

Compactação de Cavacos da Liga AL 1060 T6: Análise do Grau de Densificação

Compaction of Chips from Alloy AL 1060 T6: Analysis of the Degree of Densification

Compactación de Virutas de la Aleación AL 1060 T6: Análisis del Grado de Densificación

Leonardo da Silva Marques¹
Wlademir Reginaldo de Oliveira²

Resumo: Este estudo avalia a compactação de cavacos de alumínio AL 1060 T6 como etapa de inicial para reciclagem, visando aumentar sua densidade. Os cavacos coletados foram carregados em um dispositivo cilíndrico, sendo compactados em prensa hidráulica sob tensões médias de aproximadamente 72, 96 e 120 MPa. Após a prensagem, a massa e espessura dos briquetes foram medidas para cálculo de volume e densidade. As densidades médias obtidas foram $1,52 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ (72 MPa), $1,66 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$ (96 MPa) e $1,74 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ (120 MPa), com densidade relativa entre ~55% e 67% em relação ao alumínio sólido.

Palavras-chave: Compactação de cavacos. Reciclagem de alumínio. Densidade relativa. Compressão, Alumínio 1060.

Abstract: This study evaluates the compaction of aluminum chips AL 1060 T6 as an initial step for recycling, aiming to increase their density. The collected chips were loaded into a cylindrical device and compacted in a hydraulic press under average stresses of approximately 72, 96, and 120 MPa. Following the pressing process, the mass and thickness of the briquettes were measured to calculate volume and density. The average densities obtained were $1.52 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$ (72 MPa), $1.66 \pm 0.07 \text{ g/cm}^3$ (96 MPa), and $1.74 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ (120 MPa), with relative density ranging from approximately 55% to 67% in relation to solid aluminum.

Keywords: Chip compaction. Aluminum recycling. Relative density. Compression. Aluminum 1060

Resumen: Este estudio evalúa la compactación de virutas de aluminio AL 1060 T6 como etapa inicial para el reciclaje, con el objetivo de aumentar su densidad. Las virutas recolectadas fueron cargadas en un dispositivo cilíndrico, siendo compactadas en una prensa hidráulica bajo tensiones medias de aproximadamente 72, 96 y 120 MPa. Tras la prensado, se midieron la masa y el grosor de los briquetes para el cálculo de volumen y densidad. Las densidades medias obtenidas fueron $1,52 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ (72 MPa), $1,66 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$ (96 MPa) y $1,74 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ (120 MPa), con una densidad relativa entre ~55% y 67% en relación al aluminio sólido.

Palabras-clave: Compactación de virutas. Reciclaje de aluminio. Densidad relativa. Compresión. Aleación de aluminio 1060

Submetido 13/03/2026

Aceito 21/07/2026

Publicado 04/08/2026

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Itapetininga. ORCID: E-mail: leonardo.marques@aluno.ifsp.edu.br.

² Mestre em Engenharia Mecânica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Itapetininga. ORCID: 0009-0008-5824-7088. E-mail: prolademir@ifsp.edu.br.

Considerações iniciais

O crescimento na produção de resíduos metálicos de usinagem levanta sérias preocupações devido a vários fatores econômicos e ambientais. Um desses subprodutos muito comuns são os cavacos de alumínio, uma vez que esse metal é amplamente utilizado na indústria. A popularidade do alumínio é justificada pelo fato de a substância possuir uma baixa densidade, alta condutividade térmica e elétrica e, além disso, contém elevada resistência à corrosão. No entanto, o descarte inadequado dos resíduos resulta na perda de grandes quantidades de um metal relativamente valioso e implica dano ao meio ambiente. Isso se manifesta por resultar em mudanças irreversíveis na composição do ambiente ou dos recursos naturais. Portanto, a reciclagem e a reutilização parecem ser a rota economicamente e ecologicamente mais viável para a solução desses problemas. (Pereira, 2025; Rietdorf et al., 2024)

Uma das soluções mais eficazes envolve procedimentos de compactação visando a diminuir o volume de cavacos, sem afetar ou reduzir significativamente a massa, o que aumenta a densidade aparente e melhora o comportamento do material durante o processo de fundição. Além disso, durante a fusão, a compactação pode diminuir a taxa de oxidação da superfície dos cavacos, devido à diminuição da área superficial de material, reduzir o consumo de energia devido à absorção de calor mais eficiente do material compactado o que também[em contribui para diminuir o tempo para a fusão. (ABAL, 2022; Lima, 2023; ABM, 2021)

A liga de alumínio 1060 T6 consiste primordialmente em alumínio com impurezas em níveis mínimos e é largamente utilizada em aplicações que requerem alta condutividade e facilidade de processamento. Logo, é de essencial importância compreender o comportamento da liga sob diferentes pressões para otimizar o processo de reciclagem e recuperação. (UFPR, 2020; Aluminum Association, 2018; Jones, 2019)

Assim, este artigo visa explorar a compactação dos cavacos da liga AL 1060 T6 sob diferentes pressões. Tais resultados proporcionam uma melhor compreensão da resposta do material às cargas aplicadas, essa abordagem não só visa proporcionar um entendimento claro e prático sobre o comportamento da liga, mas direcionar para técnicas mais eficientes de reutilização dos cavacos e apontar para a necessidade urgente de encontrar soluções que se

alinhem com a economia circular e a sustentabilidade industrial. (ABAL, 2022; ABM, 2020; UNIRV, 2021)

Reciclagem do Alumínio

Uma das práticas mais bem estabelecidas da economia circular é a reciclagem de alumínio, que se destaca por suas características materiais únicas. Um fator proeminente sobre o alumínio é que ele pode ser reciclado infinitamente, com uma perda mínima de suas propriedades mecânicas e químicas, portanto, possui um valor especial no contexto da economia circular. A reciclagem de alumínio permite a redução do volume de extração de recursos naturais, além de ela contribuir para a redução dos impactos ambientais da mineração e produção (Costa, 2021; Moraes, 2022)

Na perspectiva do valor energético, destaca a reciclagem do alumínio em comparação com outras formas de produção. A extração do alumínio da bauxita por meio do processo convencional requer muito mais energia devido às etapas necessárias, por exemplo, a obtenção da alumina por meio de um processo chamado Hall-Héroult. De acordo com Costa, reciclar uma tonelada de alumínio consome apenas cerca de 5% da quantidade de energia para produção tradicional. Uma redução no consumo de energia, também tornará a produção de alumínio mais sustentável e ecológica. (Costa, 2021; Alvim et al., 2025).

O Brasil é um país no qual a reciclagem do alumínio possui uma importância notável e uma expressiva representatividade internacional, tornando-se uma atividade mais do que admirável, digna de ser replicada por demais países. Isso porque o país é destaque no cenário mundial de reciclagem de latas de alumínio para bebidas, com taxas que historicamente giram acima dos 95% para o material. O mero fato de tal quantidade de resíduo poder ser reciclada atesta por si só a eficiência e a eficácia do processo, que, em muito, é pautado e motivado pela alta rentabilidade da sucata de alumínio. O desempenho de política em reciclagem, inclusive, se deve à consolidação de uma cadeia consistente e estruturada de recuperação de materiais especiais, orientados por diversos coadjuvantes como a atuação de consumidores conscientes, cooperativas, sucateiros e indústrias transformadoras, além do elevado valor econômico da sucata de alumínio, que estimula ainda mais a coleta reduzindo o descarte inadequado. (Costa, 2021; Moraes, 2022)

Um dos pilares inabaláveis e fundamentais deste sistema complexo e interconectado é a logística reversa. De acordo com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos, a responsabilidade pelo ciclo de vida de um produto deve ser compartilhada de forma equilibrada entre inúmeros agentes, entre eles, os fabricantes, distribuidores, varejistas, consumidores e o próprio governo, que também desempenha um papel não menos importante. À medida que se trata do metal mencionado, a logística reversa é um aspecto fundamental, pois este processo envolve o retorno deste recurso após a utilização de volta a um ciclo produtivo, o que pode ajudar a reduzir a quantidade de aterro e descarte incorreto. Em uma escala mais ampla, a logística reversa pressupõe a reintrodução da sucata no processo de produção e seu uso como matéria-prima secundária. Andrade et al. (2024) discutem esse tópico ao realizar uma análise detalhada da logística reversa associada à política ambiental no Brasil; portanto, essa prática é crítica para a manutenção da garantia de sustentabilidade e cuidado com o ambiente.

Além do mais, a reciclagem do alumínio apresenta um impacto social relevante. Isso ocorre porque este setor gera milhares postos de trabalho diretos e indiretos, sobretudo, entre os catadores de recicláveis e as cooperativas. Costa (2021) ressaltou que, a reciclagem do alumínio contribui, ainda, com a inclusão social, já que se enquadra em países emergentes que necessitam de maior fomento de geração de renda e economia circular.

Outro ponto a ser destacado é a redução dos impactos ambientais decorrentes da cadeia primária do alumínio. A diminuição da demanda por minérios de bauxita implica em menor desmatamento, o que, por sua vez, reduz a quantidade de resíduos produzidos pela indústria e o risco ambientais envolvidos nas atividades de extração. Segundo Costa et al. (2021), em conformidade com Andrade et al. (2025), o processo reciclagem deve ser mantido ao longo do ciclo de vida do produto e impede a ocorrência de uma série de impactos ambientais negativos.

Por fim, a reciclagem do alumínio constitui um exemplo emblemático de economia circular, demonstrando a plena discrição dos ciclos de insumo e da vida econômica. Assim, mais uma vez, a inter-relação entre os componentes ambientais, econômicos e sociais é evidenciada. Por sua vez, a própria sustentabilidade pressupõe o reforço de políticas públicas, o enrijecimento da prática de logística reversa e a própria progressão do aparato tecnológico, como atestam as pesquisas previamente analisadas. (Andrade et al., 2024; Alvim et al., 2025).

Produção de Alumínio

A produção de alumínio é um processo industrial de intensa complexidade tecnológica, sendo, sobretudo, uma das cadeias metalúrgicas com maior requerimento energético. Sob a perspectiva da engenharia mecânica e dos materiais, é possível compreender que cada etapa que vai do minério de bauxita ao metal primário consiste em transformações químicas e termodinâmicas que determinam o custo e o impacto energético do alumínio disponível. Portanto, embora a rota produtiva em questão seja um processo imprescindível para os metalúrgicos, também se destaca a correta avaliação da reciclagem como fundamental para a sustentação de uma economia futura, conforme evidenciado em diversos estudos. (Lima, 2023; ABAL, 2022)

O Processo Bayer é o método industrial consolidado para a obtenção de alumina de alta pureza. Alves et al. e Constantino et al. descrevem o processo em questão como um procedimento complexo de digestão, clarificação, precipitação e calcinação, embora descomplicado em sua execução. Em suma, a bauxita é submetida à digestão com solução cáustica a temperaturas e pressões controladas, de modo a solubilizar os compostos de alumínio. O licor é então clarificado e precipitado para separar a alumina hidratada, que é posteriormente calcinada para formar alumina anidra, o fator essencial do processo de eletrólise. (Alves et al., 2017; Constantino et al., 2012)

Embora este seja, provavelmente, o processo mais intensivo em energia do ciclo de produção do alumínio, ainda não se compara ao próximo. A etapa de eletrólise, onde ocorre a redução eletrolítica, realizada pelo Processo Hall-Héroult, está entre as mais enérgicas da cadeia produtiva do metal. (ABAL, 2021; Lima, 2023)

A alumina é dissolvida em criolita fundida e submetida a uma corrente elétrica de alta voltagem, que raramente fica abaixo de 14 MWh por tonelada de alumínio produzida. Nesse processo, ela reduz os íons Al^{3+} , em um ato físico-químico que produz alumínio líquido com altíssimo grau de pureza. Essa demanda consome uma carga energética elevada, da qual a reciclagem do metal se beneficia, praticamente, com subsídios energéticos fixos: apenas 5% da energia é necessária em comparação à alumina primária, como salientou Lima. Nessa diferença, não se encontra apenas uma significativa redução no consumo de CO_2 ; no caso dos óxidos e, ainda mais, do hidróxido, a economia de energia justifica processos industriais, objetos de

pesquisas e demais subsídios de P&D, voltados ao aproveitamento de cavacos, sucatas e retornos metálicos. (Lima, 2023; ABM, 2020)

Tipos de Cavacos de Alumínio e Morfologia

A forma como os cavacos de alumínio se apresentam é relevante na engenharia mecânica, quando se considera a densidade aparente e outros parâmetros para o transporte, assim como suas características que influenciam no processo de fusão. Segundo material técnico da Workfer e apostilas da UFSC, podem ser encontrados cavacos de alumínio contínuos, semicontínuos e descontínuos. Os cavacos contínuos referem-se a um material dúctil, muito alinhado ao conceito de usinagem; formam fitas metálicas largas em quebra-cavaco com muitas arestas, o que resulta em um aspecto de maior densidade aparente, devido ao entrelaçamento das fitas, porém, com espaço livre para a oxidação

Os cavacos semicontínuos apresentam quebra regular e são o resultado de condições intermediárias de usinagem. Sendo mais facilmente manipuláveis e potencialmente associados a maior densidade aparente, em função de sua geometria e menor entrelaçamento do que os cavacos contínuos, sendo, portanto, comumente preferidos em processos industriais que envolvem coleta, transporte e compactação. A norma ISO 3695: 1993, discutida tecnicamente em periódicos brasileiros, amplia essa classificação ao identificar cavacos helicoidais, espirais, com agulhas, laminados e outros. Cada geometria apresenta um comportamento distinto em relação à compactação e ao rendimento de fusão. Cavacos helicoidais, por exemplo, podem ter uma propensão a se entrelaçar, dificultando o empacotamento. (Workfer, 2019; UFSC, 2020; ISO, 1993)

Cavacos descontínuos ou fragmentados, por outro lado, apresentam maior facilidade de reorganização volumétrica. Estudos acadêmicos publicados em repositórios da UEMA e trabalhos apresentados em congressos da ABM reforçam a constatação muito importante: cavacos mais fragmentados, em especial aqueles provenientes de operações de desbaste, apresentam um desempenho de pré-processamento superior na reciclagem. Eles oxidam menos, compactam com maior densidade e perdem menos material durante a fusão. Lima também aponta que cavacos finos, comuns em operações de acabamento ou usinagem em alta velocidade, sofrem oxidação acelerada, reduzindo seu rendimento metálico. Assim, a

morfologia dos cavacos torna-se não apenas uma questão de usinagem, mas também um fator crucial para aqueles que trabalham com a reutilização e reciclagem do alumínio. Além da morfologia, A característica de composição química das ligas de alumínio também é essencial para prever seu comportamento mecânico, térmico e metalúrgico durante a compactação. (UEMA, 2021; ABM, 2022; Lima, 2023)

Classificação das Ligas de Alumínio

O material didático da UFPR apresenta estruturalmente a classificação oficial da Aluminum Association, agrupando ligas de acordo com os principais elementos de adição. A série 2xxx, reforçada por cobre, exibe propriedades mecânicas superiores e precipitados endurecedores, sendo amplamente utilizada em aplicações aeronáuticas. Por sua vez, as ligas 4xxx, ricas em silício, apresentam excelente fluidez e são utilizadas principalmente no processo de fundição, em razão do comportamento eutético do sistema Al-Si, que reduz a temperatura de fusão e favorece a solidificação. A série 6xxx, que possui adições de magnésio e silício, é versátil e apresenta uma combinação única de propriedades mecanicamente adequadas aos processos de soldagem. No entanto, elas podem formar intermetálicos Al-Fe-Si com ferro, onipresente na cadeia produtiva. Jones aponta que essas inclusões, muitas vezes conhecidas como “escrita chinesa”, prejudicam consideravelmente a ductilidade, o percentual da remoção de impurezas, bem como a resistência à corrosão. (UFPR, 2020; Aluminum Association, 2018; Jones, 2019)

Contudo, esses compostos são crucialmente importantes para um processo industrial, onde atuam como locais de iniciação de trincas ou pites. Lima argumenta que mesmo após a fusão subsequente, as ligas de cavacos mantêm composições químicas comparáveis aos originais, desde que tenham sido produzidas de maneira limpa e prensadas adequadamente. (Lima, 2023; ABM, 2021)

Diferenças entre operações de torneamento e fresamento na forma do cavaco

Durante o torneamento em que a peça é submetida a rotações, é habitual que o cavaco se forme em fitas contínuas. Isto ocorre devido ao fato da ferramenta possuir um corte permanente em toda a peça, desta forma não possui interrupções. No caso desta operação para

um material dúctil, o resultado será, provavelmente, cavacos longos, uma vez que têm a tendência de enrolar e formar emaranhados, esta situação torna difícil a o manuseio e transporte deste material. (Yilmaz; Karabulut; Güllü, 2020).

No fresamento, a formação de cavacos geralmente é mais fragmentada, uma vez que a remoção do material é realizada em entradas e saídas consecutivas dos dentes da fresa. Devido a ação de cada dente que provoca uma retirada mínima do material do bloco, o cavaco é mais provável que seja produzido em unidades comparativamente mais curtas e separadas, embora esse intervalo possa variar dependendo da composição e do estado de lubrificação do cavaco e das condições de produção. (Wagner et al., 2016).

As diferenças das formas entre os cavacos acabam exercendo influência no processo de compactação, cavacos mais longos tendem a se entrelaçarem e criar muitos vazios quando deixados na matriz de compactação, de forma reduzir a densidade inicial e dificultando a redução dos vazios; por outro lado, cavacos mais curtos tendem a acomodar-se e preencher melhor a matriz, formando uma massa mais densa e resultando em corpos compactados mais consistentes. (ALTHARAN et al., 2024).

De maneira geral, quando a ideia é facilitar a compactação ainda na usinagem, busca-se diminuir o comprimento do cavaco evitando a formação de fitas contínuas e emaranhadas. No plano prático, isso muitas vezes significa a mudança de condições de usinagem ou nesta solução, à edição de recursos e ferramentas de modo promover a quebra do cavaco. (YILMAZ; KARABULUT; GÜLLÜ, 2020).

Quando é necessário avançar ainda mais e obter granulados menores ou até mesmo pó metálico, etapas de pós-processamento, como trituração e moagem, são envolvidas. Os estudos apontam a moagem, incluindo a moagem de alta energia como a moagem em moinho de bolas, uma boa alternativa para transformar os cavacos em pó, o que tende a aumentar o empacotamento e reduzir vazios, desde que se controle contaminação e limpeza do material. (WEI et al., 2023).

Metodologia

Os ensaios foram realizados com cavacos de liga AL 1060 T6, coletados durante aulas práticas de usinagem, no IFSP – campus Itapetininga. A maioria dos cavacos demonstrava

morfologia de fita e tubular emaranhada, uma morfologia típica de materiais altamente dúcteis, resultando em longos fragmentos metálicos em série ininterrupta, conforme observado na figura abaixo.

Figura 01: Cavacos da liga de alumínio AL 1060 T6 utilizados nos ensaios



Fonte: Autor (2025).

Afim de estimar a sua densidade aparente, o diâmetro do tambor da Figura 01 foi medida em 57cm, e a sua altura em 49cm, desse modo, seu volume foi calculado da seguinte forma:

$$V = \frac{\pi x D^2}{4} . h = \frac{\pi x 57^2}{4} . 49 = 125036,17 cm^3$$

Onde:

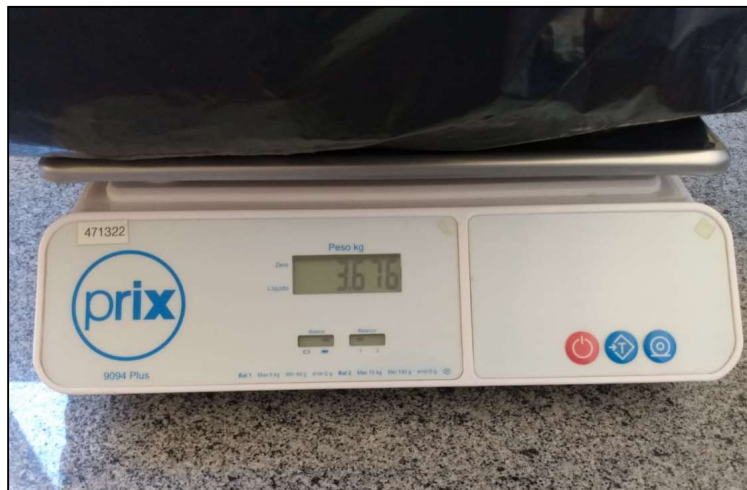
V = Volume;

D = Diâmetro do tambor;

h = Altura do tambor.

A massa do cavaco que preencheu este volume, foi colocada em um saco plástico, e em seguida e pesada um uma balança conforme a figura 02:

Figura 02: Pesagem respectiva à ao recipiente.



Fonte: Autor, 2023.

Com o peso obtido de 3.676Kg, a densidade aparente dos cavacos em questão foi calculada, conforme a Equação 1:

$$\rho_{(ap)} = \frac{Massa (g)}{Volume (cm^3)}$$
$$\rho_{(ap)} = \frac{3676}{125036,17} \cong 0.03g/cm^3$$

Vale ressaltar que está é apenas uma aproximação, e que o valor obtido de densidade aparente é baixo, conforme esperado em cavacos de alumínio com a morfologia mencionada.

Para a prensagem, o dispositivo apropriado utilizado, consiste em um cilindro metálico que apresenta diâmetro interno 51 mm o qual limitava o escoamento radial durante a compressão, garantindo um carregamento axial uniforme em um curso interno de 100mm de comprimento conforme a figura 03.

Figura 03: Dispositivo utilizado para prensagem.



Fonte: Autor, 2023.

A carga foi gerada através do uso de uma prensa hidráulica EMIC de 30 toneladas de capacidade. A Figura 04 exibe a disposição do ensaio bem como do dispositivo utilizado nesse processo.

Figura 04: Arranjo experimental.

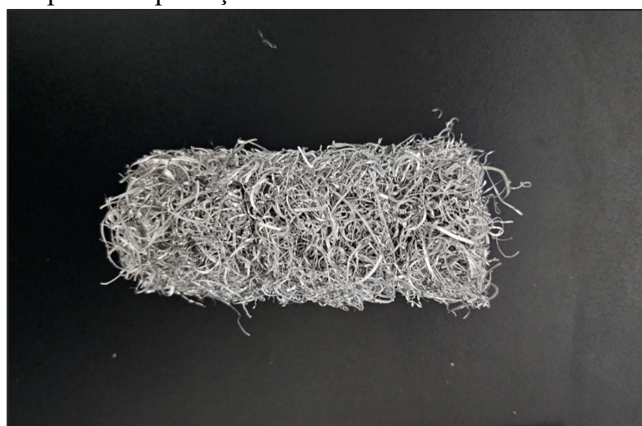


Fonte: Autor (2025).

Para os ensaios, as amostras passaram por uma etapa inicial de preparação e pesagem, para melhor padronização entre as amostras, nesta etapa, utilizando luva de raspas, os cavacos foram parcialmente desemaranhados exercendo uma força manual de separação das fitas, a quantidade separada foi verificada em balança digital até o peso de 10 gramas. Esta separação inicial facilitou a inserção do material no dispositivo de prensagem.

Em seguida, para a preparação final da amostra, foi colocada uma parte de 10g e pressionada manualmente no conjunto de compactação, e assim sucessivamente até a amostra ser pesada em balança com $40g \pm 2g$ e preencher o dispositivo, após isto, foi retirada do dispositivo (Figura 06), embalada e identificada para ser destinada ao ensaio em prensa.

Figura 05: Amostra preparada para compactação.



Fonte: Autor (2025).

Nove amostras foram categorizadas em 3 grupos com o nível determinante de força máxima usada durante os testes. O primeiro grupo foi pressionado com uma carga de 147 kN ($\approx 15Tf$), o segundo foi pressionado até o limite de 196 kN ($\approx 20Tf$), e o terceiro grupo foi exposto à compressão mais intensa com 245 kN ($\approx 20Tf$). Cada nível da carga nos quais as amostras foram preparadas continha 3 amostras.

Para realização do ensaio, após a amostra ser montada no dispositivo, era então comprimida até a força máxima prevista de seu respectivo grupo ser alcançada. Uma vez que isso ocorresse, a força é mantida por 5 minutos, este tempo que visa contribuir para a acomodação interna do corpo, relaxando estruturalmente os cavacos compactados.

É importante destacar, que com o diâmetro sendo fixo de 51mm, podemos calcular a tensão aplicada (σ) para cada ensaio, onde:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{e} \quad A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

- σ = tensão;
- F = força;
- A = Área da seção do êmbolo;
- D = Diâmetro.

Como 1Mpa = 1N/mm²:

$$\sigma_{(Mpa)} = \frac{F}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} = \frac{4 \times F_{(N)}}{\pi \times D_{(mm)}^2}$$

Desta forma, as tensões aplicadas em cada ensaio estão calculadas na tabela 01:

Tabela 01: Tensões aplicadas de cada ensaio.

Ensaio (Tf)	tensão aplicada (MPa)
147 kN	71,96
196 kN	95,94
245 kN	119,93

Fonte: Autor (2025).

Ao final do ensaio, os briquetes foram removidos do dispositivo e submetidos às seguintes medições:

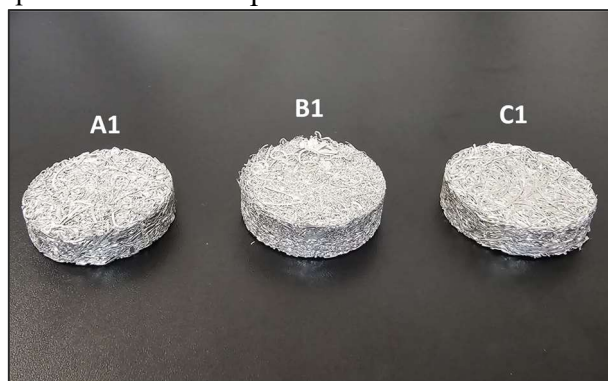
- Espessura final, medida com paquímetro digital com precisão de 0,01mm;
- Massa final, medida em balança com precisão de 1g.

Análise de dados e resultados

Para melhor interpretação dos resultados obtidos de densidade, adotou-se o índice j para identificar os ensaios, sendo j=1 correspondente ao ensaio 72 MPa, j=2 ao ensaio 96 MPa, j=3 ao ensaio 120 MPa.

Após a retirada da amostra do dispositivo de compactação obteve-se um corpo sólido conforme as figuras:

Figura 06: Amostras compactadas com 72 Mpa.



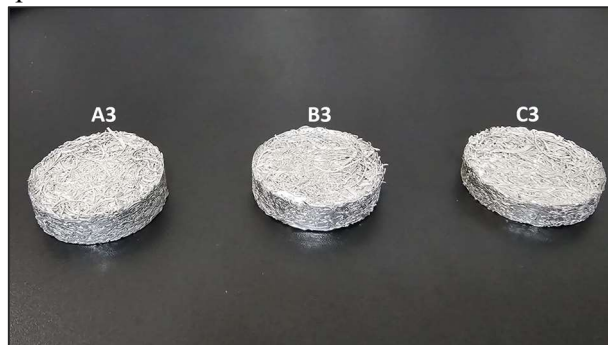
Fonte: Autor (2025).

Figura 07: Amostras compactadas com 96 Mpa.



Fonte: Autor (2025).

Figura 08: Amostras compactadas com 120 MPa.



Fonte: Autor (2025).

Os resultados das medições realizadas estão representados na tabela 1 a seguir:

Tabela 01: medições realizadas de peso e espessura após a compactação.

Ensaio	Amostra	Peso (g)	Espessura (mm)
72 Mpa	A1	36	11,60
	B1	40	12,81
	C1	37	12,14
96 Mpa	A2	42	12,95
	B2	41	12,18
	C2	44	12,47
120 MPa	A3	44	12,69
	B3	41	11,58
	C3	37	10,05

Fonte: Autor (2025).

Com o diâmetro fixo de 51mm, as amostras podem ter sua seção circular calculada a partir da seguinte equação:

$$A_{sc} = \frac{\pi x D^2}{4} = \frac{\pi x 5,1^2}{4} = 20,43 cm^2$$

Desta forma, multiplicando esta área pela espessura de cada amostra, podemos calcular seu volume, e ainda com seu peso, podemos identificar qual a densidade obtida para cada amostra. Adicionalmente, com o cálculo de densidade compara-se o valor obtido com a densidade teórica de 2,7g/cm³, obtendo-se a densidade relativa da amostra em relação ao alumínio conforme a seguinte tabela 02:

Tabela 02: Volume e densidade calculada para cada amostra.

Ensaio	Amostra	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Densidade relativa (%)
72 Mpa	A1	23,70	1,56	58%
	B1	26,17	1,53	57%
	C1	24,80	1,49	55%
96 Mpa	A2	26,48	1,59	59%
	B2	24,82	1,65	61%
	C2	25,48	1,73	64%



120 MPa	A3	25,93	1,70	63%
	B3	23,66	1,73	64%
	C3	20,53	1,80	67%

Fonte: Autor (2025).

Em cada ensaio j , A densidade média foi calculada pela média aritmética das três medições, conforme a Equação (1), a fim de representar o valor central do conjunto de resultados:

$$\bar{\rho}(j) = \frac{(\rho(Aj) + \rho(Bj) + \rho(Cj))}{3} \quad (1)$$

A variabilidade dos resultados de densidade em cada ensaio foi quantificada pelo desvio padrão amostral, conforme a Equação (2). Esse parâmetro expressa a dispersão dos valores em torno da média:

$$\sigma\rho(j) = \sqrt{\left(\frac{((\rho(Aj) - \bar{\rho}(j))^2 + (\rho(Bj) - \bar{\rho}(j))^2 + (\rho(Cj) - \bar{\rho}(j))^2)}{2}\right)} \quad (2)$$

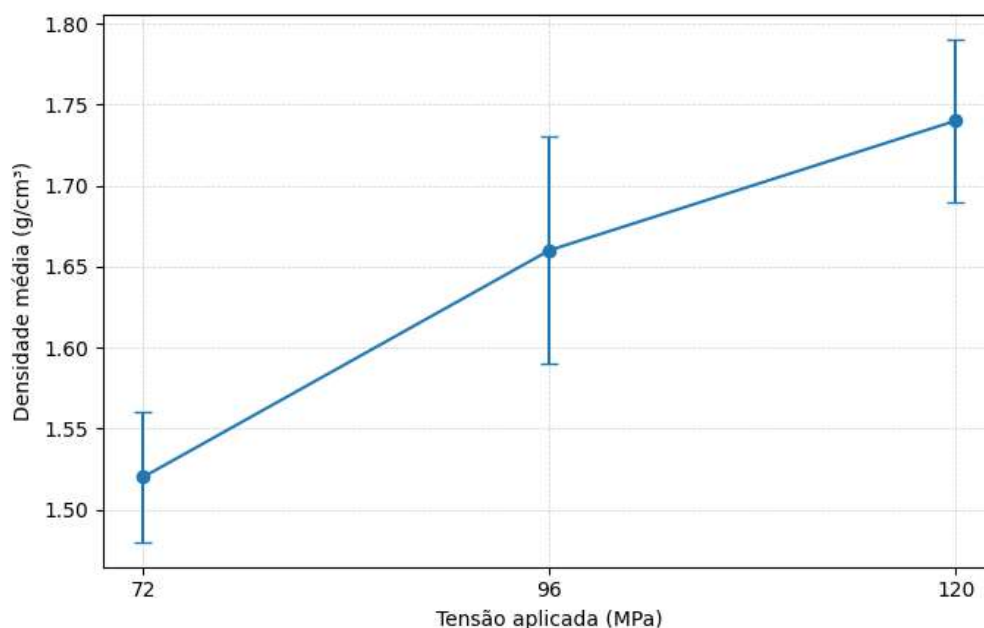
Desta forma, o resultado para a média e desvio padrão da densidade obtida após cada ensaio pode ser analisado de acordo com a Tabela 03.

Tabela 03: Volume e densidade média e desvio padrão por ensaio realizado.

Ensaio	Densidade média	Desvio padrão
72 Mpa	1,52	0,04
96 Mpa	1,66	0,07
120 MPa	1,74	0,05

A partir da tabela, foi possível gerar um gráfico utilizando python, para obter-se uma comparação entre os resultados mais visual.

Gráfico 1 – Densidade média por grupo de força e barras de desvio padrão.



Fonte: Autor, 2025

Analisando os dados obtidos, destaca-se de maneira geral, a densidade obtida foi aumentada em de acordo com a força aplicada em cada ensaio, podemos também notar nas inclinações do gráfico linear, o ganho de densidade de 72 MPa para 96 MPa, foi ligeiramente maior do que o ganho em um salto do ensaio de 96 para 120 MPa.

A partir das médias de densidades do ensaio é possível calcular que o ganho de densidade em relação a força aplicada representa, em porcentagem:

- 72 MPa para 96 MPa = 9,21%
- 96 MPa para 120 MPa = 4,82%
- 72 MPa para 120 MPa = 14,47%

Conclusão

A avaliação apresentou o resultado esperado visto que, quanto maior a intensidade da força aplicada, maior foi a densidade final do material compactado. Nos dados obtidos por

amostra, notou-se que a densidade se alterou de 1,49-1,59 g/cm³ em 72MPa, sendo de 1,56-1,73 g/cm³ em 96 MPa e 1,80- 1,70 g/cm³ em 120 MPa, os valores obtidos evidenciam melhor acomodação do mesmo e redução de vazios internos com a elevação da carga.

Quando os dados são resumidos por ensaio, as médias reforçam esse comportamento. Ademais, em comparação com a densidade teórica do alumínio, que é de 2,7 g/cm³, a densidade relativa variou entre cerca de 55% e 58 % no ensaio com a menor força aplicada, e alcançou até 67% no ensaio com força máxima atingida, exibindo uma melhora significativa na relação de ganho de densidade na compactação das amostras.

Um ponto a ser notado é que o ganho de densidade não aumenta proporcionalmente à carga que foi aplicada: de 147 kN para 196 kN, houve um acréscimo de 9,21%, e de 196 kN para 245 kN, houve um valor mais baixo para o aumento, de 4,82%. Este fato sugere ganhos de densidade decrescentes em níveis maiores de compactação, e esse fato pode ser explicado, já que conforme vazios predominantes são reduzidos, um material provavelmente precise de mais força para reorganização interna, o que exige uma quantidade cada vez maior de carga para um ganho incremental da densidade a ser obtida.

Para estudos futuros, é interessante a investigação da influência do preparo do cavaco, em vista que cavacos longos e emaranhados tendam a gerar maior porosidades, enquanto cavacos menores, geralmente acomodam-se melhor, o que permitiria alcançar maiores densidades. Neste sentido, é válido avaliar alternativas de processamento pós usinagem, como por exemplo a trituração e a moagem, quando o objetivo é obter granulados menores ou até o pó metálico. Além disso, outro estudo complementar seria submeter o material a tensões ainda mais elevadas, a fim de verificar se a densidade continua aumentando ou se ocorre estabilização do ganho.

Além disso, é importante correlacionar a densidade com os indicadores de desempenho em outros processos, o rendimento e a qualidade do material resultante do tratamento térmico. Essa correlação permite não apenas avaliar o grau de compactação, mas também avaliar o efeito real do corpo compactado na operação do processo de reciclagem.

Referências

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Tratamentos térmicos do alumínio**. São Paulo, 2022.

ABM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO. **Anais do Congresso Anual da ABM**. São Paulo, 2021.

ABM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO. **Pesquisas e estudos sobre reciclagem do alumínio**. São Paulo, 2020.

ALUMINUM ASSOCIATION. **Aluminum standards and data**. Washington: Aluminum Association, 2018.

ALVES, L. et al. **Processos industriais do alumínio**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

ALVIM, Débora Souza et al. Aluminum recycling and its contribution to socio-environmental sustainability: a perspective from circular economy and environmental management. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 19, n. 10, e013608, 2025. DOI: 10.24857/rgsa.v19n10-041.

ANDRADE, Ana Carolina de et al. A relação entre a logística reversa do alumínio e as políticas ambientais no Brasil. **Revista FT**, v. 1, n. 1, 2024.

CONSTANTINO, C. et al. **Química dos materiais: processamento da bauxita e obtenção de alumina**. São Paulo: Blücher, 2012.

COSTA, Leonardo Vieira da. **A reciclagem do alumínio: caminho para o desenvolvimento sustentável**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3695:1993 — Aluminium chips — Determination of apparent density**. Genebra, 1993.

JONES, M. **Microstructural behaviour of aluminium alloys in industrial recycling**. London: Elsevier, 2019.

LIMA, R. A. **Eficiência energética e reciclagem do alumínio no Brasil**. Porto Alegre: UFRGS, 2023.

MORAES, Patrick Marques de. **Reciclagem do alumínio: aspectos ambientais, energéticos e socioeconômicos**. 2022. Monografia (Graduação em Engenharia) – Instituição de Ensino, 2022.

PEREIRA, F. **Resíduos de usinagem e recuperação de alumínio**. São Paulo: IPT, 2025.

RIETDORF, M. et al. **Machining waste management and circular metals**. Berlin: Springer, 2024.

UEMA – UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO. **Trabalhos acadêmicos sobre processos de reciclagem do alumínio**. São Luís, 2021.

UFPR – UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **Materiais de engenharia: ligas de alumínio**. Curitiba, 2020.

UFSC – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Apostila de usinagem: cavacos e mecanismos de formação**. Florianópolis, 2020.

UNIRV – UNIVERSIDADE DE RIO VERDE. **Tratamentos térmicos do alumínio: fundamentos metalúrgicos**. Rio Verde, 2021.

WORKFER. **Catálogo técnico de cavacos metálicos**. São Paulo, 2019.

ALTHARAN, Yahya M.; SHAMSUDIN, S.; AL-ALIMI, Sami; SAIF, Yazid; ZHOU, Wenbin. A review on solid-state recycling of aluminum machining chips and their morphology effect on recycled part quality. **Heliyon**, v. 10, n. 14, e34433, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34433.

WAGNER, Vincent; VISSIO, Arnaud; DUC, Emmanuel; PIJOLAT, Michele. Relationship between cutting conditions and chips morphology during milling of aluminium Al-2050. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 82, p. 1881–1897, 2016. DOI: 10.1007/s00170-015-7490-7.

WEI, L. K. *et al.* Producing metal powder from machining chips using ball milling process: a review. **Materials**, Basel, v. 16, n. 13, e4635, 2023. DOI: 10.3390/ma16134635.

YILMAZ, Bahattin; KARABULUT, Şener; GÜLLÜ, Abdulkadir. A review of the chip breaking methods for continuous chips in turning. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 49, p. 50–69, 2020. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.10.026.