figura 1.

- **Atividade 4. Estrutura molecular:** Nesta atividade, foram apresentados diferentes tipos de estruturas moleculares, como hexagonal, tetraédrica, ortorrômbica e cúbica. Para facilitar a compreensão, cada aluno montou uma estrutura molecular, conforme ilustrado na Figura 2, e fez flashcards para memorizar as informações.



Figura 1. Aparato experimental para a formação de cristais de sal.



Figura 2. Estrutura molecular cúbica de face centrada.

Atividade 5. Fundição e Metalurgia do pó: Na fundição da liga Al/Si, o metal previamente pesado foi aquecido a uma temperatura superior ao seu ponto de fusão (~600°C), transformando-se em líquido. A liga derretida foi vertida em um molde de aço ferramenta, onde solidificou, adquirindo a forma T-bone (Figura 3). No processo de metalurgia do pó, lingotes de Al e Si foram limados até obtenção de um pó fino. Este pó foi compactado em um molde sob alta pressão (~600 MPa). Posteriormente, a peça compactada foi sinterizada, onde as partículas do pó se fundiram, resultando em uma peça sólida (Figura 4). Nesta atividade, também foi realizado o ensaio de tensão versus deformação da liga Al/Si fundida. A partir da Figura 5, foi possível determinar a capacidade do material em resistir à deformação elástica, conhecida como limite de escoamento. Além disso, o coeficiente angular da reta permitiu calcular o módulo de elasticidade, que está relacionado à rigidez do material. Ainda nesta atividade foi realizado o ensaio de tensão x deformação, usando o corpo de prova no formato de T-Bone (Figura 5), e a partir do gráfico (Figura 6) foi possível obter a capacidade do material em resistir a deformação elástica, denominada como limite de escoamento. Através do coeficiente angular da reta, também foi possível obter o módulo de elasticidade, relacional à rigidez do

material.



Figura 3. Al/Si obtido via fundição.



Figura 4. Al/Si obtido via metalurgia do pó.

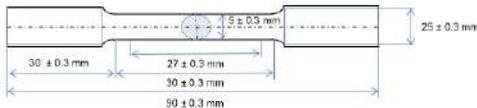


Figura 5. Corpo de prova obtido via fundição para análise de tensão x deformação.

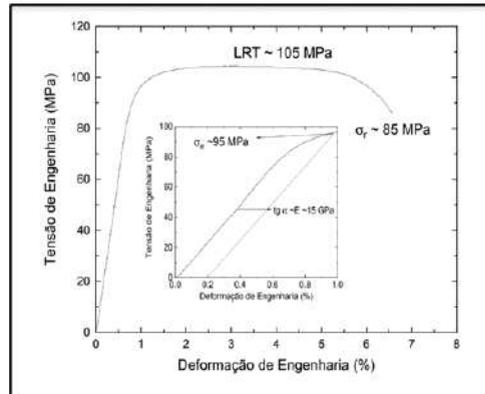


Figura 6. Curva tensão versus deformação de engenharia. O inserto demonstra o critério de 0,2 % de deformação para extrair a tensão de escoamento.

Atividade 6. Ciência e Arte nas Férias: Esta etapa do projeto enfatizou a reciclagem, reaproveitamento e uso de recursos naturais na produção de materiais sustentáveis. Essa abordagem não apenas reduz os resíduos e protege o meio ambiente, mas também aumenta a conscientização das comunidades sobre práticas sustentáveis. Por exemplo, o uso de polímeros biodegradáveis diminui os danos ao meio ambiente em comparação aos plásticos tradicionais. Além disso, a fabricação de cosméticos naturais, livres de conservantes, estimula o consumo consciente e saudável, refletindo uma tendência crescente por produtos menos danosos. Durante essas atividades, foi produzido o polímero sustentável usando amido (10 g) e pectina (5 g) comerciais (Figura 7) e analisado o tempo que se degrada no meio ambiente. Para isso, os corpos de prova poliméricos foram enterrados por 7 dias em terra com baixo teor de argila. Os corpos de prova antes e após serem enterrados e durante o ensaio de biodegradação são mostrados na Figura 8. Para fim de comparação, plásticos convencionais como o PEAD, também foram enterrados. Na etapa de cosméticos naturais, foram produzidos sabonete (Figura 9) e hidratante (Figura 10) utilizando manteigas naturais, como cacau e karité, além de óleos de oliva extra-virgem e de semente de uva. Para conferir fragrância e cor, foram empregues óleos essenciais e argila verde, respectivamente. Todas as matérias-primas utilizadas foram de origem vegetal, visando minimizar os efeitos colaterais ao contato com a pele humana e reduzir os resíduos de produtos químicos lançados nos cursos d'água. Ainda foi realizado um teste de biodegradação caseiro usando matérias inorgânicos e orgânicos, a fim de entender como a solução salina se comporta em contato com distintos materiais. Esta análise foi por 7 dias (Figura 11).



Figura 7. Polímero natural após 24 h de secagem à 27°C.



Figura 8. Corpos de prova antes, durante e após o ensaio de biodegradação.



Figura 9. Sabonete com óleos e manteigas vegetais.



Figura 10. Hidratante corporal.

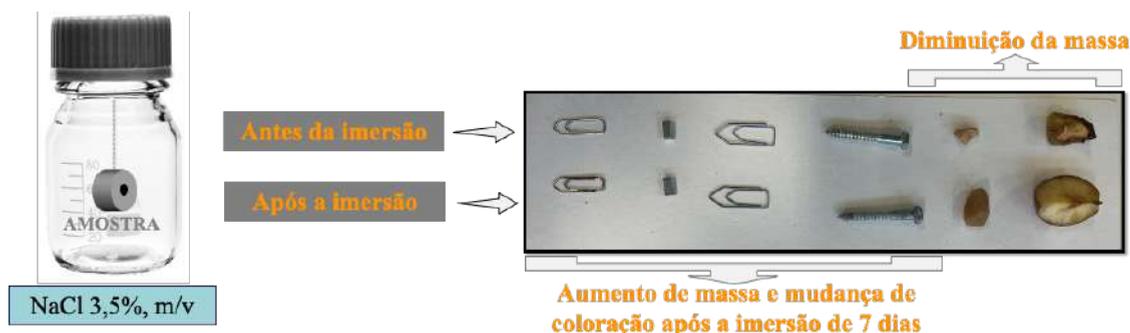


Figura 11. Ensaio de corrosão caseiro usando peças metálicas e de alimentos para entender o comportamento da solução salina sobre as peças.

Atividade 7. Levitação eletromagnética: Para explorar as propriedades magnéticas, foi realizado experimento de levitação magnética com nitrogênio líquido (Figura 12). Nesse ensaio, um ímã (Figura 13) levita devido à interação entre o campo magnético que ele gera e o de um supercondutor (Figura 14). Quando o supercondutor é resfriado abaixo de uma temperatura específica, conhecida como 'temperatura crítica', ele entra em estado supercondutor e expulsa os campos magnéticos de seu interior. Essa expulsão gera correntes que criam um campo magnético oposto ao do ímã. Assim, quando as duas forças se equilibram, o ímã fica suspenso.



Figura 12. N_2 líquido.



Figura 13. Ímã usado no experimento.



Figura 14. Ensaio de levitação.

Atividade 8. Ensaio de biodegradação por corrosão em solução salina NaCl: Foram selecionadas oito peças da liga de Al/7,5%Si, sendo quatro provenientes da fundição e quatro da metalurgia do pó. Foram utilizados quatro frascos de vidro rosqueados cilíndricos de 100 mL. Cada frasco recebeu um par de peças da mesma rota de manufatura, fixadas ao frasco com um aparato de metal e linha de pesca, conforme ilustrado na Figura 14(a). Para preparar a solução salina, foram pesados 30 g de NaCl, a massa foi inserida em balão volumétrico e dissolvida com água destilada até atingir 1000 mL. No aparato experimental, cerca de 40 mL da solução salina foi adicionada a cada frasco reagente, seguido pela inserção dos corpos de prova. As amostras foram armazenadas em condições de ausência de luz e temperatura ambiente. A cada 15 dias, os corpos de prova foram retirados, limpos com água destilada, secos cuidadosamente com papel absorvente, pesados e medidos. A solução corrosiva foi analisada quanto a mudanças de coloração e presença de material particulado. Em seguida, o meio corrosivo foi renovado e as amostras eram reinseridas. Este processo foi repetido ao longo de 80 dias (1920 h). Alguns períodos experimentais são apresentados na Figura 14 (b). As peças de Al/7,5%Si apresentaram variações de massa durante os 80 dias de imersão em NaCl devido a vários fatores. Inicialmente, nos corpos de prova via metalurgia do pó, houve ganho de massa causado pela formação de produtos de corrosão, como óxidos e hidróxidos de alumínio, que se aderiram à superfície das peças. Com o passar do tempo, esses produtos começaram a se desprender devido à dissolução contínua ou à fragilidade dos produtos formados, resultando na perda de massa. Além disso, a formação de uma camada passivadora em alguns casos pode ter diminuído a taxa de perda de massa ao proteger a superfície do material contra a corrosão subsequente. Para as fundidas, a solução de NaCl, sendo altamente corrosiva, acelerou a corrosão, especialmente com os ciclos de molhagem e secagem realizados a cada 15 dias durante a limpeza e reimersão das peças. Durante o processo de limpeza, talvez parte dos produtos de corrosão sejam removidas mecanicamente, contribuindo para a perda de massa. As peças provenientes da fundição e da metalurgia do pó apresentaram comportamentos de corrosão diferentes devido às diferenças em microestrutura e porosidade. As peças fundidas geralmente possuem microestrutura mais homogênea, enquanto as peças de metalurgia do pó podem ter maior porosidade, afetando a forma como a corrosão se desenvolve. Assim, o gráfico de perda de

massa ao longo dos 80 dias reflete a competição entre os processos de ganho de massa, devido à formação de produtos de corrosão, e perda de massa, devido ao desprendimento desses produtos e ao desgaste mecânico durante a manutenção. Observou-se mudança de coloração das peças ao longo do tempo, mas sem alteração no diâmetro e na espessura. As soluções ficavam turvas, mas sem presença de partículas visíveis. A análise de perda de massa das peças provenientes da fundição e da metalurgia do pó está apresentada nas Figuras 15 e 16.

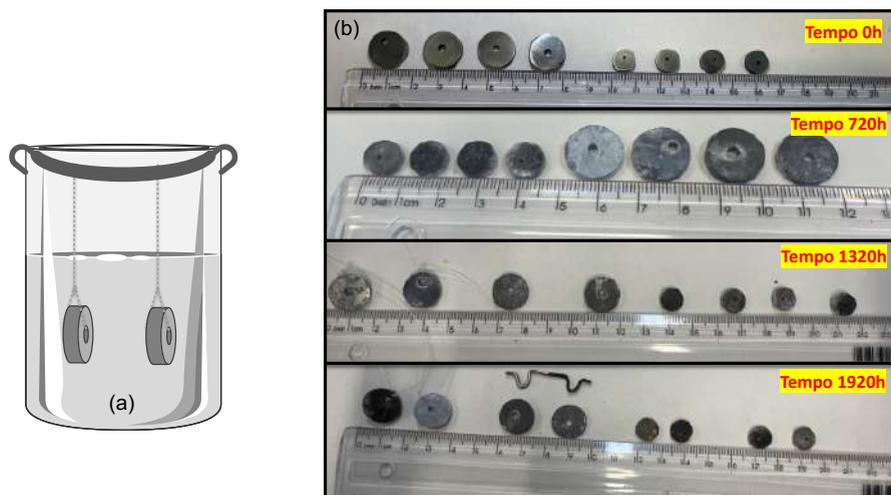


Figura 14. (a) Aparato experimental para o ensaio de degradação por corrosão. (b) Imagens da mudança de coloração ao longo do tempo – Tempo 0h, 720h (30 dias), 1320h (55 dias), 1920h (80 dias).

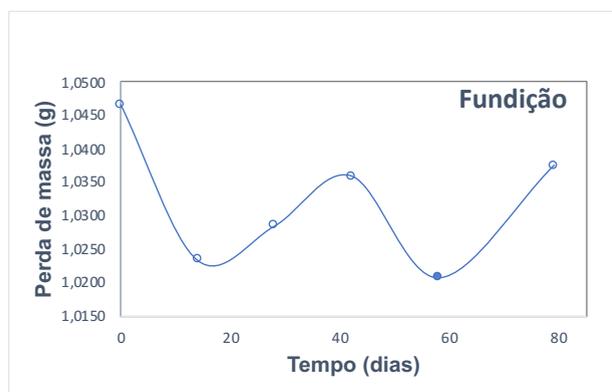


Figura 15. Ensaio de degradação por corrosão para o Al/Si via fundição.

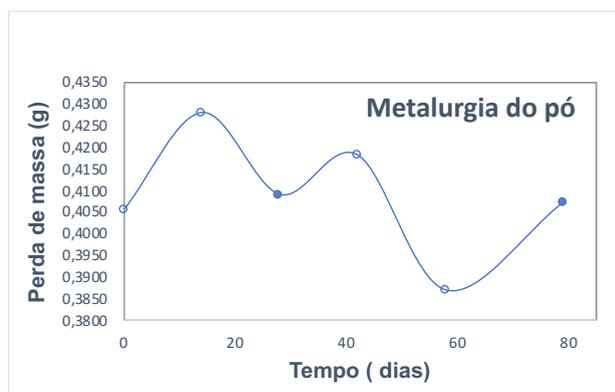


Figura 16. Ensaio de degradação por corrosão para o Al/Si via metalurgia do pó.

CONCLUSÕES

O projeto visa aumentar a compreensão dos alunos sobre a estrutura dos objetos com os quais interagimos, destacando como diferentes estruturas moleculares e fatores químicos podem alterar as propriedades dos materiais. Ao mostrar a importância da química em nossa vida cotidiana, o projeto ajuda a integrar o conhecimento teórico com aplicações práticas. No laboratório, as atividades práticas são essenciais para o aprendizado dos alunos. Elas começam com conceitos básicos de estruturas moleculares e cadeias orgânicas, e progredem para análises que demonstram a influência dos detalhes minuciosos nas propriedades dos materiais. As análises, que incluem a avaliação da resistência mecânica dos corpos de prova e ensaios de corrosão, são realizadas conforme a literatura científica, garantindo resultados confiáveis. Essas experiências laboratoriais não só reforçam o conhecimento teórico dos alunos, mas também destacam a importância da engenharia na modificação e melhoria dos materiais que usamos diariamente. Ao engajar os alunos em práticas científicas, o projeto promove uma compreensão mais profunda e aplicável, preparando-nos para futuras explorações e descobertas.

BIBLIOGRAFIA

- Beer, F.P., Johnston, E.R., DeWolf, J.T., Mazurek, D.F. Mecânica dos materiais. McGraw-Hill Education, 2018.
- Fontana, M.G. Corrosion Engineering. McGraw-Hill Education, 1986.
- Petroski, H. Design Paradigms: Case histories of error and judgment in engineering, 1994.
- Roberge, P.R. Handbook of corrosion engineering. v. 1128, McGraw-Hill, New York, 2000.