

A evolução das técnicas de fabricação e sua importância para o Design

The evolution of manufacturing techniques and their importance for design

SILVA JUNIOR, Orlando G.; Mestre; Universidade do Estado de Minas Gerais

gama.orlando@gmail.com

RIBEIRO, Rita A. C.; Doutora; Universidade do Estado de Minas Gerais

rita.ribeiro@uemg.br

HORTA, Anderson A.; Doutor; Universidade do Estado de Minas Gerais

andersonhorta@gmail.com

A busca por melhorias na qualidade de vida faz parte da rotina do homem desde o momento que este começa a conviver em grupos sociais e sua trajetória histórica é marcada por eventos onde ficam evidentes saltos de evolução quando um processo de fabricação se atrela a uma nova tecnologia. Pretende-se com esta pesquisa apresentar o desenvolvimento dos processos de fabricação para o aprimoramento do design de produtos a partir do momento em que o homem domina uma nova força tecnológica, permitindo o avanço da sociedade para chegarmos a processos contemporâneos de fabricação de eletrofiação e eletropulverização, aqui utilizados para construção de estruturas biocompatíveis. Os resultados mostraram que os parâmetros utilizados no equipamento e a concentração das soluções permitiram desenvolver fibras de Policaprolactona (PCL) com o diâmetro médio de $1,2 \mu\text{m} \pm 0,6$ e partículas de gelatina com diâmetro médio de $0,9 \mu\text{m} \pm 0,2$.

Palavras-chave: Design; Eletrofiação; Biomateriais.

The search for a better quality of life is part of man's routine from the moment he begins to live in social groups, and his historical trajectory is marked by events where leaps of evolution are evident when a manufacturing process is linked to a new technology. The aim of this research is to present the development of manufacturing processes for the improvement of product design from the moment that man dominates a new technological force, allowing the advancement of society to reach contemporary manufacturing processes of electrospinning and electrospraying used in this research to build biocompatible structures. The results showed that the parameters used in the equipment and the concentration of the solutions allowed the development of Polycaprolactone (PCL) fibers with an average diameter of $1.2 \mu\text{m} \pm 0.6$ and gelatin particles with an average diameter of $0.9 \mu\text{m} \pm 0.2$.

Keywords: Design; Electrospraying; Biomaterials.

1 Processos de fabricação e sua influência na sociedade

A possibilidade e a capacidade de transformar tudo que o rodeia, representa para o homem o poder e domínio sobre a natureza e uma forma de evidenciar seu posto no topo de uma cadeia hierárquica dos seres vivos. A ação de aplicar energia e modificar uma matéria prima para

atender a necessidades específicas se tornou presente na humanidade, a partir do momento em que os ancestrais do homem contemporâneo desenvolveram habilidades em manipular os materiais que os rodeavam, onde, a percepção sobre o potencial para utilização se deu por caráter experimental, aplicando energia mecânica dos seus braços para criar atrito sobre as superfícies dos materiais afim de remover porções não desejadas, buscando obter formas pontiagudas e com arestas cortantes destinadas a defesa e a caça, sendo esse o primeiro processo de fabricação realizados na história da humanidade.

Vamos a um exemplo: a alavanca é uma máquina simples. Seu design imita o braço humano, trata-se de um braço artificial. Sua técnica é tão antiga quanto a espécie *Homo Sapiens*, talvez até mais. E o objetivo dessa máquina, desse design, dessa arte, dessa, técnica, é enganar a gravidade, trapacear as leis da natureza e, ardilosamente, liberar-nos de nossas condições naturais por meio da exploração estratégica de uma lei natural. (FLUSSER, 2007, pág.184.)

Em uma abordagem histórica, é possível observar uma mudança de comportamento no homem em sociedade sempre que é apresentado a novas tecnologias. A partir do momento que o *Homo habilis* começa a utilizar o polegar opositor, é apresentada a possibilidade de manusear artefatos que permitiram amplificar suas perspectivas de sobrevivência, onde as ferramentas desenvolvidas possibilitaram o seu agrupamento social, consequentemente, dando início a novas necessidades a esse grupo, porém suas ações eram limitadas às tecnologias de transformação conhecidas, somente após o fogo ser utilizado como fonte de energia, foi possível aprimorar os processos existentes.

A partir do domínio do fogo, o *homo erectus* atribuiu um novo significado a esse elemento, compartilhando-o com sua tribo, essa nova fonte de energia que possibilitou o desenvolvimento do grupo. Segundo a abordagem de Harari (2018), com o processo de domesticação do fogo os humanos passaram a ter controle de uma força obediente e ilimitada, podendo explorá-la para inúmeras tarefas, pois, a partir desse momento a forma de manipular os alimentos e os sistemas de proteção passaram por uma mudança, o que permitiu ao grupo que tinha domínio sobre esse elemento da natureza, explorar de forma profunda as possibilidades dentro do ambiente em que habitavam, além de corroborar para o domínio de outros recursos naturais.

Segundo os estudos de Harari (2018) onde é apresentado que o processo de domesticar o fogo foi um ponto de partida sobre as próximas etapas evolutivas, sendo esse um passo importante no desenvolvimento do *Homo sapiens sapiens*, pois, com o controle sobre a fonte de energia, foi possível estabelecer o domínio sobre a tecnologia de fabricação de materiais metálicos, o que possibilitou a fabricação de ferramentas que auxiliaram na construção de moradias, plantio de vegetais, além de instrumentos de defesa, como as lâminas e pontas de flechas, mais resistentes e eficazes que as construídas pelos seus antepassados.

A utilização do processo de fundição de materiais metálicos pelo *Homo sapiens sapiens*, se deu a partir do processo de observação sobre o comportamento do metal ao ser submetido a uma fonte de aquecimento e a partir desse ponto, essa técnica foi aplicada amplamente como alternativa para o processo de conformação a frio aplicado sobre o cobre, o primeiro metal a ser manipulado, possibilitando a produção de artefatos de caça, trabalho e defesa (SAMPAIO; BETTENCOURT, 2011).

O uso das novas técnicas de transformação foi difundido e aprimorado conforme a informação era transmitida. Todos os artefatos produzidos através do processo de fundição foram encontrados em diversas regiões, um fato que Diamond (2005) associa a possibilidade de expandir o território a partir das ferramentas de trabalho e defesa, porém, essa tecnologia que

permitia a manipulação do metal foi identificada em outras tribos, podendo ser considerada uma disseminação tecnológica para as organizações sociais da época.

O domínio sobre a fundição de materiais metálicos possibilitou ao *Homo sapiens sapiens* uma abordagem mais abrangente a respeito do campo da forma e função sobre os objetos que desenvolviam, conforme identificado nos estudos de Uhlig *et al.* (2019), que identificaram nas escavações realizadas no Valle Tollense, localizada na região nordeste da Alemanha, onde é possível identificar peças desenvolvidas pelo método de conformação a frio, onde chapas de bronze foram conformadas com aplicação de energia mecânica e apresentando furos nas extremidades, o que os pesquisadores classificaram como sendo um bracelete (FIGURA 1).

Figura 1 – Peças em cobre por processamento a frio



Fonte: Uhlig *et al.* (2019).

Dentre os artefatos encontrados foram identificadas peças produzidas pelo método de fundição, permitindo confirmar a evidência da metalurgia como método de transformação, porém um fator que pode ser identificado pela ótica do Design, é como o processo por fundição foi responsável pelos primeiros elementos onde foram atribuídas questões que mais tarde seriam a base para cunhar um termo estudado por Louis Henry Sullivan e apresentado ao mundo em seu estudo *The Tall Office Building Artistically Considered* (1896), que influenciado pela teoria de evolução e transformação das espécies, aponta que assim como ocorre na natureza a forma segue uma função. Os artefatos encontrados no Valle Tollense permitiram identificar que a presença de um novo método de transformação possibilitou o desenvolvimento de ferramentas precisas destinadas a executar funções de maneira mais rápida e eficiente, como os furadores destinados a metalurgia e as facas de lâmina curva destinadas a caça (FIGURA 2), deixando evidente a relação das técnicas de transformação com o desenvolvimento tecnológico de uma sociedade (UHLIG *et al.*, 2019).

Figura 2 – Ferramentas em cobre produzidas por fundição



Fonte: Uhlig *et al.* (2019).

A análise sobre a forma aplicada aos artefatos produzidos por fundição na Idade do Cobre, permite identificar o desenvolvimento da capacidade analítica sobre as formas que eram presentes em seu cotidiano e reproduzir com o novo processo. Nesse momento inicial podem ser utilizados os estudos de Erlhoff e Marshall (2007) onde abordam o Design Funcionalista, como base para compreender o processo utilizado para desenvolver as ferramentas, uma vez que é observada a ausência de elementos decorativos, pois a sua construção é realizada apenas para uso prático para solucionar os problemas do cotidiano.

Realizando uma análise sobre a perspectiva de Löbach (2001), é possível observar que há a presença de características além das fisiológicas, sendo essas facilmente identificadas nos artefatos datados da Idade do Bronze devido às limitações físicas e tecnológicas nos processos tanto de conformação a frio quanto a fundição, dessa forma eram aplicados na maioria das vezes para produção de itens com funções práticas. As funções estéticas são atribuídas e utilizadas em produtos para proporcionar experiências sensoriais, e essas por sua vez são baseadas em dois fatores, as experiências estéticas anteriores como forma, cor e superfície e a consciência dessas características, esses elementos são identificados exercendo influência direta sobre os processos existentes, uma vez que as experiências anteriores na caça e na metalurgia levaram o *Homo sapiens sapiens* a definir qual melhor forma se adequaria para a função especificada, principalmente na fundição onde é necessária a presença de uma estrutura que molde o metal fluido para se obter a forma final, sendo necessário ter a consciência sobre o que se deseja no produto final.

As capacidades perceptivas e analíticas possibilitaram a associação de elementos com funções claras identificados na natureza. Observando os animais que utilizam suas presas para perfurar os alimentos, o *Homo habilis* passou a utilizar as presas dos animais mortos como ferramenta de perfuração em instrumentos de madeira ou couro, porém, ao entrar na Idade do Bronze, as presas não seriam tão eficientes para a perfuração de materiais metálicos, mas a simbologia das presas não seria desassociada da função de perfuração, o que pode ser observado nas ferramentas fundidas, onde uma das extremidades apresenta estrutura pontiaguda relacionada às ferramentas utilizadas por seus antepassados, permitindo identificar funções simbólicas nos artefatos da Idade do Bronze obtidos pelo processo de fundição (LÖBACH, 2001; UHLIG *et al.*, 2019).

Com o avanço da era dos metais, o processo de fundição foi se aperfeiçoando, permitindo o trabalho de ligas metálicas, marcando a Idade do Bronze, onde o estanho foi adicionado a fundição de cobre para atribuir propriedades de anticorrosivas proporcionando maior durabilidade e resistência mecânica aos artefatos e possibilitando o emprego dessa liga metálica para fins de guerra. Com a escassez do estanho que ocorreu entre o século XII e X a.C., o ferro foi utilizado como substituto na confecção de armas, porém o aperfeiçoamento do processo de fundição é identificado por volta de 1500 a.C., onde foram encontrados indícios do ferro manipulado por comunidades da Ásia Menor, porém apresentando um lento processo de propagação, devido à dificuldade no aprendizado nas técnicas de manipulação das ligas de ferro (OLIVEIRA; SADE, 2016).

Quando o homem entra na Idade do Ferro, o processo de fundição foi aperfeiçoado para atingir temperaturas em torno de 1500°C, necessárias para fundir o ferro. Com as forjas possibilitando a produção de ferramentas projetadas para executar funções específicas, outras manufaturas foram se aperfeiçoando e ganhando notoriedade, como os processos de transformação em madeira, onde foi possível desenvolver ferramentas para entalhes mais precisos e acelerando etapas de fabricação, assim como para a produção mais eficiente de artefatos cerâmicos. Esse reflexo pode ser observado no período que compreende as guerras Púnicas, entre 264 a 146 a.C. entre Roma e Cartago, onde a possibilidade de reproduzir de maneira rápida e precisa as

embarcações cartaginesas, permitiu aos romanos a produção de uma frota que superasse a de seu oponente (MAGNOLI, 2010). Na idade média a fundição fazia parte de todo arranjo social, de acordo com os estudos de Duarte (2015), que onde existisse um núcleo populacional, estaria presente também a figura do ferreiro, e consequentemente a presença de uma forja, identificada como símbolo de prosperidade para aquela população, pois realizava a produção de bens necessários a comunidade.

Conforme a sociedade caminha em uma jornada rumo ao período renascentista é observado que o domínio sobre os processos de fabricação também se atrelava ao poder que o território detinha, pois, os artífices que dominam principalmente as artes da metalurgia e marcenaria se destacavam em disputas militares das conquistas territoriais, principalmente no continente europeu, onde pode ser ressaltada a atuação de Leonardo da Vinci, que se tornou a referência renascentista sobre o domínio de novos processos, chegando a ser referenciado pela família Médici como sendo a única pessoa a conseguir manipular ferro fundido em grande escala, devido a sua atuação em construir a Ghibelina, um famoso canhão de guerra que fabricou para Frederico da Montefeltro, após conecer a aperfeiçoar o método utilizado na fundição militar de Ludovico, o mouro. Entre os diversos trabalhos desenvolvidos por da Vinci, é notável a presença de agentes inovadores aplicados para melhoria dos processos, a fim de atender as necessidades de forma e função das suas invenções, possibilitando avaliar a sua conduta como precursora das modernidades científicas aplicadas às revoluções industriais (BOUCHERON; GIORGIONE, 2014).

Entre o final do século XV e meados do XVIII, o processo de fundição e conformação a frio não eram os únicos aplicados aos materiais metálicos, era possível alterar de maneira limitada a estrutura fundida de ferro, dando início aos primeiros processos de usinagem, que podem ser definidos como um conjunto de ações que promovem a remoção de porções de material, denominadas de cavacos, de uma estrutura mais robusta, a fim de atribuir uma forma final, um processo que usa dos mesmos princípios utilizado pelo *Homo habilis* para dar forma as rochas (MACHADO *et al.*, 2015).

Conforme as necessidades da sociedade se tornavam mais evidentes com o surgimento das classes, os meios de produção artesanais se mostravam cada vez mais falhos em atender as exigências impostas por esse novo grupo consumidor. Dessa forma, foi identificada por grupos investidores, a possibilidade de absorver para o interior de grandes estruturas metálicas, conhecimentos e técnicas de produções que antes eram dominados por grupos familiares e passados através das gerações, com isso, a fonte de energia dominada pelo *Homo erectus*, passa a ser o agente fundamental nessa nova etapa da história da humanidade, que busca automatizar e padronizar processos, gerando uma revolução no modo de transformar as matérias primas (FORTY, 2007).

Com a Revolução Industrial os processos de usinagem foram aprimorados, em virtude das tecnologias atribuídas ao processo de fundição, permitindo manipular os elementos adicionados ao ferro carbono para produzir as ligas de aço aplicadas em ferramentas de corte. A produção de ferramentas mais resistentes e o início da indústria a vapor, no século XVIII, impulsionaram o desenvolvimento das Máquinas Ferramentas, responsáveis pela confecção de produtos metálicos com maior precisão, rapidez e maior flexibilidade no processo. Essa mudança no processo de manufatura permitiu aos então projetistas industriais, uma maior liberdade na concepção de novos produtos e aprimorar os sistemas mecânicos existentes. No final do século XIX, as máquinas operatrizes responsáveis pelos processos de usinagem já eram equipamentos essenciais na indústria de transformação (MACHADO *et al.*, 2015).

Com o aprimoramento dos processos, a fonte de energia utilizada até o momento para manter os equipamentos em funcionamento estava sendo cada vez mais exigida, e com a expansão territorial das grandes empresas, o movimento migratório para as cidades que sediavam as corporações cresceu proporcionalmente (FORTY, 2007). Com o avanço nos estudos relacionados a estabilização de energia elétrica para utilização em grande escala, a partir dos experimentos iniciais, Michael Faraday desenvolveu o primeiro equipamento capaz de converter energia mecânica em energia elétrica, um dínamo, a partir da construção de um campo magnético formado por imãs, e posteriormente a descoberta da corrente alternada, permitindo convertê-la de alta para baixa tensão, possibilitando transportar energia a longa distância (ASSIS, 2018).

Os avanços tecnológicos relacionados ao desenvolvimento e aprimoramento da fonte de energia possibilitaram sua venda a população, sendo inicialmente demandada para iluminação pública, prédios públicos e comerciais, porém uma crescente busca para residências chamou a atenção da indústria, que observou nesse comportamento da sociedade a possibilidade de inserir produtos movidos a eletricidade, porém, seus processos de fabricação apresentavam caráter artesanal devido à baixa demanda dos consumidores e a utilização de matéria prima que pudesse ser aplicada na construção de equipamentos elétricos, uma vez que os materiais metálicos possuem a capacidade de conduzir calor e eletricidade, conforme definido pela Lei de Wiedemann-Franz, onde é estabelecido que a razão entre a condutividade elétrica é proporcional a condutividade térmica de metais, dessa forma, os únicos processos aplicados na confecção desses produtos eram voltados a manufatura em madeira para não superaquecer os produtos (MEADEN, 2013; FORTY, 2007).

Com a entrada no século XX, a estabilização da energia elétrica e o aumento no consumo de itens como cafeteiras e torradeiras elétricas movimentaram a indústria e a economia, além de ampliar o campo de aplicação dos polímeros, uma nova classe de materiais desenvolvidos sinteticamente e que não apresentavam propriedades de condutividade elétrica, se tornando um substituto para a madeira e o metal utilizado na estrutura dos produtos. A utilização dos materiais poliméricos só se tornou viável, a partir da aplicação da energia elétrica como combustível para o aquecimento controlado das resistências térmicas, na faixa de temperatura necessária para movimentar a estrutura química dos materiais, para transitarem do estado sólido para um com maior fluidez permitindo serem processados de acordo com a necessidade dos produtos, apresentando uma base de processo que remete a fundição utilizada na Idade do Bronze, porém, a ações manuais passaram a ser mecanizadas em processos contínuos, as alavancas foram substituídas por botões de acionamento e os circuitos elétricos permitiram a implantação de telas de controle, uma vez que a tecnologia permitiu a junção de componentes computacionais aos equipamentos mecânicos (SCHUMMER, 2003; FORTY, 2007).

Os processos de conformação polimérica contribuíram para apresentar as indústrias, principalmente em um período pós Segunda Guerra Mundial, novas necessidades que os consumidores passaram a vivenciar, a partir do momento em que estavam sendo apresentados a ampla concorrência de marcas, tornando necessário o investimento no desenvolvimento de produtos, para obterem destaque perante os concorrentes, uma vez que os novos processos de transformação permitiam manipular formas de uma maneira até o momento impossível para os materiais antes utilizados, o que refletiu nas indústrias com o aumento dos parques de produção e o desenvolvimento de equipamentos capazes de processar um volume cada vez maior de material polimérico, ocasionando em um movimento de sobrecarga no volume produtivo, presente em diversos segmentos da indústria.

Essa sobrecarga nos processos industriais levou as indústrias a buscaram auxílio em ferramentas tecnológicas, e dessa forma foi iniciado o desenvolvimento de comandos numéricos computadorizados (CNC) que utiliza os eixos cartesianos para determinar coordenadas de

construção (MINHAT, 2013). Inicialmente as coordenadas foram utilizadas para construção de gráficos que auxiliavam a interpretação mais rápida dos dados de produção, porém, os desenvolvedores da ferramenta observaram a potencialidade para direcionar na aplicação como ferramenta gráfica, podendo substituir o processo de construção de desenhos em prancheta, se tornando a primeira ferramenta de CAD (*Computer Aided Design*). O desenvolvimento das ferramentas de CAD possibilitou o surgimento de um novo método de processamento, onde os comandos computadorizados foram atrelados ao sistema de fundição de materiais poliméricos, dessa forma, o material fundido é orientado via CNC para ser depositado sobre uma plataforma a partir de um modelo computadorizado em três dimensões (MINHAT, 2013; RAMESH *et al.*, 2013).

A deposição do material fundido permite a impressão tridimensional de objetos, que possibilita a materialização de modelos gráficos, o que trouxe uma nova perspectiva na confecção de produtos, sendo estendida para aplicação com materiais cimentícios e metálicos. O processo de impressão 3D também é utilizado para a manipulação de biomateriais ou soluções biológicas destinados a construção de tecidos cartilaginosos que possibilitam uma nova perspectiva para recuperação médica. Um segmento presente que utiliza da impressão com biomateriais, é a produção de estruturas para proliferação celular constituídas por fibras e partículas em escala nanométrica através dos processos de eletrofiação e eletropulverização, técnicas que utilizam de tensões elétricas para promover o processo de polimerização e depositando as estruturas (REN *et al.*, 2014).

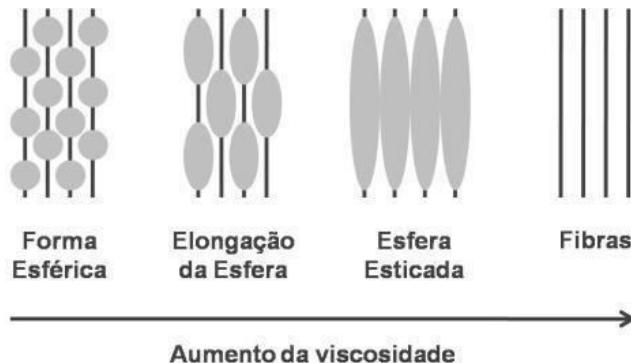
Observando os processos de fabricação disponíveis para a manufatura de objetos, é possível identificar as características primordiais utilizadas pelos seus antepassados, a matéria prima e uma fonte de energia para transformar o material, dessa forma, os hominídeos que começaram utilizando energia mecânica para a transformação de rocha, nos dias atuais a energia elétrica é utilizada para promover aquecimento e aplicar esforços nos processos atuais que foram aprimorados a partir do surgimento de novos materiais e novas necessidades apresentadas pela sociedade.

2 Eletrofiação e Eletropulverização como processos contemporâneos

Os surgimentos de novos processos de fabricação permitem que aplicações antes impossibilitadas por barreiras tecnológicas se tornem reais. Esse fato ocorre com a eletrofiação (*Electrospinning*), um processo que vem sendo utilizado desde 1980 e possibilita a produção de materiais poliméricos na forma de fibras com diâmetros submicrométricos com o auxílio de forças eletrostáticas. É uma técnica que possibilita a produção de partículas e fibras, que podem apresentar uma estrutura sólida ou com uma região interna vazia em escala nanométrica e micrométrica.

Para a produção de fibras por eletrofiação é importante observar a concentração polimérica e viscosidade, devendo a solução possuir uma concentração mínima ao ser eletrofiada para permitir o emaranhamento adequado das cadeias poliméricas e viscosidade suficiente para a formação do jato polimérico. Uma das variações do processo de eletrofiação reside no controle tanto da concentração da solução e de sua viscosidade baixa concentração polímero e viscosidade da solução, a aplicação da voltagem resulta na técnica conhecida como eletropulverização, onde há a formação de partículas, uma reação explicada pela instabilidade Rayleigh, quando ocorre a quebra da gota no capilar. Quando a solução apresenta uma concentração elevada, e a solução muito viscosa, não haverá formação do jato contínuo na eletrofiação que resulta em fibras. A relação entre viscosidade e resultado da eletrofiação pode ser observada na Figura 3. (HAIDER *et al.*, 2015; ERENCIA *et al.*, 2015).

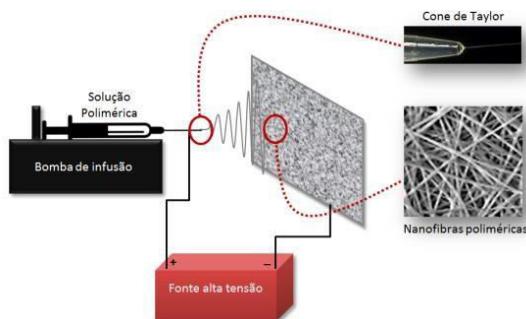
Figura 3 – Esquema da morfologia das nanofibras com variação da viscosidade



Fonte: Adaptado de Haider *et al.* (2015)

Para esse processo uma solução polimérica deve ser depositada em uma seringa com agulha, que será posicionada em uma bomba de infusão com acionador do equipamento de eletrofiação, um condutor de tensão positiva deve ser conectado a agulha e a tensão negativa conectada ao coletor (FIGURA 4), no momento que as forças elétricas se equilibram com a tensão superficial entre polímero e solvente é iniciada a formação do cone de Taylor, onde o formato da gota se torna aproximadamente cônico (MENEZES, 2017; DAMODARAM *et al.*, 2015; GAMA, 2014).

Figura 4 – Representação do processo de eletrofiação



Fonte: Menezes (2017)

A utilização da técnica de eletrofiação para a produção de nanofibras vem sendo investigada nos últimos anos, com o intuito de simular a matriz extracelular (ECM) em forma de fibras em escala nanométrica (MENEZES, 2017). Fibras de hidroxiapatita/gelatina foram eletrofiadas com sucesso utilizando solvente orgânico 1,1,1,3,3-hexafluor-2-propanol (HFIP) por Kim *et al.* (2005). Fibras de gelatina também foram obtidas por Choktaweesap *et al.* (2007), em seu estudo dos efeitos causados pelos solventes na eletrofiação do material, onde foi verificado a influência de diversos solventes polares, como 2,2,2-trifluoretanol, ácido acético glacial, e blendas com outros solventes no processo de eletrofiação.

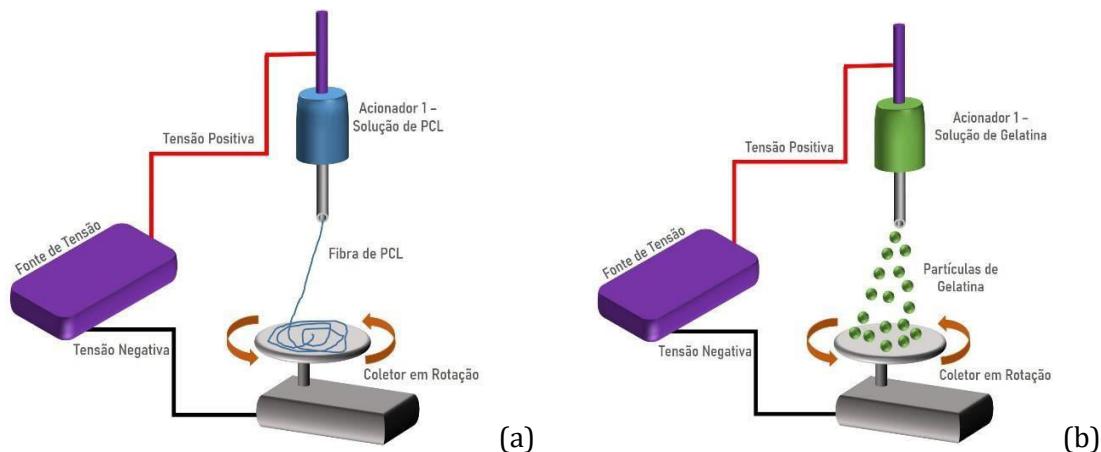
Na literatura foram encontradas referências a pesquisas envolvendo soluções de PCL e gelatina sendo utilizadas em técnicas de eletrofiação e eletropulverização de forma isoladas, ou até mesmo juntas como no caso da técnica de eletrofiação coaxial. A utilização das técnicas de forma concomitante foi identificada nos estudos de Francis *et al* (2010), porém os autores utilizaram duas fontes de energia e não obtendo definição das morfologias produzidas. Dessa forma, a proposta abordada nesta pesquisa apresenta um ineditismo, uma vez que visa produzir uma manta híbrida composta de fibras de PCL revestidas com partículas de gelatina, utilizando

os métodos de eletrofiação e eletropulverização de forma concomitante com uma única fonte de energia.

3 Métodos e Resultados preliminares

A presente pesquisa se apresenta em fase inicial de desenvolvimento, onde foram desenvolvidas fibras de policaprolactona (PCL) e nanopartículas de gelatina pelo processo de eletrofiação e eletropulverização. Ambas as produções partiram da preparação de solução polimérica, que posteriormente foram depositadas em seringas para serem encaminhadas ao eletrofiado (FIGURA 5a e 5b). Após a eletrofiação das fibras e eletropulverização das partículas, as amostras foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para comprovação da eficiência do processo na obtenção das morfologias propostas.

Figura 5 – (a) produção de fibras de PCL. (b) produção de partículas de gelatina



Fonte: Autor.

Para os procedimentos de eletrofiação e eletropulverização foi utilizado o equipamento INSTOR (Sistema de Inspeção Robótica) lotado no laboratório de polímeros e compósitos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). As amostras produzidas via eletrofiação e eletropulverização foram analisadas inicialmente durante o processamento. Como identificado nos estudos de Mancipe *et al.* (2019), foi possível observar que as viscosidades geradas pelas variações nas concentrações de polímeros, exerceram um fator primordial na produção das fibras e partículas.

As amostras de fibras de PCL foram identificadas conforme a concentração de polímero, sendo 8% a amostra A, 10% a amostra B, 15% a amostra C e com 20% como amostra D. As amostras de partículas de Gelatina, e foram identificadas conforme a concentração de polímero, sendo 12% a amostra A2, 15% a amostra B2, 20% a amostra C2 e com 25% como amostra D2.

Para a preparação das soluções, foram utilizados PCL Mn 80.000 (Sigma Aldrich, cod. 440444), gelatina tipo A de couro de porco com Bloom de 300 (Sigma Aldrich, cod. G2500), ácido acético glacial (Synth), sendo esses reagentes utilizados conforme recebido.

As imagens de MEV foram obtidas com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (FEI, INSPECT S50). As amostras foram fixadas no suporte por meio de fita de carbono e mantidas em recipiente fechado com umidade controlada antes da metalização com uma fina camada de ouro (Sputtercoater-SPI Suplies).

3.1 Eletrofiação das fibras

No processo de eletrofiação para obtenção das fibras de PCL foi utilizado como base o procedimento reportado por Souza (2016). A partir da metodologia do autor, foi analisada a variação da concentração de polímero na solução, com o valor de 8%, 10%, 15 e 20% (m/v) de PCL em ácido acético.

O método para o preparo foi o mesmo utilizado para todas as amostras, onde o PCL foi adicionado ao solvente e misturado em agitação magnética por 3 horas à temperatura ambiente. Para o processo de eletrofiação, uma seringa de 5 mL contendo solução de PCL foi posicionada no acionador do aparelho de eletrofiação. Foi mantida a distância de 12 cm entre a ponta da agulha e o disco coletor recoberto com papel de alumínio. O eletrodo de tensão positiva foi conectado a ponta da agulha para, então, serem programados no equipamento os parâmetros de processamento com vazão de 9,2 mL/h e tensão de 25 kV.

A deposição das fibras ocorreu por um período de aproximadamente 6 horas sobre o disco coletor em rotação constante. Após esse período, a amostra foi retirada do coletor e posicionada para evaporação de eventuais solventes residuais em temperatura ambiente.

3.2 Eletropulverização das partículas

Na eletropulverização das partículas de gelatina, foi utilizado o procedimento reportado por Pereira (2013). A partir da metodologia do autor, foi analisada a variação da concentração de polímero na solução, sendo preparadas soluções com 12%, 15%, 20% e 25% (m/v) de gelatina. Todas as concentrações, foram solubilizadas em uma mistura de água e ácido acético (10:1).

O método para o preparo foi o mesmo utilizado para todas as amostras, onde as quantidades indicadas de gelatina foram adicionadas ao solvente e misturada sob agitação magnética por 2 horas à temperatura ambiente. Para o processo de eletropulverização uma seringa de 5 mL contendo a solução de gelatina foi posicionada no acionador do equipamento.

Foi mantida a distância de 10 cm entre a ponta da agulha e o disco coletor recoberto com papel de alumínio. O eletrodo de tensão positiva foi conectado a ponta da agulha e a programação dos parâmetros no equipamento foram as mesmas para produção de fibras, a vazão de 9,2 mL/h e tensão de 25 kV.

A deposição das partículas ocorreu por um período de aproximadamente 6 horas sobre o disco coletor em rotação constante. Após esse período, a amostra foi retirada do coletor e posicionada para evaporação de eventuais solventes residuais em temperatura ambiente por 48 horas. Os parâmetros de processamento foram os mesmos para todas as amostras. O resumo dos parâmetros usados nos processos de eletrofiação e eletropulverização está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de Solução e de Processo

Parâmetros	Eletrofiação (PCL)	Eletropulverização (gelatina)
<i>Parâmetros de Solução</i>		
Tipo de Solvente	Ácido Acético	Água: Ácido Acético (10:1)
Concentração polimérica da Solução (m/v)	8%, 10%, 15% e 20%	12%, 15%, 20% e 25%
<i>Parâmetros de Processo</i>		
Voltagem	25 kV	25 kV

Taxa de Vazão	9,2 mL/h	9,2 mL/h
Distância da agulha ao coletor	12 cm	10 cm

Durante as 6 horas de processamento, as amostras A e B durante as apresentaram dificuldades na formação do cone de Taylor, esse fato é associado a baixa viscosidade ocasionada pela acidez do solvente que corrobora para uma possível quebra da cadeia polimérica do PCL (MANCIPE *et al.*, 2019). Após o período de 6 horas de processamento, ambas as amostras geraram uma manta de fibra, com uma espessura extremamente fina, que se fundiu ao substrato de alumínio que revestia o disco coletor, impossibilitando de visualizar a morfologia das amostras.

A amostra C manteve uma produção contínua durante o processamento, o que pode caracterizar uma boa interação na relação polímero x solvente beneficiando a viscosidade da solução, um comportamento também identificado por Qin *et al.* (2018) em seus experimentos. Após o período de 6 horas do processamento, foi gerada uma manta com aproximadamente 3mm de espessura que foi encaminhada para caracterização.

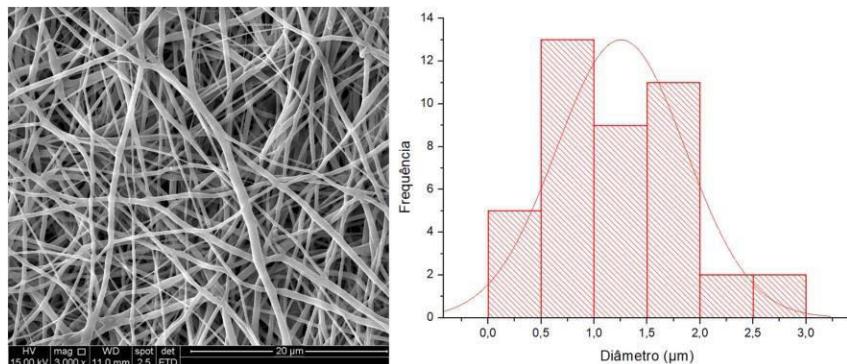
A amostra D apresentou o mesmo comportamento da amostra C, porém o processamento foi constantemente interrompido para desobstrução da agulha. Esse comportamento foi identificado nos estudos de De Prá (2017), onde pode ser observado que soluções poliméricas com concentrações de PCL acima de 12% tendem a promover problemas durante o processamento, como a solidificação da solução, o que ocasiona a obstrução da agulha, e consequentemente a formação de fibras com irregularidades.

As amostras A2 e B2 possuíam baixa concentração polimérica em relação as amostras C2 e D2, durante o processamento os jatos de partículas não mantinham uma trajetória fixa, ocasionando uma deposição reduzida das partículas de gelatina após o período de 6 horas de deposição.

A amostra C2 apresentou um processamento contínuo, sem obstrução na agulha e após o período de processamento as amostras foram encaminhadas para caracterização. A amostra D2 possuía a concentração polimérica maior entre as processadas, o processamento seguiu um fluxo contínuo durante o período de 6 horas e as amostras foram encaminhadas para caracterização, onde foi identificado na microscopia eletrônica de varredura que a maior concentração de polímero interferiu na formação morfológica, um comportamento associado ao aumento da viscosidade que corrobora juntamente com as forças eletrostáticas para a formação de fibras (SAHAY *et al.*, 2011).

Após uma análise preliminar sobre o comportamento das soluções durante o processamento e as microscopias eletrônicas de varredura, foi observado que o rendimento do processo deve ser um dos fatores determinantes para selecionar as amostras que deveriam prosseguir nas caracterizações. Dessa forma, as amostras selecionadas que apresentaram melhores estruturas morfológicas foram de PCL com concentração de 15% (m/v) (C) e Gelatina com 20% (m/v) (C2), como evidenciado na Figura 6, onde foi possível visualizar a formação de fibras de PCL isoladas, livres de defeitos e com distribuição aleatória, apresentando um diâmetro médio de $1,2 \mu\text{m} \pm 0,6$.

Figura 6 – MEV da amostra com formação de fibras de PCL

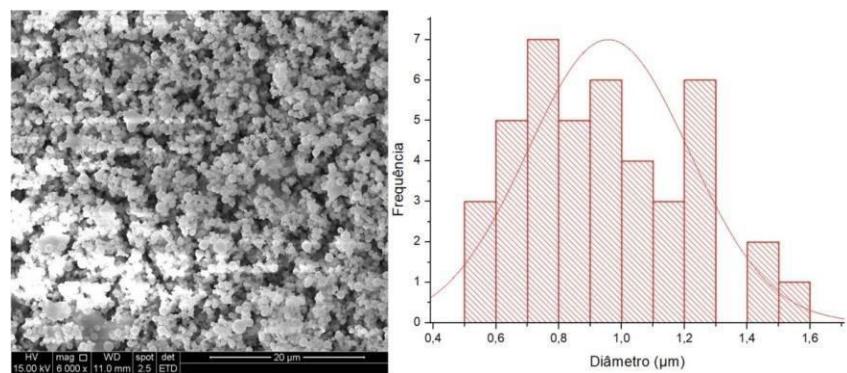


Fonte: Autor.

O comportamento morfológico contínuo das fibras de PCL pode ser atribuído a relação da viscosidade gerada pelo solvente utilizado e a voltagem aplicada durante o processamento, como identificado por Mancipe *et al.* (2019) e Qin *et al.* (2018). Entretanto, a variação os valores de diâmetros das fibras identificados na amostra contrapõem os valores obtidos pelos autores, um comportamento identificado nos estudos de Doustgani *et al.* (2013), que atribui a variação das espessuras das fibras com a rotação do disco coletor.

A Figura 7 apresenta imagem MEV das partículas de gelatina, onde é possível identificar a formação de partículas esféricas com diâmetro médio em torno de $0,9 \mu\text{m} \pm 0,2$, resultado da eficiência do processo de eletropulverização.

Figura 7 – MEV da amostra com formação de partículas de gelatina isoladas com distribuição de diâmetro



Fonte: Autor.

A formação das partículas com definição esférica, assim como a menor variação da dimensão encontrada na amostra pode ser justificada com base nos estudos desenvolvidos por Quin *et al.* (2018), que atribui a morfologia das partículas encontradas na amostra, a viscosidade da solução e a condutividade do solvente utilizado.

4 Conclusão e resultados futuros

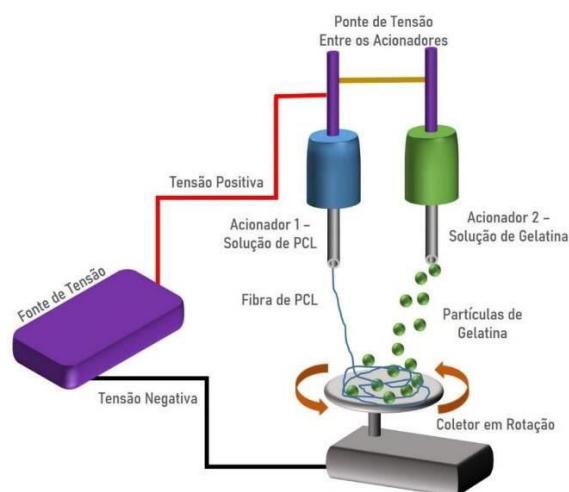
Após as análises iniciais os resultados mostraram que os parâmetros utilizados no equipamento e a concentração das soluções permitiram desenvolver fibras de Policaprolactona (PCL) com o diâmetro médio de $1,2 \mu\text{m} \pm 0,6$ e partículas de gelatina com diâmetro médio de $0,9 \mu\text{m} \pm 0,2$, evidenciando a eficiência do processo para a proposta futura da pesquisa que visa testar a

eficiência de processos nanotecnológicos para desenvolvimento de um sistema híbrido de fibras associadas a partículas oriundas de materiais orgânicos, destinadas a bioaplicação.

Foi levantada a hipótese de que tais estruturas poderiam ser processadas de forma concomitante no mesmo equipamento e utilizando uma única fonte de tensão, para formação ao mesmo tempo de uma estrutura híbrida, contendo fibras e partículas. A utilização do processo de eletrofiação e eletropulverização concomitantes apresenta potencial de produção e para deposição da estrutura híbrida sobre superfícies de materiais, se tornando um elemento auxiliar para suporte de crescimento celular, uma vez que a gelatina das partículas atua como alimento impulsionando a proliferação celular. Para que o equipamento possa operar com os 2 processos, em concomitância, será colocada uma seringa contendo a solução de PCL no acionador 1 e uma seringa contendo a solução de Gelatina no acionador 2.

O eletrodo de tensão positiva será conectado à agulha do acionador 1 e realizada uma ponte entre a agulha do acionador 1 e 2 (FIGURA 8). A princípio serão mantidos todos os parâmetros de solução da eletrofiação e eletropulverização isoladas. Com relação ao processamento, a taxa de vazão dos acionadores e a tensão serão reavaliadas. O tempo de deposição será mantido o mesmo das amostras isoladas e receberão o mesmo tratamento após o processamento, sendo retiradas do coletor e mantidas a temperatura ambiente sobre a bancada do laboratório por 48h para evaporação natural de eventuais solventes residuais. A proposta de aplicação que norteará a pesquisa é baseada na construção de estruturas para crescimento celular, de forma a integrar o Design e a área médica.

Figura 8 – Equipamento montado para eletrofiação concomitante



Fonte: Autor.

5 Referências

- ASSIS, A. K. T. **Os fundamentos experimentais e históricos da eletricidade.** Vol. 2, Campinas, SP, 2018.
- BOUCHERON, P. GIORGIONE, C. **Leonardo da Vinci: a natureza e a invenção.** Vol 1, São Paulo, SP, 2014.
- CHOKTAWEESAP, N., ARAYANARAKUL, K., AHT-ONG, D., MEECHAISUE C, SUPAPHOL P; Electrospun Gelatin Fibers: Effect of Solvent System on Morphology and Fiber Diameters. **Polymer journal**, v. 39, n. 6, p. 622-631, 2007.
- DAMODARAM, V. B.; BHATNAGAR, D.; LESZCZAK, V.; POPAT, K. C. Titaniananostructures: a biomedical perspective. **Journal RSCAdvances**, 2015. 5 (2015): p. 37149 – 37171.
- DE PRÁ, M. A. A. Matrizes nanoestruturadas bioativas para aplicação na regeneração de nervos periféricos. **Tese de Doutorado** apresentada ao programa de Pós-graduação em Biotecnologia e Biociências da Universidade Federal de Santa Catarina, para obtenção do título de doutor em Biotecnologia e Biociências. 2017.
- DIAMOND, J. **Collapse: How societies choose to fail or survive.** London: Penguin Books, 2005.
- DOUSTGANI, A., VASHEGHANI-FARAHANI, E., SOLEIMANI, M.; Aligned and random nanofibrous nanocomposite scaffolds for bone tissue engineering Nanofibrous scaffolds for bone tissue engineering. **Nanomedice Journal**. 1(1), 20-27, 2013.
- DUARTE, L. M. A actividade mineira em Portugal durante a Idade Média. **Revista da Faculdade de Letras**. Vol 12, 2015.
- ERENCIA, M., CANO, F., TORNERO, J.A., FERNANDES, M.M., TZANOV, T.; Electrospinning of gelatin fibers using solutions with low acetic acid concentration: Effect of solvent composition on both diameter of electrospun fibers and cytotoxicity. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 132, n. 25, 2015.
- ERLHOFF, M., MARSHALL, T. (Eds.). **Design dictionary: perspectives on design terminology.** Walter de Gruyter. 2007.
- FLUSSER, V. **O mundo codificado: por uma filosofia do design e da comunicação.** Org. Rafael Cardoso. Trad. Raquel Abi-Sâmara. São Paulo: Cosac Naify, 2007.
- FORTY, A. **Objetos de Desejo.** Vol. 2, São Paulo. Cosac Naify, 2007
- FRANCIS, L., VENUGOPAL, J., PRABHAKARAN, M. P., THAVASI, V., MARSANO, E., & RAMAKRISHNA, S.. Simultaneous electrospin–electrosprayed biocomposite nanofibrous scaffolds for bone tissue regeneration. **Acta biomaterialia**, 6(10), 4100-4109, 2010.
- GAMA, R. O. Controle do comportamento hidrofílico/hidrofóbico de polímeros naturais biodegradáveis através da decoração de superfícies com nano e microcomponentes. **Tese de Doutorado**, 2014. Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais. P. 111.
- HARARI, Yuval Noah. **Sapiens: Uma breve história da humanidade.** Ed. Porto Alegre. 2018.
- HAIDER, A., HAIDER, S., KANG, I.K.; A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. **Arab. J. Chem.** 2015.
- KIM, H.W., YU, H.S., LEE, H.H.; Nanofibrous matrices of poly(lactic acid) and gelatin polymeric blends for the improvement of cellular responses. **J. Biomed. Mater. Res. - Part A**. 2008, 87(1),

25-32.

LÖBACH, B. **Design industrial**. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

MACHADO, Á. R., COELHO, R. T., ABRÃO, A. M., & DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. Editora Blucher. 2015.

MANCIPE, J. M. A.; DIAS, M. L.; THIRÉ, R. M. S. M. Avaliação morfológica de fibras eletrofiadas de policaprolactona em função do tipo de solvente. **Revista Matéria**, v. 24 (03), 2019.

MAGNOLI, Demétrio. **História das guerras**. Editora Contexto, 2010.

MEADEN, G. T. **Electrical resistance of metals**. Springer, 2013.

MENEZES, F. C.; Eletrofiação de Nanofibras Poliméricas para uso em Engenharia Tecidual. **Dissertação de Mestrado**, 2017. Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil.

MINHAT, M. Development Of A STEP-NC Controller System Framework And Implementation In UTeM. **Project Report**. UTeM, Melaka, Malaysia, 2013.

OLIVEIRA, P. H.; SADE, W. Inteligência Competitiva no contexto das empresas mineiras de artefatos de estanho. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 21, p. 23-41, 2016.

PEREIRA, I. H. L. Preparação e avaliação in vitro de nanofibras Gelatina/ Policaprolactona com estrutura casca-núcleo obtidas por eletrofiação co-axial. **Tese de Doutorado**, 2013. Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

QIN, Y.; CHENG, L.; ZHANG, Y.; CHEN, X.; WANG, X.; HE, X.; YANG, W.; AN, Y.; LI, H. Efficient preparation of poly(lactic acid) nanofibers by melt differential electrospinning with addition of acetyl tributyl citrate. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 135, n. 31, 15 ago. 2018.

RAMESH, R.; JYOTHIRMAI, S.; LAVANYA, K. Intelligent automation of design and manufacturing in machine tools using an open architecture motion controller. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 1, p. 248-259, 2013.

REN, X.; ZHANG, Q.; LIU, K.; LI, H.; ZHOU, J. G. Modeling of pneumatic valve dispenser for printing viscous biomaterials in additive manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 6, p. 434–443, 2014.

SAHAY, R., THAVASI, V., RAMAKRISHNA, S. Design modifications in electrospinning setup for advanced applications. **Journal of Nanomaterials**, v. 2011, p. 1-17, 2011.

SAMPAIO, H. A.; BETTENCOURT, A. M. S. **Produção e práticas metalúrgicas da idade do bronze no noroeste português: o caso do pego, Braga**. Braga: Ed. Centro de Investigação Transdisciplinar, 2011.

SCHUMMER, J. **Studies In History and Philosophy of Science Part A, Hist. Phil. Sci.** v. 34, n. 4, p. 705-36, dec., 2003

SOUZA, S. O. L. Desenvolvimento e caracterização de nanofibras obtidas pela técnica de eletrofiação coaxial visando a liberação de bevacizumabe para tratamento de degeneração macula relacionada a idade. **Dissertação de Mestrado**, 2016. Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

UHLIG, T., KRÜGER, J., LIDKE, G., JANTZEN, D., LORENZ, S., IALONGO, N., TERBERGER, T. **Lost in combat? A scrap metal find from the Bronze Age battlefield site at Tollense**. *antiquity*, 93(371), 1211-1230. 2019.