DESENVOLVIMENTO DE MOEDOR DE CAVACO DE ALUMÍNIO DE BAIXO CUSTO

Alexandre Mateus Mendonça Bezerra (alexmateus11@yahoo.com.br), Ayrton Lira de Lucena (ayrton_lucena@hotmail.com), Marcele Gomes da Silva (marcelegomes16@hotmail.com), Juliano Fernandes Dias Taveira de Brito (britojuliano99@gmail.com), George Santos Marinho (gmarinho@ct.ufrn.br)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN); Deptº de Engenharia Mecânica. Campus Universitário. Natal RN 59078-970

RESUMO: *Processos de moagem remontam aos primórdios da humanidade, quando grãos começaram a ser processados para alimentação. Posteriormente, o processo se estendeu ao processamento de materiais para outros fins. Modernamente, a obtenção de peças a partir de pós metálicos depende do uso de máquinas de grande porte, implicando em custos elevados. Entretanto, há alternativas. Neste trabalho são descritas as etapas de desenvolvimento de um moedor de cavaco de alumínio de pequeno porte, baixo custo e montagem simples, cujos componentes foram projetados por meio de equações matemáticas atinentes aos conteúdos de cursos de elementos de máquinas, resistência dos materiais e processos de fabricação mecânica. Na etapa preliminar do projeto, considerou-se a adaptação de uma furadeira de bancada ao processo. Em seguida, projetou-se o eixo principal, as acoplagens dos componentes a esse eixo e à câmara de moagem. Após a construção do dispositivo, foram efetuados testes de processamento, onde se constatou que o dispositivo se mostrou eficiente, simples e compacto, transformando com rapidez cavaco de alumínio em pó, que por sua vez, poderá ser utilizado para diversos fins.*

PALAVRAS-CHAVE: *Cavaco; Moagem; Pó de alumínio; Projeto estrutural; Metalurgia do pó.*

DEVELOPMENT OF LOW-COST ALUMINUM CHIP GRINDER FOR ALUMINUM POWDER

ABSTRACT: *Grinding processes date back to the beginnings of humanity, when grains began to be processed for food. Subsequently, the process was extended to the processing of materials for other purposes. Modernly, obtaining parts from metal powders depends on the use of large machines, implying high costs. However, there are alternatives, in this work, the development stages of a small aluminum chip grinder with low cost and simple assembly, are described, whose components were designed by means of mathematical equations related to the contents of courses of machine elements, strength of materials and processes of mechanical fabrication. In the preliminary stage of the project, it was considered the adaptation of a bench drill to the process. Then, the main axis was designed, the couplings of the components to that axis and to the grinding chamber. After the device was built, processing tests were made, where it was found that the device is efficient, simple and compact and quickly transforms aluminum chips into powder that could be used for various purposes.*

KEYWORDS: *Chip; Grinding; Aluminum powder; Structural design; Powder metallurgy.*

1. INTRODUÇÃO

Segundo Chiaverini (1986), metalurgia do pó é a técnica que consiste em transformar pós de metais em peças mais resistentes sem necessidade de fusão, recorrendo-se apenas ao emprego de pressão e calor, procedimento que remonta ao período da Segunda Guerra Mundial (1939 – 1945). Aplicada ao setor industrial, a metalurgia do pó apresenta nítida vantagem sobre os demais processos de fabricação, destacando-se: economia, rapidez, confiabilidade metrológica, produção em grande escala, controle rigoroso da composição do material (eliminação de maior quantidade de impurezas) e redução de perdas, onde o pó de metais pode ser obtido por meio de moagem.

A moagem consiste na redução do pó de um dado material a partículas menores (CHIAVERINI, 1986), permitindo controle de tamanho e homogeneização. Associada à metalurgia do pó, a moagem de alta energia pode ser aplicada ao processo de reciclagem de alumínio, permitindo a fabricação de peças a partir de resíduos da usinagem do material sólido original (SOUZA, 2017).

A usinagem é uma técnica de fabricação de peças que gera grande quantidade de resíduos, sendo a maior parte constituída de cavacos. Para reduzir o desperdício de material, surgiram técnicas de reciclagem de resíduos metálicos (e.g., cavacos), entre elas a moagem industrial. O processo é realizado por meio de máquinas de grande porte, com elevada capacidade de produção. Porém, em oficinas de pequeno porte, a presença dessas máquinas é limitada tanto pelos custos de aquisição, operação e manutenção quanto pela ocupação de espaço físico (CHIAVERINI, 1986).

No presente trabalho teve-se por objetivo construir uma máquina-ferramenta de pequenas dimensões, baixo custo, reduzido consumo de eletricidade, manutenção simples e fácil de operar, destinada à produção de pó de alumínio a partir do resíduo da usinagem.

2. MATERIAL E PROCEDIMENTOS

Na fase de projeto, considerou-se inicialmente uma câmara com dimensões reduzidas e que permitisse o depósito de pequenas quantidades de cavacos de alumínio. A moagem foi idealizada para ser obtida por meio de um disco rotativo de granito que, ao girar no interior da câmara, produz o pó de alumínio. Por meio de parafusos, o disco de granito foi acoplado a um disco de metal dotado de um eixo (pino) e esse eixo foi acoplado ao mandril de uma máquina furadeira de bancada, permitindo a transmissão do movimento rotativo ao disco de granito. A câmara de moagem foi apoiada em uma base constituída por um bloco de madeira, dotado de um disco de granito fixo. O projeto preliminar do dispositivo pode ser observado na Figura 1.

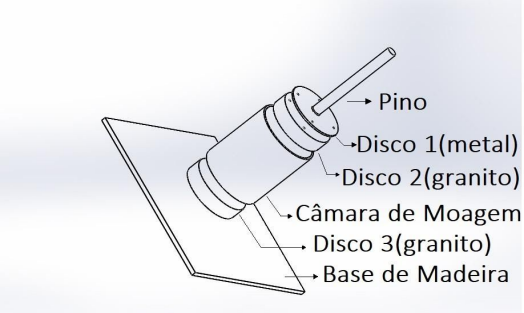

FIGURA 1. Projeto preliminar do dispositivo de moagem para obtenção de pó de alumínio. Fonte: Própria (2020).

Iniciou-se o dimensionamento do dispositivo considerando-se que a câmara de moagem seria obtida a partir de material reutilizado. Dada essa condição, dimensionou-se o eixo de transmissão de movimento entre a furadeira e o disco de granito móvel. Em seguida, foram dimensionados os discos de metal e de granito, os parafusos de contato e a base (também feita a partir de material reutilizado).

2.1. Material

Na Tabela 1, apresentam-se os materiais e respectivo custo relativo a cada elemento constituinte do dispositivo de moagem para produção de pó de alumínio.

TABELA 1. Material e custo dos elementos usados no projeto.

Peça	Material	Custo (R$)
Pino	Aço SAE 1020	20,00
Disco 1	Aço SAE 1020	1,54
Disco 2	Granito São Gabriel	7,37
Disco 3	Granito São Gabriel	7,37
Câmara	Alumínio Reciclado	43,37
Base	Madeira Mdf	5,00
-	Total	84,65

Fonte: Própria (2020)

Na Tabela 2, apresentam-se algumas propriedades mecânicas de cada material selecionado para compor o dispositivo de moagem.

TABELA 2. Propriedades mecânicas.

Material	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência ao Escoamento (Mpa)	Resistência à Ruptura (Mpa)	Resistência de cisalhamento ao escoamento (Mpa)
Aço SAE 1020	-	393	469	196,5
Alumínio 7075	-	103	228	51,5
Granito S. Gabriel *	113,7	-	-	-

Fonte: Norton (2004), *Nogami (2013).

A resistência de cisalhamento ao escoamento foi calculada pelo critério de tresca, utilizando-se para isso dados da resistência ao escoamento obtidos na bibliografia Shigley et al. (2016), conforme expresso na Equação 1.

$$S_{sy} = 0,5.S_y \quad (1)$$

Sendo: S_y a resistência ao escoamento e Ssy a resistência ao escoamento por cisalhamento.

Para dotar o eixo do movimento rotativo necessário ao processo de moagem, utilizou-se uma furadeira de bancada, modelo Ferrari F-13, com potência de ⅓ de cv, 1700 rpm, rotação mínima de 520 rpm e mandril com 13 mm de diâmetro, conforme se observa na Figura 2.



FIGURA 2. Furadeira utilizada como motor de acionamento do dispositivo de moagem. Fonte: Própria (2020).

2.2. Cálculo do Torque

A potência da furadeira pode ser calculada por meio da Equação 2, expressa por:

$$P = T\frac{d\Theta}{dt} = T.\omega \quad (2)$$

Sendo: P a potência (em N.m = W), T o torque (em N.m), Θ o ângulo (em rad), t o tempo (em segundo), ω a velocidade angular (em rad/s).

Como a velocidade angular e a potência da furadeira de bancada são conhecidas, o torque fornecido pelo motor ao eixo do dispositivo de moagem pode ser estimado por meio da Equação 3.

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (3)$$

2.3. Dimensionamento de eixo

O eixo de torção foi dimensionado para ser inserido internamente ao mandril da furadeira de bancada e soldado ao disco de metal adjacente ao disco de granito móvel. A torção obtida pode ser estimada por meio da equação de torção sob um eixo, conforme Hibbeler (2000), expressa por:

$$\tau = \frac{T.r}{Jp} \quad (4)$$

Sendo: T o torque (em N.m), r o raio do eixo (em mm) e Jp o momento de inércia polar para um eixo maciço, que pode ser determinado a partir da Equação 5, conforme Hibbeler (2000):

$$Jp = \frac{\pi r^4}{2} \quad (5)$$

Substituindo-se a Equação 5 na Equação 4, e considerando-se o material com comportamento linear elástico, obtém-se o raio mínimo permitido pelo material, de forma a não cisalhar por torção, i.e.,

$$r_{min} = \left(\frac{2T}{\pi\tau}\right)^{1/3} \quad (6)$$

Onde o raio mínimo é ($r_{mín}$) é obtido substituindo-se na Equação 6, os valores da tensão de torção (τ) pela tensão admissível de cisalhamento característica do material, obtida na Tabela 2.

Escolhido o diâmetro de forma a satisfazer aos cálculos realizados acima, aplica-se um coeficiente de segurança sugerido por Hibbeler (2000), dado por:

$$FS = \frac{\tau_{adm}}{\tau_{aplicada}} \quad (7)$$

Sendo ambas as tensões calculadas a partir da Equação 4, considerando-se o raio calculado de acordo com as condições de projeto, onde a tensão admissível é a resistência de cisalhamento do material por ruptura, conforme especificado na Tabela 2.

2.4. Compressão sobre pino

Além da torção, o pino estará sujeito à ação de forças compressivas, uma vez que a furadeira de bancada se move verticalmente e age contra o material no interior da câmara de moagem, conforme representado no diagrama de corpo livre mostrado na Figura 3.

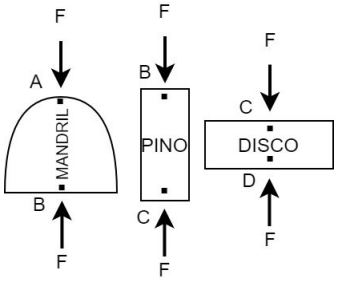

FIGURA 3. Diagrama de corpo livre dos principais componentes do dispositivo de moagem. Fonte: Própria (2020).

A partir das equações para forças e momentos, obtém-se:

$$\sum Fx = 0 \quad (8)$$

$$\sum F_y = -B_y + C_y = 0 \rightarrow C_y = B_y \quad (9)$$

$$\sum M_B = 0 \quad (10)$$

Assim, a força de compressão aplicada sobre o pino será aquela correspondente à força manual aplicada sobre a furadeira de bancada vertical. A tensão aplicada devido a ação da compressão será obtida a partir da tensão média, dada por:

$$\sigma c = \frac{F}{A} \tag{11}$$

Sendo F a força By, que por sua vez será a força aplicada sobre a furadeira de bancada, que, para fins de cálculo, foi aproximada como sendo a força média de um homem aplicada sobre a área da seção transversal, expressa por:

$$A = \pi r^2 \tag{12}$$

Comparando-se a tensão de compressão do disco com a resistência do material à compressão, conforme propriedade destacada na Tabela 2, e aplicando-se a Equação 13, obtém-se o coeficiente de segurança para compressão do pino, i.e.,

$$FS_{C-pino} = \frac{S}{\sigma c} \tag{13}$$

2.5. Acoplamento pino-disco

O acoplamento entre pino e disco foi obtido por meio de solda com eletrodo revestido, sendo considerada a opção de solda de filete, conforme esquema mostrado na Figura 4.

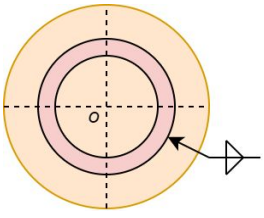

FIGURA 4. Geometria de solda em filete circular ao redor do pino em contato com o disco. Fonte: Própria (2020).

Os dados das propriedades do conjunto pino-disco após soldagem são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3. Resistências do conjunto de solda.

Material	Resistência escoamento (N/mm²)	Resistência máxima (N/mm²)
Pino (SAE 1020 HR)	207	379
Disco (SAE 1020 HR)	207	379
Solda E6013	445	427

Fonte: Norton (2004).

A tensão de cisalhamento primária devido a ação de uma força sob a solda, é dado por Shigley et al. (2016):

$$\tau' = \frac{V}{A} \qquad (14)$$

Sendo: V (em N) é a força aplicada sobre a solda, que corresponde a força tangencial devido a torção determinada pela Equação 15 (HIBBELER, 2000), e A (em m²) a área de garganta da solda.

$$V = \frac{T}{r} \qquad (15)$$

Na Figura 5, listam-se as áreas de garganta e os segundos momentos polares unitários de área para as soldas de filete mais comum encontradas Shigley et al. (2016), mostrando sobretudo uma solda em círculo, que é o caso aqui tratado.

Solda	Área de garganta	Localização de G	Segundo momento polar unitário de área
	$A = 1{,}414\,\pi hr$		$J_u = 2\pi r^3$

FIGURA 5. Propriedades torcionais de solda de filete. Fonte: Adaptado de Shigley *et al.*, 2016.

Sendo assim, de posse da área e da força aplicada e das Equações 14 e 16, tem-se:

$$\tau' = \frac{V}{1{,}414h\pi r} = \frac{T/r}{1{,}414h\pi r} = \frac{T}{1{,}414h\pi r^2} \qquad (16)$$

Por meio da Equação 17 pode-se estimar a espessura mínima da garganta que a solda deve possuir, de modo a suportar a ação da força tangencial.

$$h'_{min} = \frac{V}{1{,}414\tau'\pi r} = \frac{T}{1{,}414\tau'\pi r^2} \quad (17)$$

A tensão de cisalhamento primária corresponde à tensão admissível do material de menor resistência no conjunto, i.e.,

$$S = 0,3 * Sut;\ 0,4 * Sy \quad (18)$$

Ainda considerando-se a Figura 5, o momento polar unitário (Ju) para solda circular vale $2\pi r^3$. Logo, de acordo com Shigley et al. (2016), o momento polar de inércia (jp) pode ser estimado por:

$$Jp = 0,707.h.(Ju) = 0,707.h.(2\pi r^3) \quad (19)$$

Segundo Shigley et al. (2016), a tensão de cisalhamento devido a força rotacional, que provoca a torção, é calculada por meio da seguinte relação:

$$\tau'' = \frac{Tr}{Jp} = \frac{Tr}{0{,}707.h.(2\pi r^3)} = \frac{T}{1{,}414.h.\pi r^2} \quad (20)$$

Para dimensionar corretamente a solda deve-se considerar a torção a qual ela será submetida. Para isso, deve-se estimar o tamanho da garganta, que é feito por meio da relação:

$$h''_{min} = \frac{Tr}{1{,}414.\tau''.\pi r^3} = \frac{T}{1{,}414.\tau''.\pi r^2} \quad (21)$$

Finalmente, considerando-se as tensões de cisalhamento primária e secundária combinadas, a espessura mínima de garganta pode ser estimada por meio de:

$$h_{min} = \sqrt{h'^2 + h''^2} \quad (22)$$

Na Figura 6, apresentam-se os diagramas das cargas aplicadas pela solda ao pino do dispositivo de moagem.

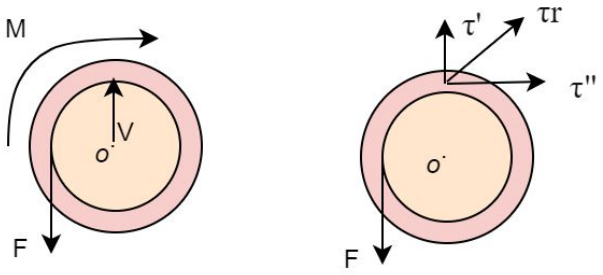

FIGURA 6. Diagrama das cargas aplicadas pelas soldas ao pino. Fonte: Própria (2020).

Após a escolha do cordão de solda, cuja espessura deve ser superior à mínima calculada para garantia de segurança, obtém-se a tensão resultante final (SHIGLEY, 2006), *i.e.,*

$$\tau_R = \sqrt{\tau'^2 + \tau''^2} \tag{23}$$

Desse modo, o coeficiente de segurança válido para solda será determinado a partir do menor valor de resistência mostrado na Tabela 3 dentre os 3 materiais listados.

$$FS_{solda} = \frac{0{,}3Sut\ ;\ 0{,}4Sy}{\tau_R} \tag{24}$$

Onde as tensões de cisalhamento são calculadas a partir da Equação 16, usando-se h' escolhido, e da Equação 21 usando h" escolhido. Portanto, a resistência do material considerada será a menor resistência entre a solda e os componentes do dispositivo de moagem (SHIGLEY, 2006).

2.6. Disco

Na Figura 6, apresenta-se o diagrama do disco de moagem e as forças que atuaram sobre ele. A força de compressão sobre o disco pode ser estimada a partir da Equação 25.

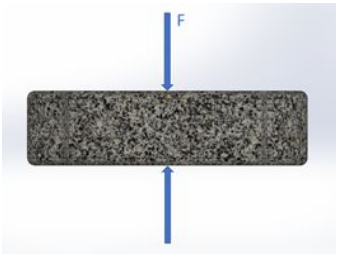

FIGURA 7. Ilustração da força de compressão atuante sobre o disco do dispositivo de moagem. Fonte: Própria (2020).

$$\sigma = F/A \tag{25}$$

Sendo: σ a tensão normal (em Pa) e F a força de compressão aplicada, que corresponde à força imposta pelo operador durante o processamento e A (em m²) a área de seção transversal do disco.

Com o resultado da Equação 25, estimou-se a resistência à compressão do material (granito), utilizando-se para isso dados da Tabela 2. Assim, tem-se o fator de segurança:

$$FS_{C\ disco} = \frac{Sc}{\sigma_c} \tag{26}$$

Na Figura 8 representam-se as forças aplicadas sobre os elementos do dispositivo, destacando-se a força de atrito que atuará sobre os cavacos.

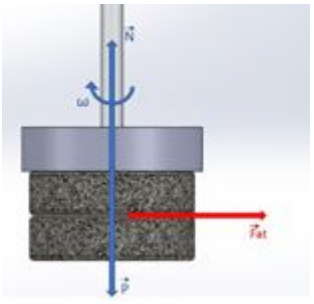

FIGURA 8. Ilustração da força de atrito gerada pela rotação do disco de granito. Fonte: Própria (2020).

Para estimar da força de atrito (F_{at}) entre o disco de granito e os cavacos considera-se que, por definição, ela pode ser mensurada a partir do produto da força de reação ao peso (F_{Normal}) pelo coeficiente de atrito (μ), i.e.,

$$Fat = \mu N \quad (27)$$

Afim de verificar se a máquina poderia sofrer um processo de travamento, comparou-se o valor estimado para F_{at} à força provocada pelo torque.

2.7. Acoplagem Disco-Disco

No que se refere ao projeto do parafuso para acoplagem disco-disco, levou-se em consideração que o parafuso sofre alongamento para suportar o peso total do conjunto. Desse modo, calculou-se a força exercida sobre estes como sendo:

$$\tau_s = \frac{F}{Area\ de\ rosca * Número\ de\ parafusos} \quad (28)$$

A área de rosca corresponde ao número de filetes multiplicado pela área de um único filete (GALVÃO, 2018), sendo matematicamente expressa por:

$$A = \pi.d.wi.p \quad (29)$$

Sendo: d (em mm) o diâmetro da rosca, *wi* o fator de área de cisalhamento por rasgamento, definido por Norton (2003), e p o passo da rosca.

A força de corte (cisalhamento) que atua em cada parafuso é obtida a partir da força tangencial devido ao momento de torção, dada por:

$$F_t = \frac{M_t}{Z.r} \quad (30)$$

Na Figura 9 ilustra-se a ação da força de torção sobre o disco de moagem.

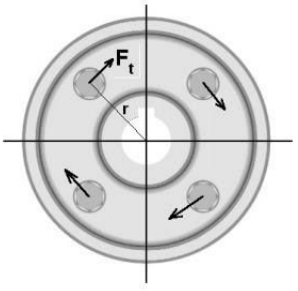

FIGURA 9. Torção sobre parafusos. Fonte: Cruz (2020).

Com a força de torção atua tangencialmente sobre cada parafuso, calcula-se a tensão de cisalhamento por torção como sendo dada por:

$$\tau_s = \frac{F_t}{\pi . r^2} \tag{31}$$

Sendo o coeficiente de segurança para o parafuso, a Equação 32.

$$N_{cisalhamento\ parafuso} = \frac{S_{sy}}{\tau_s} \tag{32}$$

2.8. Câmara de moagem

Para calcular o volume da câmara, foi utilizado o postulado conhecido por *Princípio de Cavalieri*, definido para cálculos de volume dos sólidos geométricos (DANTE, 2006), i.e.,

$$V_{cilíndro} = V_{câmara} = A_b x\ h \tag{33}$$

A partir do volume da câmara é possível conhecer o volume máximo de amostra que pode ser inserida no dispositivo de moagem, uma vez que este é o volume compreendido entre as peças de granito situadas no interior da câmara. Calculando-se o volume do granito por meio da Equação 34, obtém-se o valor total do volume de granito usando-se a Equação 35. Assim, o valor disponível para conter amostras de cavaco de alumínio é dado pela Equação 36.

$$V_{granito} = A_{b(granito)}\ x\ h_{granito} \tag{34}$$

$$V_{Total\ Granito} = V_{granito\ (disco\ 2)} + V_{granito\ (disco3)} \tag{35}$$

$$V_{Máx\ Amostra} = V_{câmara} - V_{Total\ granito} \tag{36}$$

2.9. Projeto em CAD

Após a realização dos cálculos, os componentes do dispositivo de moagem foram modelados digitalmente por meio do software *SolidWorks*. Posteriormente, realizou-se a modelagem dos componentes montados, a fim de simular o dispositivo em sua montagem final.

Por fim, foi realizado o desenho técnico dos componentes em folha A4, para servir de auxílio à fabricação do dispositivo.

2.10. Fabricação

A partir de material descartado, selecionaram-se a base e a câmara de moagem. As pedras de moagem (de granito bruto) foram obtidas a partir do corte de um bloco de pedra maior. O disco de aço galvanizado foi usinado até se obter a dimensão desejada. Utilizando-se uma fresa (diametro de ⅛ in de polegada), realizaram-se os furos para acoplagem dos parafusos de fixação entre o disco e o granito. De igual modo, o pino foi usinado até se obter a dimensão desejada. Posteriormente, foi feito a solda no conjunto pino-disco e, depois, por meio de parafusos, o conjunto foi acoplado ao disco de granito. Em seguida a câmara de moagem foi colada à base de madeira, para se obter uma melhor fixação. Por fim, inseriu-se o disco de granito na parte inferior, apoiado sobre a base. Para o processamento do pó, deixou-se o moedor em operação em tempo hábil de 15 minutos, posteriormente o mesmo foi passado por peneiras, para avaliar a granulometria encontrada, sendo também pesada antes e ao final.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para desenvolvimento do dispositivo moedor de cavacos de alumínio partiu-se de uma ideia preliminar, onde se considerou como material de corte o granito (FAGUNDES et al., 2015).

Sendo assim, com base nos dados sobre o motor da furadeira de bancada – potência 250 W e velocidade angular mínima de 520 rpm (8,6 rad/s), o torque máximo fornecido foi calculado utilizando-se a Equação 2, resultando em 28,85 N.m.

No dimensionamento do eixo (pino), os efeitos da torção foram estimados a partir da Equação 6, onde se utilizou o valor do torque fornecido pelo motor da furadeira e a tensão admissível como sendo o valor da resistência de cisalhamento ao escoamento do material. Considerou-se que, caso o material viesse a escoar, suas propriedades já não seriam as mesmas e ele sairia do regime elástico, fato que poderia interferir no funcionamento do dispositivo. Na Tabela 2, obteve-se o valor de 196,5 MPa para aço carbono SAE 1020. O raio mínimo do eixo, de acordo com a Equação 6, foi de 4,54 mm. Dessa forma, selecionou-se um tarugo com 11,9 mm de diâmetro e, por meio da Equação 4, determinou-se um valor de 87,19 MPa de tensão por torção e, por meio da Equação 7, determinou-se um coeficiente de segurança de 2,25. Assim, como recurso de segurança, o pino foi superdimensionado para resistir até 2,25 vezes a torção máxima aplicada pelo motor.

Ainda sobre o dimensionamento do pino, considerando-se o movimento na direção vertical de descida da furadeira de bancada e a consequente compressão exercida sobre a amostra, por se desconhecer a força aplicada pelo operador da furadeira de bancada, para fins de cálculo, considerou-se o valor de 411,879 N, que corresponde a força média do braço dominante de um homem da Força Aérea Brasileira, tendo em vista que, na prática, a força mais crítica a ser imposta seria essa (Teixeira, 2009). A partir da Equação 12 e do valor do raio (11,9 mm), foi determinado o valor de 111,220 mm² como sendo a da seção transversal. Aplicando-se a Equação 11, determinou-se o valor de 3,70 MPa correspondente à tensão máxima de compressão, que é uma tensão muito baixa.

Para realizar o acoplamento entre o pino e o disco, inicialmente pensou-se em rosquear. Contudo, constatou-se que essa opção deixaria o projeto propenso a quebra dos filetes de roscas – pequenos em função do diâmetro do pino. Assim, optou-se pela solda de filete circular.

Para cálculo da espessura mínima de garganta do cordão de solda, considerou-se a ação da força tangencial, dada pela Equação 16. Antes disso, foi necessário determinar a tensão de cisalhamento primária admissível para o material menos resistente no conjunto entre o metal de adição e o metal de base (Shigley et al., 2016). No caso dos aços laminados a frio, considera-se a resistência do valor laminado a quente, uma vez que o processo de solda envolve temperaturas elevadas. A partir da Tabela 3, observou-se que o material menos resistente é o aço SAE 1020, que apresenta 207 MPa de resistência ao escoamento e, de acordo com a Equação 18, apresentará 82,8 MPa de resistência para solda.

A espessura mínima para o cordão de solda (h'), dada pela Equação 17 e aplicando-se o torque máximo calculado de 28,85 N.m, foi determinada como sendo de 2,21 mm. Também é possível estimar a espessura mínima da solda a partir da Equação 21. Desta feita, para os efeitos de torção aplicadas à solda (h"), coincidentemente neste caso uma solda circular, a expressão será a mesma da Equação 17. Como esperado, obteve-se novamente o valor 2,21 mm de garganta.

A partir da Equação 22, obtém-se o valor de 3,125 mm de espessura da garganta final. Foi escolhido uma espessura da garganta de solda de 3,25 mm, por ser fácil de garantir tal dimensão através da soldagem. Por meio das equações 16 e 20, obteve-se o valor de 56,42 Mpa. Substituindo-se esse valor na Equação 23, a tensão de cisalhamento total foi de 79,79 MPa. Por meio da Equação 24, determinou-se um coeficiente de 1,03 para segurança à solda.

Sabendo-se que o alumínio sofre aquecimento rápido sob atrito, escolheu-se o granito como material para constituir o disco de moagem. Trata-se de uma rocha ígnea, altamente estável quando submetida a mudanças de pressão e temperatura. Além disso, o granito é mais resistente ao desgaste e abrasão do que o mármore (Montenne, 2017).

Na análise da resistência do disco de granito à força de compressão, utilizou-se a Equação 25, considerando-se a força máxima aplicada à peça como a média da força de um homem da Força Aérea Brasileira e uma área transversal de 5,03 x 10^{-3} m², foi obtido uma tensão de 81,94 Mpa, correspondente ao caso crítico.

Visando garantir que o granito suportaria esforços adequados à sua resistência média à compressão – definida na Tabela 2 como sendo de 113,7 MPa, aplicou-se um coeficiente de segurança de 1,39 – determinado por meio da Equação 26.

Sabendo-se que a força normal é igual à força peso, estimou-se para o atrito entre o granito e o alumínio uma força de 411,879 N. Considerando-se o maior valor do coeficiente de atrito proporcionado pelo granito com superfície seca e sem polimento, foi adotado um coeficiente de atrito de 0,97 (Ribeiro, 2005). Com base na Equação 27, a força de atrito que o cavaco de alumínio irá sofrer foi estimada em 391,28 N.

Como se sabe, quando a força de atrito é maior que a força tangencial ocorre travamento do maquinário. A partir dos dados da força tangencial – determinada pela Equação 15, usando-se o maior braço de alavanca do disco – correspondente a 40 mm ver Figura 10, e o torque proporcionado pela máquina (28,84 N.m), a força de atrito foi estimada em 721 N, valor superior ao calculado. Desse modo, garantiu-se que a máquina não sofrerá travamento.

Considerando-se quatro parafusos para fixação do conjunto disco de metal – pino ao disco de granito e um distanciamento de 32 mm do centro (r), a força tangencial aplicada sobre os parafusos foi estimada por meio da Equação 30, resultando em 68,91 N. Considerando-se um parafuso M3x0,5, que possui 1,5 mm de raio, da Equação 31 obteve-se 9,75 MPa; portanto, valor muito inferior ao estimado para resistência ao escoamento.

Aplicando-se a Equação 33, o volume da câmara de moagem foi estimado em 536166,1 mm³. A partir das equações 34 e 35, os volumes de cada disco e o volume total de granito, foram respectivamente: V_{disco1} = 11268,13 mm³, V_{disco2} = 100480 mm³, V_{disco3} = 106858,1 mm³, $V_{granito}$ = 207338,1 mm³. Calculando-se o volume máximo da amostra pela Equação 36, tem-se que $V_{MÁX\ amostra}$ = 355827,9 mm³.

Na Figura 1, observam-se as dimensões das peças do dispositivo de moagem, obtidas a partir do uso do software CAD. No lado esquerdo da Fig. (10) observa-se a representação do conjunto pino – disco; ao centro, está representado o disco de granito e cilindro da câmara de moagem; à direita, representa-se o disco da base.

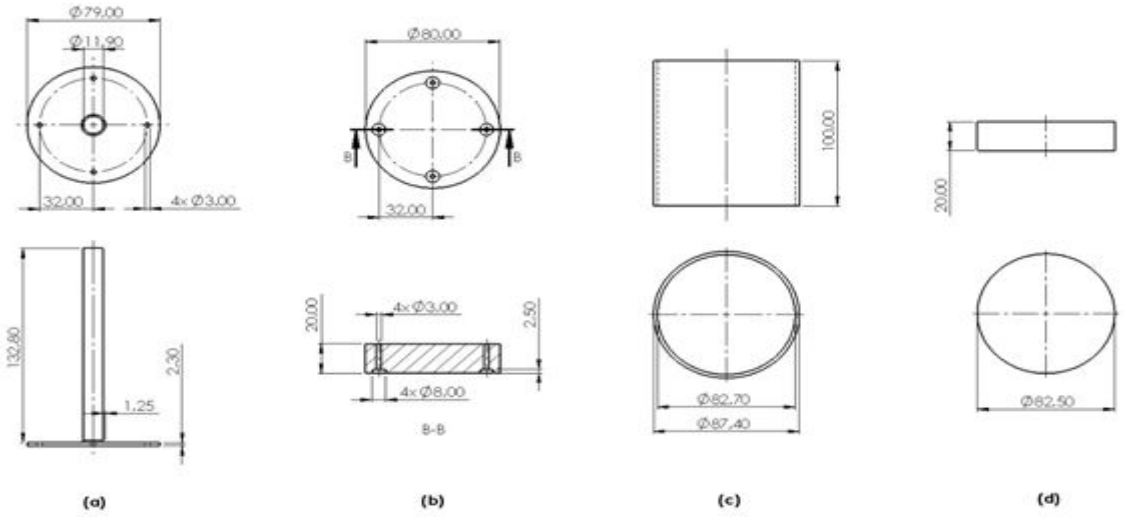

FIGURA 10. (a) Conjunto pino-disco, (b) Disco 2(granito), (c) Câmara de Moagem, (d) Disco 3(granito). Fonte: Própria (2020).

Na Figura 10 (a), é mostrado duas vistas do conjunto pino-disco, a vista superior para mostrar principalmente as medidas de diâmetro e a distância entre os furos, na vista frontal, podemos notar o comprimento total, além da espessura da garganta do cordão de solda. Na Figura 10 (b) pode-se notar uma vista do disco de granito que ficará fixado junto ao conjunto pino-disco, mostrando também a distância entre os furos e o diâmetro da peça de granito, além disso, uma vista em corte para facilitar a visualização de um rebaixo no furo, para que o parafuso entre completamente no disco.

Na Figura 11 observa-se a vista explodida do dispositivo em sua configuração final, de forma a guiar o processo de montagem e desmontagem do equipamento.

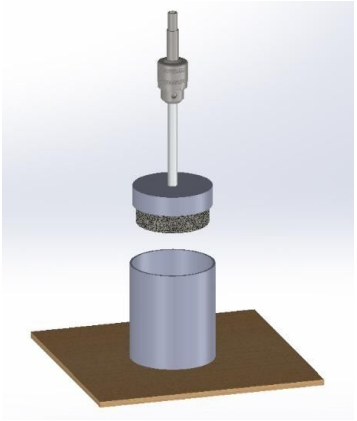

FIGURA 11. Montagem em vista explodida do dispositivo de moagem. Fonte: Própria (2020).

No processo de fabricação do moedor foi necessário a utilização de montagem por interferência do disco 3 com a câmara de moagem pois a dimensão da pedra estava ligeiramente maior do projetado, e com isso o encaixe com a peça teve que ser necessário o uso de um martelo para sua fixação.

Em relação aos furos realizados no de granito (disco 2), para o acoplamento junto ao conjunto pino-disco revelou-se dificuldade elevada necessitando o uso de furadeira de bancada, com o uso de uma broca para concreto de diâmetro 3mm em sua rotação mais baixa e sendo necessário o uso de água para o resfriamento da peça na sua furação para não ocorrer o risco de trincas e rachaduras no material, pois o mesmo é bastante frágil.

Na Figura 12 observam-se os elementos do dispositivo desenvolvido, o momento em que o dispositivo era acoplado ao mandril da furadeira de bancada, o resultado do processamento do cavaco de alumínio no dispositivo desenvolvido.



FIGURA 12. (a) Elementos do dispositivo de moagem, (b) Acoplagem do dispositivo de moagem à furadeira de bancada, (c) Resíduo de alumínio após o processamento, (d) Pó produzido. Fonte: Própria (2020).

Com 50 gramas de cavaco dentro da câmara de moagem, colocando-se a máquina para funcionar em rotação mínima, dentro de apenas 5 minutos, foi possível observar a formação de limalhas. Bastou-se 20 minutos de operação, para que as limalhas fossem transformadas em pó.

Foi observado através da experimentação, que o sistema se aquecia durante o funcionamento, de forma que foi necessário intervalos a cada 5 minutos.

Com peneiras de MESH 30, 50 e 100, obteve-se as granulometrias dos pós, sendo: 40 gramas de aproximadamente 0,595 mm, 5 gramas de aproximadamente 0,297 mm e apenas 1 gramas de aproximadamente 0,149 mm.

É importante destacar, que a granulometria obtida foi consideravelmente boa, em função da pequena quantidade de amostra testada, destacando-se ainda, que caso fosse realizado um maior tempo de operação, junto com uma maior amostra, os resultados da granulometria poderiam ter sido mais significantes.

4. CONCLUSÃO

Após a realização de cálculos atinentes à construção de um moedor de cavaco de alumínio, elaborou-se o projeto técnico assistido por computador e executou-se a construção do dispositivo, atingindo todos os objetivos do trabalho conforme planejado. Com base nos cálculos realizados, os componentes do dispositivo de moagem foram superdimensionados, garantindo segurança quando do uso prático. Graças aos cuidados no processamento, o disco de granito não sofreu trincas durante as furações ou rebaixos e conseguiu resistir ao atrito durante a moagem dos cavacos de alumínio. A solda do conjunto pino-disco mostrou-se eficiente, validando a escolha por essa opção para união das partes. Conforme previsto, os parafusos suportaram a força de cisalhamento ocasionada pelos discos de granito e de aço carbono. Com o dispositivo, foi possível obter pó de diferentes granulometrias, que ficaram nos intervalos de 30 a 100 de MESH. O dispositivo desenvolvido apresentou baixo custo operacional e aquisitivo, resultando em uma máquina ferramenta simples e compacta, capaz de cumprir sua função com eficiência e rapidez. A próxima etapa do trabalho constará de simulações estrutural, estática e térmica. Isso permitirá modificar o acionamento do motor por meio de automação do processo, permitindo a operação do dispositivo sem a necessidade de força humana.

REFERÊNCIAS

BARROS, Victor Hugo da Silva. Fabricação de peças complexas em chapas finas de Alumínio Comercialmente Puro usando o método de estampagem incremental. Trabalho de conclusão de Curso para Faculdade de Engenharia Mecânica-Universidade Federal de Uberlândia, p.22, 2019.

BRANCO, Pércio de Morais. Serviço geológico do Brasil: O intemperismo e a Erosão. 2014. Disponível em : <http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/O-Intemperismo-e-a-Erosao-1313.html>. Acesso em: 10 set.2020.

BUZINELLI, Didiane Victoria. Dimensionamento de Estruturas em Alumínio. Dissertação de Mestrado para Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, p34,2000.

CHIAVERINI, Vicente. Tecnologia Mecânica: Processos de fabricação e tratamento. Volume II, 2ª edição. Universidade de São Paulo, São Paulo,315p.,1986.

CRUZ, A. J. R. S. Elementos de Máquinas. Instituto Federal de Santa Catarina, Brasil, 27 p., 2008.

DANTE, Luiz Roberto. Matemática: contexto e aplicações. Volume 1,2 e 3. 2006.

HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. 3 ED. Rio de janeiro. 2000.

GALVÃO, M. F. Projeto estrutural de um foguete acadêmico a combustível sólido. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica (aeroespacial) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

Fagundes, J. G. F.; VENTRELLA, V. A.; GALLEGO, J. Reciclagem de Cavacos de Titânio para a Deposição de Revestimentos Duros por Soldagem. Artigo técnico, Soldagem & Inspeção The Development of Zonal Models for Turbulence. Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Vol.1, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 41-44, 1989.

MONTERRE, Construtora. Granito x Mármore. Conheça as diferenças entre as duas peças. 2017. Disponível em: < https://www.monterre.com.br/diferencas-entre-granito-e-marmore/>. Acesso em 10 set.2020.

NOGAMI, L. Investigação da influência das características petrográficas e da rugosidade de placas de granitos e mármore fixadas com argamassas. p 35. São Carlos, SP, 2013.

NORTON, R. L.; Projetos de Máquinas: Uma Abordagem Integrada. 2º Edição. Bookman, 2004.

SHIGLEY, J. E; BUDINAS, R. G; NISBETT, J. K. Elementos de Máquinas de Shigley. Porto Alegre: 8 ED. AMGH: 2011.

SOUZA, José Raelson Pereira. Efeito da sinterização e da moagem de alta energia na microestrutura e nas propriedades mecânicas em ligas de alumínio recicladas a partir de latas de bebidas. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 71p., 2017.

TEIXEIRA, M. D. M.; GOMES, D. A.; GONÇALVES, G. H.; SHIMANO, S. G. N.; SHIMANO. A. C.; FONSECA, M. C. R.;

WORKSHOP, ferramentas e acessórios. Furadeira de bancada Ferrari FG-13 1/3 CV Mandril 13mm bivolt 5 velocidades - AAF1010001 - Ferrari. 2020. Disponível em: <https://www.wkshop.com.br/Produto/Furadeira-de-bancada-Ferrari-FG-13-13-CV-Mandril-13mm-bivolt-5-velocidades---AAF1010001---Ferrari/2993>. Acesso em: 09 set. 2020.