



## APROVEITAMENTO DE CASCA DE OVO NA PREPARAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

**Rômulo Maziero (\*), Bruno Dorneles de Castro, Juan Carlos Campos Rubio**

\* Universidade Federal de Minas Gerais, maziero@ufmg.br.

### RESUMO

A manufatura de materiais compósitos tem sido fortemente associada ao objetivo de combater ou minimizar problemas ambientais, devido à possibilidade de reutilização de resíduos, contribuindo para o desenvolvimento sustentável de diversos setores industriais. Nesse contexto, os resíduos de cascas de ovos têm ganhado destaque como um material biodegradável e de baixo custo, com boa aplicação como reforço particulado de materiais compósitos. Este trabalho tem por objetivo apresentar uma revisão de literatura sobre o aproveitamento e a utilização da casca de ovo de galinha na preparação de novos materiais compósitos de matrizes poliméricas e metálicas. Os resultados indicaram que é crescente a busca por alternativas de novas tecnologias aplicadas à casca de ovo, sendo imprescindível a formulação e o estudo de variadas condições experimentais, que deve considerar fatores como a natureza e a proporção mássica das fases constituintes do material compósito e os tratamentos térmicos e químicos realizados nas cascas de ovos. A definição mais adequada dos parâmetros de fabricação possibilita melhores propriedades mecânicas, o que favorece a utilização desses materiais de caráter sustentável em aplicações de alta relevância no cenário mundial.

**PALAVRAS-CHAVE:** Casca de ovo, Compósitos, Resíduos sólidos.

### ABSTRACT

The manufacture of composite materials has been strongly associated with the objective of combating or minimizing environmental problems due to the possibility of reuse of waste, contributing to the sustainable development of several industrial sectors. In this context, eggshell residues have gained prominence as a biodegradable and low cost material, with good application as a particulate reinforcement of composite materials. This work aims to present a literature review on the use and the use of chicken eggshell in the preparation of new composite materials of polymeric and metallic matrices. The results indicated that the search for alternatives of new technologies applied to eggshell is increasing, being necessary the formulation and study of various experimental conditions, which should consider factors such as the nature and the mass proportion of the constituent phases of the composite material and the thermal and chemical treatments performed on eggshells. The more adequate definition of the manufacturing parameters allows better mechanical properties, which favors the use of these materials of a sustainable character in applications of high relevance in the world scenario.

**KEY WORDS:** Eggshell, Composites, Solid waste.

### INTRODUÇÃO

Os cinco maiores produtores e consumidores mundiais de ovos de galinha (China, União Europeia, Estados Unidos, Índia e Japão), em 2011, foram responsáveis por mais de 67% da produção e consumo mundial de ovos. A produção mundial de ovos representa aproximadamente 59,2 milhões de toneladas, tendo a China como maior produtora, com participação na produção mundial de 41,8% e consumo de 41,5%, destinando em torno de 90% da produção para o mercado interno. Em 2011, o Brasil foi o oitavo maior produtor do mundo de ovos para consumo, produzindo pouco mais de 1,8 milhão de toneladas. Em 2013, a produção nacional chegou a quase 1,9 milhão de toneladas. A produção brasileira de ovos para consumo cresceu, no período de 2003 a 2013, cerca de 3,3% ao ano (OLIVEIRA; BENELLI; AMANTE, 2013; AMARAL et al., 2016).

Levantamentos realizados pela Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA) mostram que a produção brasileira de ovos totalizou 39,1 bilhões de unidades em 2016, destinando 99,57% para o mercado interno (ABPA, 2017). Segundo o IBGE (2018), no Brasil foram produzidas 874,40 milhões de dúzias de ovos de galinha no 2º trimestre de 2018. Essa quantidade mostra um aumento de 2,0% com relação à produção do trimestre imediatamente anterior e foi 6,6% superior ao apurado no 2º trimestre de 2017. Para os segundos trimestres de 2017 e 2018, o estado de São Paulo se manteve como maior produtor de ovos dentre as Unidades da Federação, com 29,1% da produção nacional, seguido pelo Espírito Santo (9,5%), Minas Gerais (9,3%) e Paraná (8,7%).

Segundo Oliveira, Benelli e Amante (2013), são gerados aproximadamente 5,92 milhões de toneladas de resíduos de casca de ovo por ano em todo o mundo. O Brasil corresponde por aproximadamente 172.000 toneladas de resíduo em forma de casca por ano. Atualmente, existe uma enorme dificuldade no descarte final deste resíduo, onde geralmente é despejado em aterros. Este tipo de disposição resulta em altos custos para as empresas, além de causar problemas ambientais e de saúde pública. Neste contexto, como alternativa de redução dos impactos ambientais e na saúde pública causados pelo descarte desses resíduos, justifica-se o uso da casca do ovo como um resíduo biodegradável de baixo custo no reforço em matriz para compósitos (YASOTHAI; KAVITHAA, 2014; ANJALI et al., 2017). De acordo com a norma ASTM D3878-18 (2018), materiais compósitos são constituídos pela combinação de dois ou mais materiais de propriedades distintas com o objetivo de formar um terceiro material com propriedades combinadas. Esses materiais são extensamente utilizados na produção de elementos otimizados que necessitam de reduzida massa, como em componentes automotivos e aeronáuticos.

O uso de materiais residuais em compósitos poliméricos está em ascensão, principalmente devido às apreensões ambientais e econômicas. Resíduos de casca de ovo que consistem em cerca de 95% de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e 5% de materiais orgânicos, como polissacarídeos sulfatados, colágeno tipo X e outras proteínas, são conhecidos por serem um potencial risco ambiental. A casca do ovo representa cerca de 11% do peso total do ovo, a mesma tem sido intensamente estudada devido à capacidade de melhorar as propriedades mecânicas e promover a cristalinidade em polímeros. Além disso, a densidade específica é comparativamente menor do que o carbonato de cálcio mineral e, portanto, evita dificuldades durante a fabricação de materiais compósitos (OLIVEIRA; BENELLI; AMANTE, 2013; HIREMATH et al., 2018; VILLARREAL-LUCIO et al., 2018a).

## OBJETIVO

Este estudo teve como objetivo realizar um levantamento do estado da arte resultante de estudos sobre as potencialidades de aproveitamento e utilização de cascas de ovos, como reforço em matrizes poliméricas e metálicas para a produção de materiais compósitos.

## METODOLOGIA

O trabalho de caráter exploratório apresenta diversos resultados de pesquisas, enfatizando o potencial uso da casca de ovo como fase de enchimento em matrizes poliméricas e metálicas. As principais bases de dados utilizadas foram SciELO - *Scientific Electronic Library Online* e Periódicos Capes, com palavras-chave de entrada: Casca de ovo/*Eggshell*; Compósitos/*Composites*; Resíduos sólidos/*Solid waste*.

## RESULTADOS

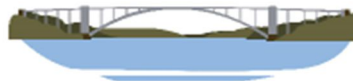
### Aproveitamento de casca de ovo: potencial de uso em materiais compósitos

A produção de ovos de galinha em um nível industrial generalizado levou à geração de uma grande quantidade de cascas de ovos. Estas cascas de ovos são consideradas resíduos biológicos que podem trazer prejuízos à saúde pública (ANJALI et al., 2017). No entanto, o aproveitamento de casca de ovo torna-se uma alternativa interessante na preparação de novos materiais úteis para a engenharia, devido ao elevado volume e às características do resíduo.

O uso de resíduos naturais é extensamente utilizado na indústria de polímeros como reforço na preparação de materiais compósitos. Segundo Venkatamuni, Devanathan e Christopherselvam (2016), materiais convencionais têm limitações em conseguir uma boa combinação de resistência, tenacidade e densidade. A fim de superar essa limitação, materiais compósitos são considerados como os materiais promissores de desenvolvimento recente nas indústrias automobilísticas. Por exemplo, conforme Senthil e Madan (2015), compósitos de casca de ovo têm potencial uso como agentes de reforço em materiais compósitos poliméricos devido aos principais benefícios, como boa resistência e rigidez, baixo custo e por ser um material ambientalmente amigável, degradável e renovável. Além disso, a casca de ovo atua como agente de nucleação e promove uma cristalização heterogênea na matriz polimérica (VILLARREAL-LUCIO et al., 2018a).

### Casca de ovo em matriz polimérica

O potencial uso da casca de ovo de galinha como material de enchimento em compósitos E-glass/epóxi foi estudado por Nayak et al. (2015). A casca de ovo foi tratada com solução de cloreto de sódio (NaCl) para remoção da membrana interna da parede do ovo. As cascas tratadas foram secas, pulverizadas e peneiradas até 150  $\mu\text{m}$ . Compósitos E-glass/epóxi com onze camadas de tecido de trama simples de 128  $\text{g m}^{-2}$  foram produzidos com 0%, 3% e 6% em massa, preenchidos com



casca de ovo pela técnica de laminação manual (*hand lay-up*). Ensaios de tração e impacto foram conduzidos de acordo com as normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Os resultados dos ensaios mostraram que a incorporação de enchimentos de casca de ovo resulta em menor resistência à tração, maior módulo de tensão; com 6,63 GPa, e resistência ao impacto; com 75,384 kJ m<sup>-2</sup>, com a inclusão de 6% em massa de casca (NAYAK et al., 2015). Outro estudo com casca de ovo em resina epóxi foi realizado por Jassim (2017). O mesmo avaliou a resistência ao impacto e a taxa de absorção de água de epóxi reforçado com pós de casca de ovo branco e marrom, com diferentes frações volumétricas (1%, 2%, 3%, 4% e 5%). A adição de 1% do pó branco aumentou a resistência máxima ao impacto e a resistência à água em comparação com o epóxi puro, bem como com o pó marrom na mesma porcentagem de adição.

Compósitos epóxi/pó de casca de ovo de galinha (ES) foram preparados por Hamdi e Habubi (2018). A difração de raios X (DRX) foi utilizada para estudar a microestrutura destes compósitos; os resultados mostraram que os compósitos, epóxi/3% ES e epóxi/4% ES, apresentaram estrutura cristalina. O epóxi com fração de 4% em volume de pó de casca de ovo apresentou bom resultado para o isolamento térmico em comparação com outras frações de volume (HAMDI; HABUBI, 2018).

Venkatamuni, Devanathan e Christopherselvam (2016) produziram compósitos de resina epóxi reforçada com vários percentuais em peso de fibra de coco e casca de ovo (ES) em pó para melhorar as propriedades mecânicas, tais como resistência à tração, resistência à compressão e dureza. Os ensaios foram conduzidos em corpos de prova preparados conforme o padrão ASTM. A partir dos resultados, verificou-se que o coco com casca de ovo em pó exibe uma resistência à tração de 16,49 MPa e resistência à compressão de 23,88 MPa. Isto ocorreu devido ao aumento da área superficial e da ligação interfacial das partículas na matriz. O material compósito elaborado apresentou uma resistência à tração razoável para a substituição de materiais poliméricos convencionais, como politetrafluoretileno (PTFE) e polipropileno (PP).

Hassan, Aigbodion e Patrick (2012) utilizaram partículas de casca de ovo carbonizadas e não carbonizadas como reforço na matriz de poliéster. Frações de 10% a 50% em massa de partículas de casca de ovo em intervalos de 10% foram adicionadas ao poliéster. As análises microestruturais dos compósitos particulados de poliéster/casca de ovo foram realizadas por MEV e EDS. As propriedades mecânicas e a densidade foram avaliadas por métodos padronizados. Os resultados mostraram que os valores de densidade e de dureza do composto aumentaram de forma constante com o aumento da adição de casca de ovo. A resistência à tração aumentou de 15,182 N mm<sup>-2</sup> a 0% em massa de casca de ovo a um máximo de 23,4 N mm<sup>-2</sup> a 40% em massa de casca de ovo não carbonizada; enquanto que aumentou para um máximo de 28,378 N mm<sup>-2</sup> a 20% em massa de casca de ovo carbonizada. A resistência à compressão aumentou constantemente de 90,3 N mm<sup>-2</sup> a 0% em massa de casca de ovo até um máximo de 103,6 N mm<sup>-2</sup> a 50% em massa de casca de ovo não carbonizada e 116,5 N mm<sup>-2</sup> a 50% de casca de ovo. O valor de dureza aumentou de 91 HRF a 0% de casca de ovo a um máximo de 120,05 HRF a 50% em massa de casca de ovo não carbonizada e 149,45 HRF a 50% de casca de ovo carbonizada. A resistência à flexão aumentou de 76,06 N mm<sup>-2</sup> a 0% em massa de casca de ovo a um máximo de 97,06 N mm<sup>-2</sup> a 40% de casca de ovo não carbonizada; no entanto, aumentou para um máximo de 106,66 N mm<sup>-2</sup> a 20% em massa de casca de ovo carbonizada. A energia de impacto também aumentou de 0,1 Joules a 0% de casca de ovo a um máximo de 0,35 Joules a 30% de casca de ovo não carbonizada; no entanto, aumentou para um máximo de 0,45 Joules a 20% em massa de casca de ovo carbonizada. O melhor efeito de fortalecimento da casca de ovo carbonizada pode ser atribuído à melhor ligação interfacial entre partículas carbonizadas e matriz de poliéster.

Novo pó de casca de ovo funcionalizado (NES) com superfície de nucleação efetiva para poli (L-lactídeo) (PLLA) foi desenvolvido por Li et al. (2016). De acordo com os autores, o pó de casca de ovo resultante foi introduzido na matriz de PLLA com teor de 5%-20% em massa. Após a adição de 20% de NES, o tempo médio de cristalização de um compósito de PLLA/NES reduziu de 27,09 para 0,69 minutos a 130 °C, comparado com o de PLLA puro. Os módulos de armazenamento e tração dos compósitos aumentaram com o acréscimo de NES. Mesmo com 20% de carga, o compósito ainda apresentou boas propriedades mecânicas como resistência à tração (53,4 MPa), módulo de tensão (2460 MPa) e alongamento na ruptura (2,5%), respectivamente. As taxas de cristalização foram aumentadas para os compósitos PLLA/NES em comparação com os compósitos sem a presença de pó de casca de ovo; no entanto, a estrutura cristalina e o mecanismo de cristalização do PLLA não foram alterados apesar da incorporação do NES. Ao mesmo tempo, T0%, T5% e T50% aumentaram em 24,7 °C, 19,3 °C e 13,5 °C, respectivamente. Os compósitos também exibiram janelas de processamento de fusão mais largas do que o PLLA puro. O NES mostrou bons efeitos de reforço na matriz do PLLA. Ambos os módulos de tração e armazenamento melhoraram com o aumento do conteúdo de NES. O resultado do trabalho mostrou que as taxas de degradação hidrolítica enzimática foram aumentadas nos compósitos PLLA/NES quando comparadas com PLLA puro. A degradação hidrolítica enzimática do PLLA puro e dos compósitos pode prosseguir por meio do mecanismo de erosão superficial. Tais biocompósitos de alto desempenho têm grande potencial em expandir a utilização de pó de casca de ovo a partir de recursos sustentáveis e aplicação prática como bioplástico com base em PLLA.



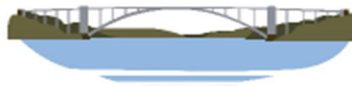
Kong et al. (2018) produziram compósitos biodegradáveis de poli (ácido láctico) (PLA) com 10% em peso de óleo de soja epoxidado (ESO) e diferentes quantidades de casca de ovo funcional (FES), com superfície modificada com fenilfosfonato de cálcio (PPCa). O comportamento mecânico e de cristalização foram estudados em termos da fração volumétrica da FES. O PLA plastificado pelo ESO mostrou uma excelente tenacidade à tração, com alongamento na ruptura aumentado em mais de 160% em comparação com 6% do PLA puro. O alongamento na ruptura para compósitos de PLA foi superior a 70%, mesmo preenchido com 30% em massa de FES. Além disso, os módulos de tração e armazenamento dos compósitos PLA/ESO/FES não sofreram deterioração significativa em comparação com o poli (ácido láctico) puro. Para o comportamento de cristalização a frio, FES com superfície modificada por PPCa melhorou a capacidade de nucleação do PLA.

Melhorias nas propriedades mecânicas do PLA pela adição de cargas de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) foram obtidas por Betancourt e Cree (2017). Esses autores confeccionaram compósitos de PLA via moldagem por injeção de calcário (LS) e pós de casca de ovo branqueada (WES) com granulometria de 63  $\mu\text{m}$  e 32  $\mu\text{m}$  em quantidades de 5%, 10% e 20% em massa. Propriedades mecânicas como resistência à tração, módulo de tensão e resistência ao impacto Charpy foram investigadas. Para ambos os tamanhos de partículas, a resistência à tração diminuiu à medida que o teor de carga aumentou, mas foi mais alto para uma carga de enchimento de 5% em massa. Em geral, os enchimentos de pó de 32  $\mu\text{m}$  apresentaram melhor resistência à tração do que os enchimentos de tamanho 63  $\mu\text{m}$ . O módulo de elasticidade aumentou com o conteúdo de enchimento e foi maior a 20% para ambos os tamanhos de partícula. Os compósitos LS/PLA tiveram melhor tenacidade do que os compostos WES/PLA. A morfologia das partículas e as superfícies fraturadas foram observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e observou-se partículas bem dispersas com superfícies fraturadas lisas. O comportamento de absorção de água dos compósitos de PLA/ $\text{CaCO}_3$  foi estudado por imersão em água destilada a temperatura ambiente por 56 dias. O PLA virgem absorveu a menor quantidade de água, enquanto a absorção de água dos compostos de  $\text{CaCO}_3$  foi uma função do tipo e conteúdo do pó.

O efeito de partículas de casca de ovo sobre as propriedades mecânicas de compósitos de quitosana reticulada/casca de ovo com epícloridrina foi avaliado por Rahmi, Marlina e Nisfayati (2017). O conteúdo de partículas de casca de ovo em cada compósito foi de 2,5% a 13,4%. A resistência à tração foi de 60% em comparação com o controle de quitosana. Os padrões de DRX exibiram a diminuição na intensidade do pico de quitosana devido à adição de epícloridrina como um agente de reticulação de quitosana e incorporação de partículas de casca de ovo a quitosana reticulada. A intensidade do pico aumentou devido à adição de partículas de casca de ovo. A distribuição de partículas de casca de ovo na microestrutura dos compósitos é o fator responsável pela melhoria da resistência à tração dos compósitos. A incorporação de partículas de casca de ovo em quitosana reticulada pode levar à produção de compósitos poliméricos de baixo custo (RAHMI; MARLINA; NISFAYATI, 2017).

Ayub et al. (2017) estudaram o efeito da adição de pó de casca de ovo sobre as propriedades físicas e mecânicas de compósito híbridos de borracha natural/polietileno de alta densidade/fibra de *mengkuang*/casca de ovo. A preparação do compósito utilizou o método de mistura por fusão, que foram misturados por 18 minutos a 135 °C e velocidade do rotor de 50 rpm. O compósito de NR:HDPE:MK/KT foi preparado com a relação 60:40:20. Os compósitos híbridos de casca de ovo/fibra de *mengkuang* foram produzidos com 5%, 10%, 15% e 20% em volume de fibra. As propriedades mecânicas dos compósitos foram investigadas usando ensaio de tração e impacto. A adição de pó de casca de ovo melhorou a resistência mecânica e física dos compósitos híbridos. A carga ótima de fibra foi identificada na formulação MK:KT (15:5) com a resistência à tração e módulo de tensão de 4,2 MPa e 144,7 MPa, respectivamente. O ensaio de absorção de água mostrou que os compósitos híbridos apresentam baixa absorção de água após a adição de pó de casca de ovo. A observação morfológica de compósitos híbridos apresentou uma boa dispersão do material de enchimento em comparação com compostos de enchimento individuais. O pó da casca de ovo preencheu os microporos entre a fibra e a matriz. Portanto, este estudo comprovou a adequação da adição de pó de casca de ovo como carga em compósitos híbridos.

O efeito do tamanho de partículas de casca de ovo nas propriedades térmicas e mecânicas e o uso de ácido esteárico (SA) como agente de acoplamento em matriz polipropileno foi investigado por Villarreal-Lucio et al. (2018a). Os autores verificaram que o tamanho das partículas e o ácido esteárico têm influência positiva na cristalinidade; quanto menor o tamanho de partícula e maior a quantidade de SA e  $\text{CaCO}_3$ , a cristalinidade é aumentada. A presença de carbonato de cálcio e ácido esteárico tem um efeito sobre o comportamento de degradação térmica, no entanto, foi necessário 20% de  $\text{CaCO}_3$  para aumentar 5 °C a temperatura de degradação do PP, para proporções menores essa propriedade não apresentou alterações significativas. Por outro lado, o agente de acoplamento e apenas 0,5% de ES aumentaram 800 MPa de módulo de armazenamento do polipropileno. Já os autores Villarreal-Lucio et al. (2018b) obtiveram compósitos de polipropileno com partículas e nanopartículas de casca de ovo. A casca de ovo afetou o comportamento de cristalização do PP. O ensaio de tração mostrou um aumento na tenacidade em compósitos e o processo de redução de tamanho das partículas e dos cristais aumentou a tenacidade da matriz PP.



Murugan et al. (2018) analisaram os efeitos da modificação química do pó de casca de ovo de galinha (ESP) pelo agente de acoplamento de silano nas propriedades de tração, morfológicas e térmicas de compósitos de polietileno de alta densidade/pó de casca de ovo de galinha (HDPE/ESP). As propriedades de tração e morfológicas de compósitos HDPE/ESP com e sem modificações químicas foram caracterizadas por ensaio de tração e microscopia eletrônica de varredura (MEV) sob diferentes cargas de ESP. A estabilidade térmica e a análise térmica dos compósitos foram realizadas por análises termogravimétrica (TGA) e calorimétrica diferencial de varredura (DSC). O resultado de DSC não mostrou diferenças significativas na temperatura de fusão e cristalização do HDPE com e sem modificação química da ESP. A resistência à tração e a estabilidade térmica dos compósitos HDPE/ESP foram melhoradas com a modificação do ESP pelo agente de acoplamento de silano. Os resultados de FTIR mostraram que o ESP foi modificado com sucesso e o componente do agente de acoplamento de silano estava presente na composição. Na presença de agente de acoplamento de silano, a interação interfacial e a adesão entre HDPE e ESP foram aumentadas.

Nik Yusuf et al. (2018) discutiram uma técnica para processamento de filme fino bio-polímero usando resíduos de cascas de banana e  $\text{CaCO}_3$  extraído de resíduos de casca de ovo. A análise de DRX confirmou que este filme fino de biocompósito mostrou padrão amorfo de casca de banana e a presença de cobre, lítio e silício contém pequeno número de cristalinidade de 29,1%. Além disso, também revelou que partículas de casca de ovo eram compostas principalmente de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) com alta porcentagem de cristalinidade (82,9%). A calcita é a forma termodinamicamente mais estável de  $\text{CaCO}_3$  à temperatura ambiente. Pode-se indicar que as características da casca do ovo; como a calcita comercial e a disponibilidade, torna-se a casca do ovo uma fonte potencial de enchimento para aplicações compósitas de baixo peso.

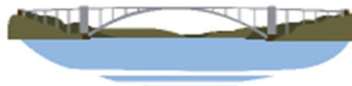
Por fim, como outra alternativa de uso da casca de ovo em compósitos, tem-se estudos de Aigbodion et al. (2018) que exploraram um reagente ecologicamente correto para o tratamento de fibras naturais utilizando solução em pó de casca de ovo para a produção de compósitos poliméricos. A fibra natural utilizada no trabalho foi a fibra de pedúnculo de banana. As fibras foram pré-tratadas com hidróxido de sódio (NaOH) e tratadas com solução em pó de casca de ovo (ES). A microestrutura, resistência à tração e absorção de água foram determinadas. A resistência máxima da fibra pré-tratada ( $99,844 \text{ N mm}^{-2}$ ) foi alcançada na concentração de 0,25M NaOH por 1 hora. O tratamento com ES reduziu a absorção de água para 2,6%, o que representa uma melhoria de 91,6% quando comparada com a fibra bruta (35,83%). Com base nos resultados obtidos no estudo, recomendou-se que o tratamento com 20% de ES em  $\text{H}_2\text{O}$  pode ser usado para tratar fibras na preparação de compósitos poliméricos.

### Casca de ovo em matriz metálica

Agunsoye et al. (2015a) prepararam compósitos de matriz metálica à base de alumínio, a partir de latas de alumínio recicladas e partículas de casca de ovo de 150  $\mu\text{m}$ . As propriedades mecânicas dos compósitos lata de alumínio/casca de ovo produzidos foram investigadas. As microestruturas dos compósitos foram examinadas após as superfícies da amostra terem sido preparadas e condicionadas com solução aquosa de 0,5  $\text{cm}^3$  de ácido nítrico. Micrografias revelaram que havia uma distribuição homogênea de partículas de casca de ovo dentro da matriz da lata de alumínio. A resistência ao desgaste também foi investigada sob diferentes cargas aplicadas (6 N a 14 N). Os resultados revelaram um aumento no módulo de elasticidade e tensão de elasticidade de 1.206,45 MPa e 50,23 MPa, respectivamente, da lata de alumínio fundido com 0% de partícula de casca de ovo no máximo de 3.258,87 MPa e 73,2 MPa de compósitos alumínio/12% casca de ovo. Os valores de dureza aumentaram de 66,23 VN para 75,13 VN. Houve um aumento na taxa de desgaste das amostras ensaiadas à medida que a carga aplicada aumentou. No entanto, a resistência ao desgaste da lata de alumínio/6% casca de ovo e alumínio/12% casca de ovo aumentou significativamente. Assim, a reciclagem de latas de alumínio e cascas de ovos pode ser aproveitada no desenvolvimento de materiais compósitos com matriz de metal.

Em estudos realizados por Agunsoye et al. (2015b), os mesmos utilizaram latas de alumínio recicladas com pós de casca de ovo de 215  $\mu\text{m}$  para produção de compósitos. O método de agitação foi usado para melhorar a mistura apropriada do material fundido composto antes do exercício de vazamento. O processo envolveu o aumento gradual de adição do pó da casca de ovo à lata de alumínio de 2% a 12%. O material fundido foi vertido para um molde de aço pré-aquecido para confecção de barras retangulares de 250 x 120 x 120 mm. As barras foram usadas para investigações de propriedades mecânicas e físicas. A morfologia dos pós de casca de ovo foi examinada com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura. Os resultados mostraram um aumento considerável na resistência à tração, no módulo de elasticidade e nos valores de dureza. O aumento é atribuível ao impedimento do movimento de deslocamento por pós de casca de ovo dentro da matriz da lata de alumínio. No entanto, houve uma diminuição notável na tensão de tração e na energia de impacto, respectivamente. Além disso, os compósitos desenvolvidos apresentaram densidade menor do que a amostra de controle sem adições de pó casca de ovo.

Shamim et al. (2017) analisaram ligas de Al-Si-Mg-Ti reforçadas com partículas de casca de ovo sintetizadas por processo de agitação. As microestruturas dos compósitos fabricados foram examinadas usando a técnica de metalografia em cores



e as propriedades mecânicas dos compósitos: comportamento elástico, resistência à tração e tenacidade à fratura foram investigadas. A microestrutura dos compósitos casca de ovo/Al revelou matriz de alumínio, fase intermetálica dura composta por  $Al_2Si$ ,  $Mg_2Si$ ,  $Al_3Ti$  e partículas dispersas de  $CaO$ . As fases intermetálicas encontradas segregaram ao longo dos braços interdendríticos. A adição de casca de ovo também resultou no refinamento de grãos de ligas de Al. A força de rendimento e a UTS mostraram tendências crescentes e decrescentes. No entanto, adições mais elevadas (> 1,5% em peso) aumentaram a força de rendimento e a UTS. O ponto de escoamento das ligas de Al tornou-se óbvio pela adição de partículas de casca de ovo.

Em estudo recente, Anjali et al. (2017) incorporaram partículas de casca de ovo (ESP) tanto em forma carbonizada (C) como não carbonizada (UC) na matriz de uma liga de alumínio-silício (Al-Si) para melhorar as propriedades mecânicas. Várias propriedades mecânicas dos compósitos resultantes, tais como resistência à tração, módulo de elasticidade, dureza, tenacidade, impacto e resistência à compressão, foram determinadas e aumentadas após a adição dos ESP, confirmando que a incorporação de resíduos ESP na matriz de Al-Si atuam como reforços. O aumento das propriedades mecânicas como a dureza (10,2% - UC, 19% - C), tração (6,61% - UC, 10,61% - C), resistência à compressão (9,12% - UC, 63,94% - C) e resistência ao impacto (30,07% - UC, 302,35% - C) foi mais pronunciado no caso de ESP carbonizados.

## CONCLUSÕES

As cascas de ovos são materiais que apresentam reduzido valor com elevado volume de estocagem. A utilização dos mesmos é restrita devido aos custos de coleta, secagem, processamento, armazenamento e transporte. Deste modo, grande parte desses resíduos é disponibilizada em aterros sanitários, resultando em problemas ambientais e de saúde pública. Uma alternativa para minimizar parte destes problemas conforme estudos mostram, está no aproveitamento da casca de ovo em misturas com matrizes poliméricas e metálicas, para melhorias nas propriedades físicas, químicas, mecânicas e térmicas de compósitos. Este novo conceito na concepção de produtos a partir de resíduos de fontes renováveis promove a incorporação da sustentabilidade em diversos segmentos industriais.

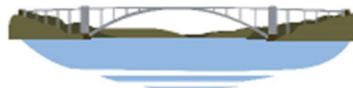
Portanto, apesar das opções de utilização das cascas de ovos como novos materiais úteis a engenharia, ainda existe a permanência das propriedades altamente poluidoras desse resíduo que, ao aproveitá-lo, evita-se a disposição em rios e lagos próximo as indústrias produtoras, no entanto, o fato das alternativas de tecnologia não reduzirem o potencial poluidor, mostra-se como oportunidade para estudos relacionados a este tema.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGMEC da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG pela estrutura física e pelo apoio. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agunsoye, J. O., Bello, S. A., Yekinni, A. A., Raheem, I. A., Idehenre, M. M., Idegbekwu, T. E., Oderinde, A. D. Potential of Recycled Aluminium Cans and 215  $\mu m$  Sized Eggshell Powder for Low Cost Metal Matrix Composites. **Journal of Metallurgical Engineering**, v. 4, p. 24-116, 2015b.
2. Aigbodion, V. S., Edokpia, R. O., Asuke, F., Eke, M. N. Development of Egg Shell Powder Solution as Ecofriendly Reagent: for Chemical Treatment of Natural Fibers for Polymer Composites Production. **Journal of Materials and Environmental Sciences**, v. 9, n. 2, p. 559-564, 2018.
3. Amaral, G. F., Guimarães, D. D., Nascimento, J. C. O. F., Custodio, S. **Avicultura de postura**: estrutura da cadeia produtiva, panorama do setor no Brasil e no mundo e o apoio do BNDES. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 43, p. 167-207, 2016.
4. American Society for Testing and Materials. **ASTM D3878-18**, Standard Terminology for Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2018. 6 p.
5. Anjali, R. M., Shivani Bhandari, A. P., Arpit Saxena, S., Nitin Kumar, N. C., Dheeraj Gunwant, P. L. S. Fabrication and Mechanical Testing of Egg Shell Particles Reinforced Al-Si Composites. **International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences**, v. 2, n. 1, p. 53-62, 2017.
6. Associação Brasileira de Proteína Animal. ABPA. **Relatório Anual da ABPA 2017**. 2017. 133 p.



7. Avella, M., Cosco, S., Di Lorenzo, M. L., Di Pace, E., Errico, M. E. Influence of CaCO<sub>3</sub> nanoparticles shape on thermal and crystallization behavior of isotactic polypropylene based nanocomposites. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 80, n. 1, p. 131-136, 2005.
8. Ayub, F. F. H., Mohamed, W. Z. W., Piah, M. R. M., Baharum, A. Mechanical and physical properties of natural rubber/high density polyethylene hybrid composites reinforced with mengkuang fiber and eggshell powder. **Journal of Polymer Science and Technology**, v. 2, n. 2, p. 62-66, 2017.
9. Betancourt, N. G., Cree, D. E. Mechanical Properties of Poly (lactic acid) Composites Reinforced with CaCO<sub>3</sub> Eggshell Based Fillers. **Soft Materials and Biomaterials**, v. 2, n. 47, p. 2545-2550, 2017.
10. Freire, M. N., Holanda, J. N. F. Characterization of avian eggshell waste aiming its use in a ceramic wall tile paste. **Cerâmica [online]**, v. 52, n. 324, p. 240-244, 2006.
11. Freire, M. N., Sousa, S. J. G., Holanda, J. N. F. Using eggshell in red wall tiles. **Waste and Resource Management**, v. 161, n. 1, p. 23-27, 2008.
12. Hamdi, W. J., Habubi, N. F. Preparation of epoxy chicken eggshell composite as thermal insulation. **Journal of the Australian Ceramic Society**, v. 54, n. 2, p. 231-235, 2018.
13. Hassan, S. B., Aigbodion, V. S., Patrick, S. N. Development of polyester/egg shell particulate composites. **Tribology in Industry**, v. 34, n. 4, p. 217-225, 2012.
14. Hiremath, P., Shettar, M., Shankar, M. C. G., Mohan, N. S. Investigation on Effect of Egg Shell Powder on Mechanical Properties of GFRP Composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 1, p. 3014-3018, 2018.
15. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE. **Indicadores IBGE**. Estatística da Produção Pecuária. 2018. 52 p.
16. Jassim, W. H. Preparation of the Epoxy/Chicken Eggshell Composites to use in Surfaces Coating. **Ibn AL- Haitham Journal For Pure and Applied Science**, v. 29, n. 1, p. 437-444, 2017.
17. Kong, J., Han, C., Yu, Y., Dong, L. Production and characterization of sustainable poly(lactic acid)/functionalized-eggshell composites plasticized by epoxidized soybean oil. **Journal of Materials Science**, v. 53, n. 20, p. 14386-14397, 2018.
18. Li, Y., Xin, S., Bian, Y., Xu, K., Han, C., Dong, L. The physical properties of poly(L-lactide) and functionalized eggshell powder composites. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 85, p. 63-73. 2016.
19. Murugan, S., Munusamy, Y., Muniandy, M., Ismail, H. Development of HDPE□modified eggshell composite. **Polymer Composites**, v. 39, n. 5, p. 1630-1637, 2018.
20. Nayak, S. Y., Heckadka, S. S., Sharma, P., Aman, I., Dey, S. **Use of egg shell particulate as fillers in e-glass/epoxy composites**. In: Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering and Industrial Automation. Dubai, 2015.
21. Nik Yusuf, N. A. A., Abdul Razab, M. K. A., Abdullah, N. H., Mohamed Noor, A., Yusoff, M., Ali, A., Mohd Kamal, N., Ameram, N., Nordin, M. N. Characterization of Bio-Polymer Composite Thin Film Based on Banana Peel and Egg Shell. **International Journal of Current Science, Engineering and Technology**, v. 1, n. 1, p. 546-550, 2018.
22. Oliveira, D. A., Benelli, P., Amante, E. R. A literature review on adding value to solid residues: egg shells. **Journal of Cleaner Production**, v. 46, n. 1, p. 42-47, 2013.
23. Rahmi, R., Marlina, M., Nisfayati, N. Effect of Eggshell on Mechanical Properties of Epichlorohydrin Crosslinked Chitosan/Eggshell Composites. **Oriental Journal of Chemistry**, v. 33, n. 1, p. 478-482, 2017.
24. Senthil, J., Madan, R. P. Preparation and Characterization of Reinforced Egg Shell Polymer Composites. **International Journal on Mechanical Engineering and Robotics**, v. 3, n. 3, p. 2321-5747, 2015.
25. Shamim, S., Singh, H., Sasikumar, C., Yadav, D. K. Microstructures and Mechanical Properties of Al-Si-Mg-Ti/Egg Shell Particulate Composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 2, p. 2887-2892, 2017.
26. Venkatamuni, T., Devanathan, R., Christopherselvam, D. Effect of Eggshell Composite Material for the Replacement of Conventional Material. **International Journal of Innovative Research and Advanced Studies**, v. 3, n. 12, p. 44-48, 2016.
27. Villarreal-Lucio, D. S., Rivera-Armenta, J. L., Martínez-Hernández, A. L., Estrada-Moreno, I. A. Effect of eggshell particle size in thermal and thermomechanical properties of pp/eggshell composites. **International Journal of Engineering Sciences and Research Technology**, v. 7, n. 4, p. 82-88, 2018a.
28. Villarreal-Lucio, D. S., Rivera-Armenta, J. L., Martínez-Hernández, A. L., Zednik, R., Estrada-Moreno, I. A. Effect of nano CaCO<sub>3</sub> particles from eggshell on mechanical and thermal properties in pp/eggshell composites. **Journal of Engineering Technology**, v. 6, n. 2, p. 456-468, 2018b.
29. Yasothai, R., Kavithaa, N. V. Eggshell waste is a calcium source for layers: Review. **International Journal of Science, Environment and Technology**, v. 3, n. 4, p. 1465-1471, 2014.
30. Zhang, Q. X., Yu, Z. Z., Xie, X. L., Mai, Y. W. Crystallization and impact energy of polypropylene/CaCO<sub>3</sub> nanocomposites with nonionic modifier. **Polymer**, v. 45, n. 17, p. 5985-5994, 2004.
31. Zhang, Z., Wang, C., Meng, Y., Mai, K. Synergistic effects of toughening of nano-CaCO<sub>3</sub> and toughness of β-polypropylene. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, n. 1, p. 189-197, 2012.