

## **Avaliação ambiental do uso de reagentes na produção de nanofibras de hidroxiapatita pela técnica de fiação por sopro em solução**

### **Environmental assessment of the use of reagents in production of hydroxyapatite nanofibers by solution blow spinning technique**

DOI:10.34117/bjdv8n3-431

Recebimento dos originais: 27/01/2022

Aceitação para publicação: 25/02/2022

#### **Elery Lionidas Jardim de Andrade Lopes**

Graduando em engenharia metalúrgica

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais – IF SUDESTE MG, campus Juiz de Fora

Núcleo de metalurgia

Endereço: R. Bernardo Mascarenhas, 1283 - Fábrica, Juiz de Fora – MG

CEP: 36080-001

E-mail: elery-fac@hotmail.com

#### **Lecino Caldeira**

Docente

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais – IF SUDESTE MG, campus Juiz de Fora

Núcleo de metalurgia

Endereço: R. Bernardo Mascarenhas, 1283 - Fábrica, Juiz de Fora – MG

CEP: 36080-001

E-mail: lecino.caldeira@ifsudestemg.edu.br

#### **André Luiz Molisani**

Docente

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais – IF SUDESTE MG, campus Juiz de Fora

Núcleo de metalurgia

Endereço: R. Bernardo Mascarenhas, 1283 - Fábrica, Juiz de Fora – MG

CEP: 36080-001

E-mail: andre.molisani@ifsudestemg.edu.br

#### **Emanuel Augusto de Oliveira e Silva**

Docente

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais – IF SUDESTE MG, campus Juiz de Fora

Núcleo de metalurgia

Endereço: R. Bernardo Mascarenhas, 1283 - Fábrica, Juiz de Fora – MG

CEP: 36080-001

E-mail: emanuel.augusto@ifsudestemg.edu.br

**Matheus José Cunha de Oliveira**

Docente

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais – IF SUDESTE MG, campus Juiz de Fora

Núcleo de metalurgia

Endereço: R. Bernardo Mascarenhas, 1283 - Fábrica, Juiz de Fora – MG

CEP: 36080-001

E-mail: matheus.oliveira@ifsudestemg.edu.br

**RESUMO**

O desenvolvimento de materiais para aplicações biomédicas tem crescido nos últimos anos. Dentre esses materiais, destacam-se os fosfatos de cálcio, como a hidroxiapatita, cujas nanofibras são aplicadas na regeneração de tecidos ósseos. Uma metodologia eficaz na produção de fibras nanométricas de materiais cerâmicos é o método de fiação por sopro em solução (SBS). O método é capaz de produzir fibras com diâmetros reduzidos, com baixo custo. A técnica SBS pode ser também uma alternativa ambientalmente mais viável por demandar um consumo energético inferior para produção de fibras e ser mais segura além de possuir uma produção em maior escala, podendo, assim, impulsionar uma produção mais sustentável. Contudo poucos estudos abordam avaliações de impactos ambientais da produção de nanofibras cerâmicas. O presente trabalho estudou o consumo energético e o impacto ambiental causado pela produção de nanofibras de hidroxiapatita através do uso de dimetilformamida, etanol absoluto e tri-etil fosfato como reagentes na produção de nanofibras de hidroxiapatita obtidas pela técnica de Fiação por Sopro em Solução. A avaliação ambiental foi realizada com uso do software OpenLCA de avaliação de ciclo de vida. O consumo energético do processo mostrou-se elevado com valor 5563 kWh para produção de 1 kg de nanofibras de hidroxiapatita. A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) indicou que os agentes quantificados e envolvidos no processo geraram impactos ambientais significativos em diferentes indicadores métricos.

**Palavras chave:** avaliação ambiental, openlca, nanofibras, hidroxiapatita.

**ABSTRACT**

The development of materials for biomedical applications has in recent years. Among these materials, calcium phosphates, such as apatite, stand out, whose tissue hydroxyfibers are constructed in the form of bone tissue. An effective methodology in the production of nanometric fibers from ceramic materials is the solution blow spinning method (SBS). The method is capable of producing fibers with reduced diameters, with low cost. A more environmentally viable technique can be an alternative of lower energy consumption and go beyond having a production, and can thus be greater in producing a more sustainable production. Few studies address estimates of environmental impacts of the production of ceramic nanofibers. The present worked on the energy consumption and environmental impact caused by nanospinning by the production of hydroxyapatite, through the use of absolute ethanol, phosphate reagent in the production of hydroxyapatite nanofibers. The environmental assessment was performed using OpenLCA life cycle assessment software. The energy consumption of the process was high with a value of 5563 kWh for the production of 1 kg of hydroxyapatite nanofibers. The Metric Assessment indicated that the quantified agents and no processes generated life cycle impacts (LCA) indicated that the agents were quantified and no process generated different life cycle impacts.

**Keywords:** environmental assessment, openlca, nanofibers, hydroxyapatite.

## 1 INTRODUÇÃO

Um ramo importante na biomedicina é a engenharia de tecidos que busca construir substitutos biológicos para reparar tecidos danificados. Estes produtos porosos tridimensionais (3D) são comumente utilizados para definir a geometria de construções de engenharia de tecidos e fornecer espaço de poro adequado e superfície para apoiar a fixação, migração, proliferação, diferenciação e gênese de neoteciado (HU e MA, 2011). Assim, vem-se destacando os fosfatos de cálcio, como a hidroxiapatita (HA), em virtude de suas similaridades com o mineral constituinte dos ossos (LU *et al.*, 2018).

Para melhor adesão celular as fibras de fosfato de cálcio, caracterizadas como fibras cerâmicas, são produzidas em escala submicrométrica e nanométrica que possibilita obter uma rugosidade superficial que permite melhor adesão celular e com isso maior compatibilidade entre os neoteciado e o tecido ósseo que se busca reconstruir quando comparadas com outras fibras que em função do processo possuem níveis de aglomeração mais elevados o que limita suas funções biológicas (HU e MA, 2011).

A técnica de Fiação por Sopros em Solução (do inglês *Solution Blow Spinning* – SBS) foi reportada por Medeiros *et al.* (2009) como uma alternativa da técnica de eletrofiação (BHARDWAJ & KUNDU, 2010) para a produção de fibras poliméricas e posteriormente adaptada para produção de nanofibras cerâmicas como hidroxiapatita. Com a vantagem de apresentar uma taxa de produção de fibras muitas vezes maior, baixo custo de produção e fácil implementação, não sendo necessária a aplicação de altos campos elétricos, sendo uma alternativa viável à produção de nanofibras cerâmicas como as de fosfato de cálcio (OLIVEIRA, *et al.* 2019).

No entanto, o processo de produção de nanofibras por SBS necessita-se que seja utilizado solventes para manter o material em suspensão durante o sopro. Estes solventes juntamente aos reagentes de produção, por sua vez, podem contribuir de forma significativamente negativa para o meio ambiente.

Logo, o presente trabalho buscou estudar o ciclo de vida da produção de nanofibras de hidroxiapatita, utilizando para tanto o software livre OpenLCA, com o objetivo de determinar o impacto ambiental do solvente dimetilformamida (DMF), do Etanol absoluto também utilizado como solvente e do Tri-etil fosfato como reagente.

## 1.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A avaliação do ciclo de vida (ACV) conhecida internacionalmente por LCA (*Life cycle assessment*), é uma técnica par avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto dado o estudo de um inventário de entradas e saídas pertinentes com o processo, a avaliação dos impactos associados a estas entradas e saídas e a interpretação destes resultados para análise em relação aos objetos de estudo (ABNT, 2009).

A ACV busca estudar os aspectos e os impactos ao longo da vida dos produtos, como dito, deste de o processo de exploração e transformação das matérias primas, até a destinação final dos produtos obtido, passando pelo uso e distribuição deste produto, e neste processo são levados em consideração principalmente os impactos deixados no meio ambiente e sua consequência ecológica bem como o impacto para a vida humana. (ISO 14040, 2001).

Pela análise dos dados no processo ACV é possível determinar qual o impacto de um produto no meio ambiente? Quais os processos envolvidos no ciclo de vida do produto? Quais as consequências da cadeia produtiva? Quanta energia, água, poluentes ou outros recursos são utilizados durante o processo? Quais os resíduos e como estes resíduos podem impactar no ambiente e na saúde dos seres humanos? Dentre vários outros questionamentos que podem ser respondidos.

Como citado na norma NBR ISO 14040 (2001, p2):

Algumas fases da técnica de ACV, como a avaliação de impacto, ainda estão em relativa infância. Resta ainda considerável trabalho a ser feito e experiência prática a ser adquirida para desenvolvimento adicional do nível da prática de ACV. Portanto, é importante que os resultados de ACV sejam interpretados e aplicados apropriadamente.

Assim também os estudos sobre a aplicação do ACV na produção de nanofibras é ainda um campo pouco explorado que requer grande atenção, uma vez que o processo em si ainda é algo pouco aplicado, não seria diferente em um processo também pouco conhecido.

A avaliação do ciclo de vida (ACV) nos permite responder questões sobre como estimar o impacto ambiental de um produto ou processo através de toda a sua fase de vida, deste a produção dos insumos até a destinação final do produto, levando em consideração os impactos econômicos, sociais e ambientais. Esta é uma técnica que estuda os aspectos ambientais e os impactos tanto positivos quanto negativos do processo

produtivo, desde a extração da matéria prima até o destino final. O presente trabalho buscou responder algumas destas questões aplicadas ao processo de obtenção de hidroxiapatita tendo como ferramenta para a avaliação elaboração e avaliação dos resultados o software livre OpenLCA criado para a avaliação de sustentabilidade de produtos, este permite a modelagem profissional do ciclo de vida utilizando ampla base de dados, de contribuição multinacional, para a avaliação dos impactos do processo de nanofabricação.

## 1.2 NANOFIBRA DE FOSFATO DE CÁLCIO

As fibras de fosfato de cálcio são provenientes do sal de cálcio e fósforo (CaP), de característica mineral e que tem grande proximidade de semelhança com os cristais sólidos inorgânicos que compõem 65% da massa do osso e este fosfato tem uma relação Ca/P bem próxima da hidroxiapatita (HA) amplamente aplicada na reconstrução óssea e facial. A biocompatibilidade do CaP se deve a sua composição semelhante à fase mineral de ossos, dentes e tecidos calcificados, sendo solúvel em água, possibilita a troca dos ions  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{PO}_4^{3-}$  com o meio biológico facilitando o crescimento e regeneração óssea (OLIVEIRA et al., 2019).

Por ter uma excepcional relação entre área/volume de superfície e alta porosidade, a nanofibra de Fosfato de Cálcio se torna um composto com vasta aplicação e aceitabilidade para reconstrução do tecido ósseo, por permitir a proliferação de células-tronco, induzem a melhor regeneração dos biomateriais. A hidroxiapatita, devido a sua composição bem próxima aos tecidos ósseos, auxiliam na formação de uma camada de apatita carbonada em sua superfície, livre de tecidos fibrosos, favorecendo o crescimento do tecido (ZAIRANI et al., 2016, RAMBHIA et al., 2015, CANILLAS et al., 2017).

A obtenção de fibras cerâmicas de CaP têm várias vias de síntese, partindo da técnica de sol-gel, extrusão e mais utilizado a eletrofiação (*electrospinnig*). Estudo recente mostrou seu possível obter através do processo de Fiação por Sopros em Solução (OLIVEIRA et al., 2019), objeto de estudo deste trabalho.

## 1.3 DIMETILFORMAMIDA

O DMF (N,N-dimetilformamida) é um solvente orgânico produzido pela síntese da reação de dimetil-amina (DMA) e metanoato de metila ou por reação de DMA com monóxido de carbono, polar aprótico denominado universal, de grande miscibilidade com a água, com baixa taxa de evaporação, muito utilizado na indústria como solvente de sais

e compostos com alto peso molecular, vastamente aplicado para a produção de fibras sintéticas (LOUVIS, 2016).

O DMF é rapidamente absorvido pela pele e estudos sugerem ainda a relação entre a exposição prolongada e o câncer de testículo e câncer de próstata conforme os estudos publicados do Centro de Prevenção de Doenças (CCPD) por meio do Instituto Nacional para Saúde e Segurança Ocupacional (INSSO), além destes fatores, o DMF esta relacionado com doenças hepáticas e esteatose microvesicular em humanos, (GONÇALVES, 1997), desta forma, é necessário uma observação apurada sobre a aplicação deste componente em processos produtivos e sobre os resíduos de processos que utilizam o DMF como solvente.

#### 1.4 ETANOL

Durante o processo de Fiação por Sopros em Solução (*Solution Blowing Spinnig*) assim como o DMF, também é utilizado o Etanol Absoluto como solvente para manutenção dos particulados em solução. O Etanol é um produto da destilação da cana-de-açúcar, vastamente produzido no Brasil, com principal emprego na obtenção do Álcool etílico como combustível automobilístico, sendo uma boa parte deste processo direcionado para a obtenção de produtos a serem utilizados na indústria de forma geral. (GNANSOUNOU e DAURIAT, 2005).

Líquido incolor, com ponto de inflamação em 16,6°C, volátil a temperatura ambiente, pode causar irritação no trato respiratório, podendo causar depressão do sistema nervoso central e danos ao sistema hepático devido a sua ingestão, causa irritação moderada à pele. Em contato com os olhos, causa severa irritação e pode causar a sensibilização dolorosa à luz.

Já no ambiente, o Etanol pode ser agressivo desde a sua cadeia produtiva até o processo de destinação final, sendo o foco deste estudo a aplicação do mesmo no processo de produção de nanofibras, avaliaremos o impacto que o produto pode causar ao ser consumido no processo.

Segundo dados AIE – Agência Internacional de Energia, a utilização de etanol produzido a partir da cana-de-açúcar reduz em média 89% a emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa – como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (NO<sub>2</sub>), no entanto a sua queima do solvente contribui para a formação de O<sub>3</sub> na atmosfera, quando em elevadas altitudes, o ozônio tem papel fundamental na proteção dos raios UV-B, no entanto, na troposfera, pode se transformar em um elemento tóxico

capas de atacar proteínas e destruir micro-organismos prejudicando o crescimento de vegetais (Rodrigues e Martins, 2001).

A contribuição da emissão dos etanos nas cidades foi definida no trabalho de Sousa. et al (2016) levando em consideração o MIR (*maximum incremental reactivity*) em massa de ozônio formado pela adição de um composto em relação ao ROC (*Reactive organic compound*) que identifica qualquer composto que tenha potencial, uma vez emitido, de contribuir para a formação de ozônio troposférico, e chegaram a determinação que o consumo de Etanol pode contribuir com os seguintes valores representados na Tabela 1.

Tabela 1 Contribuição na queima do Etanol.

Valores de MIR para os compostos NMOG segundo o modelo de mecanismo SAPRC-07 do CARB, dados em [gO <sub>3</sub> /gROC]					
MIR <sub>ROC</sub> [gO <sub>3</sub> /gROC]	CH <sub>4</sub>	CO	ETOH	Acetaldeido	Formaldeido
	0,0014	0,056	1,53	6,54	9,46

Fonte: SOUZA et al. (2016).

### 1.5 TRI-ETIL FOSFATO

O Tri-etil fosfato (TEP) é um líquido incolor obtido da síntese entre o triéster de etanol e o ácido fosfórico, utilizado como retardante de chama principalmente na produção de resina de poliéster e em plastificantes. Quando manuseado na sua forma pura é altamente intoxicante se ingerido e pode causar severas irritações na pele e nos olhos, tem potencial cancerígeno com fator  $3,62 \times 10^{-5}$  mg/kg/dia quando na exposição oral, tem alta taxa de solubilidade em água o que aumenta o seu potencial de contaminação, em contato com a água, a expectativa de vida com composto é de 1 ano, com ponto de fusão mais elevado, o TEP não tende a evaporar em condições normais permanecendo por mais tempo no ambiente quando depositado e sua presença no meio pode causar a degradação da vida microbiana (EEA, 2015).

## 2 METODOLOGIA

As fibras de fosfato de cálcio foram produzidas pela rota de síntese descrita por Oliveira et al. (2019). Para a quantificação do impacto causado pelos agentes utilizados no processo com temperatura de queima de 1000°C, e para efetivação dos cálculos de impacto ambiental utilizando o programa openLCA, todos os valores que estão determinados em volume, tiveram que ser convertidos para massa, uma vez que os agentes

no banco de dados do programa já haviam sido atribuídos valores com suas unidades em massa, e para perfeita funcionalidade do processo era necessário a conversão e ainda a adequação do peso para a produção de 1kg de nanofibra, conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Conversão de unidades dos reagentes para produção nas nanofibras.

	Densidade g/cm <sup>3</sup>	Volume Utilizado (ml)/grama para 1µg	Volume Utilizado (ml)/grama para 1kg	Equivalente volume em peso (g)	Equivalente em peso (kg)
Etanol	0,7915	8	80.000	63.608	63,608
Nitrato de cálcio tetra-hidratado	1,82	251	2.510.000		2.510
Dimetilformamida	0,944	2	20.000	18.880	18,88
Tri-etil fosfato	0,969	0,109	1.090	1.056,21	1,05621

Fonte: Autoria própria.

Utilizando-se o software gratuito, OpenLCA, o estudo foi realizado importando o banco de dados Ecoinvent 3.1 LCIA methods. Para avaliação do impacto ambiental das nanofibras de hidroxiapatita, avaliou-se apenas a o impacto dos reagentes na preparação da solução, excetuando-se a fonte de cálcio e o polímero, e obtenção de uma unidade funcional das fibras, 1 kg de nanofibras. Como parâmetros no openLCA foram lançados os valores representados na Tabela 3.

Tabela 3 - Consumo de insumos extraídos do openLCA.

Fluxo	Categoria	Unid	Resultado
DMF (Dimetilformamida)	Emissão no ar	kg	18,88
Etanol	Emissão no ar	kg	63,12
TEP (Tri-etil fosfato)	Emissão no ar	kg	1,05621
Nitrato de cálcio	Outros	kg	2510
Fluxo	Categoria	Unid	Resultado
Hidroxiapatita	-	Kg	1

Fonte: Autoria própria.

O referido programa disponibiliza vários métodos de cálculo para a estimativa do impacto que o processo pode deixar, neste trabalho em particular utilizou-se o método do ILCD 2011 Midpoint+, que é um método de determinação criado pela The European Product Environmental Footprint ou EUPEF, que visa mensurar a pegada deixada no ambiente por um determinado processo (Product Environmental Footprint, PEF) que é um método baseado na avaliação do ciclo de vida (LCA) para quantificar os impactos ambientais de bens e produtos (Zampori, 2019).

Para o cálculo do consumo energético dos equipamentos utilizados para fabricação das nanofibras foram utilizados um alicate amperímetro MINIPA ET 3111, um multímetro digital MINIPA ET 2082 e um multímetro digital MINIPA ET 2042C.

### 3 RESULTADOS

O resultado dos valores de tensão e corrente medidos para cada equipamento utilizado na fabricação das nanofibras está representado na Tabela 4 juntamente ao valor da potência calculada. Os dois compressores estão configurados como vaso comunicante e acionamento simultâneo.

Tabela 4 - Potência consumida para cada equipamento do processo de Fiação por Sopros em Solução.

Equipamento	Tensão medida (V)	Corrente medida (A)	Potência calculada (W)
Forno de fiação <sup>1</sup>	207	11,11	2299,77
Forno de fiação <sup>2</sup>	217	0,07	15,19
Câmara de coleta	219	0,94	205,86
Agitador magnético	119	0,29	34,51
Bomba de injeção	220	0,04	9,06
Forno mufla <sup>1</sup>	213	7,91	1684,83
Forno mufla <sup>2</sup>	216	1,69	365,04
Compressor 1 <sup>3</sup>	378	4,76	1799,28
Compressor 2 <sup>3</sup>	380	4,66	1770,28

<sup>1</sup>Medição durante o aquecimento (rampa).

<sup>2</sup>Medição após estabilização da temperatura.

<sup>3</sup>Medição durante o tempo de enchimento dos vasos de pressão.

Fonte: Autoria própria

É possível observar que as maiores potências calculadas estão associadas ao forno de fiação durante a rampa de aquecimento, ao forno mufla também durante rampa de aquecimento e aos compressores durante o enchimento dos vasos de pressão. Isto é, os maiores valores de potência são observados apenas na etapa de preparação do processo de fiação pelo método SBS. É importante ressaltar que todas as medições foram realizadas nos equipamentos dispostos no laboratório especificamente para produção das fibras deste estudo. Em um possível *scale-up* esses consumos energéticos podem ser amplamente minimizados com uso de equipamentos com alta eficiência energética ou ainda, por exemplo com uso de múltiplos bicos de injeção simultânea para aumento do rendimento e produção.

Assim, duas considerações devem ser feitas para análise do consumo energético. A primeira é a possível comparação com o método de eletrofiação para obtenção de nanofibras de CaP. A configuração dos equipamentos seria semelhante no que tange o

agitador magnético para preparação da solução, a bomba de injeção e o forno mufla para queima e formação das fases. Na eletrofiação existe ainda o consumo associado a fonte de energia para criação da diferença de potencial. A segunda consideração diz respeito ao cálculo da demanda energética para produção de uma unidade funcional de material, tomando como exemplo a produção de 1 kg de nanofibras de hidroxiapatita. O tempo de fiação para obtenção de 1 grama de nanofibras de hidroxiapatita é estimado em 15,1 horas. A partir de então foi realizado o cálculo do consumo energético do processo para obtenção da unidade funcional. O resumo deste consumo está descrito na Tabela 5.

Tabela 5 - Consumo energético dos equipamentos de fiação para obtenção de 1kg de nanofibras de hidroxiapatita.

<b>Equipamento</b>	<b>Consumo (kWh)</b>
Forno de fiação	225
Câmara de coleta	3090
Agitador magnético	34
Bomba de injeção	135
Compressor	1933
Mufla	146
Total do processo	5563

Fonte: Autoria própria

Não levou-se em consideração o consumo energético inicial de aquecimento do forno de fiação uma vez que o consumo deste comparado ao uso prolongado do equipamento é irrisório. Para o cálculo do consumo do agitador magnético e mufla considerou-se, devido a área superficial disponível, que no primeiro seria possível produzir simultaneamente aproximadamente duas dezenas de soluções e no segundo queimar cerca de cinco dezenas de volumes de fibras verdes. Ainda, os compressores efetuam um disparo de 6,5 minutos a cada 15 minutos, o restante ficando em repouso apenas consumindo ar.

Desta feita é importante ressaltar o elevado consumo energético para produção dessas nanofibras, superior a 5000 kWh, tornando assim evidente que apesar do método SBS não utilizar uma fonte de energia como o método de eletrofiação, o consumo energético para produção de nanofibras é também elevado.

A limitada literatura de análise do impacto ambiental do processo de eletrofiação não reporta o quantitativo do consumo energético do processo, apenas indica que a etapa da eletrofiação é uma etapa que demanda altos valores de energia. É estimado um consumo de 2311 kWh na fabricação do mesmo quantitativo, isto é, 1 kg de nanofibras poliméricas de fluoreto de polivinilideno pela técnica de eletrofiação. Simon *et al.* (2016)

reportaram um consumo de 283,7 kWh para produção por eletrofição de 1 kg de nanofibras poliméricas de poliácrlonitrila com nanopartículas de fosfato de lítio e ferro, consumo medido apenas em relação ao processo de eletrofição e secagem do material.

Deve-se ressaltar que o rendimento das nanofibras cerâmicas, como a hidroxiapatita, é inferior às nanofibras poliméricas pois as cerâmicas necessitam passar pela etapa de queima, o que resulta em grandes perdas de massa além do consumo associado ao forno para este fim. Necessitando, dessa forma, de um tempo mais elevado de fabricação resultando por consequência em um consumo uma ordem de grandeza maior. Este resultado evidencia a importância da discussão do impacto associado a fabricação de nanomateriais levando em consideração não somente o método ou processo de obtenção, mas principalmente a natureza do nanomaterial produzido.

Após a conversão dos valores dos reagentes e aplicação do método de mensuração disponível no openLCA, obteve-se o impacto geral deixado pelo processo sendo levado em consideração os solventes. Assim é possível verificar os valores descritos na Tabela 6 quanto ao impacto gerado no processo.

Tabela 6 - Contribuição do processo no impacto. Extraído de openLCA.

<b>Impacto deixado pelo processo SBS</b>	
<b>Processo: Fiação por sopro em solução</b>	
Ecotoxicidade de água doce	15,90493 (CTUe <sup>1</sup> )
Toxicidade humana, efeitos cancerígeno	2,3E-07(CTUh <sup>2</sup> )
Toxicidade humana, efeito não cancerígeno	5,14E-05 (CTUh)
Formação fotoquímica de ozônio	42,54288(kg NMVOC eq <sup>3</sup> )

<sup>1</sup>CTUe (Ecotoxicidade de unidades tóxicas comparativas)

<sup>2</sup>CTUh (Unidades tóxicas comparativas para humanos)

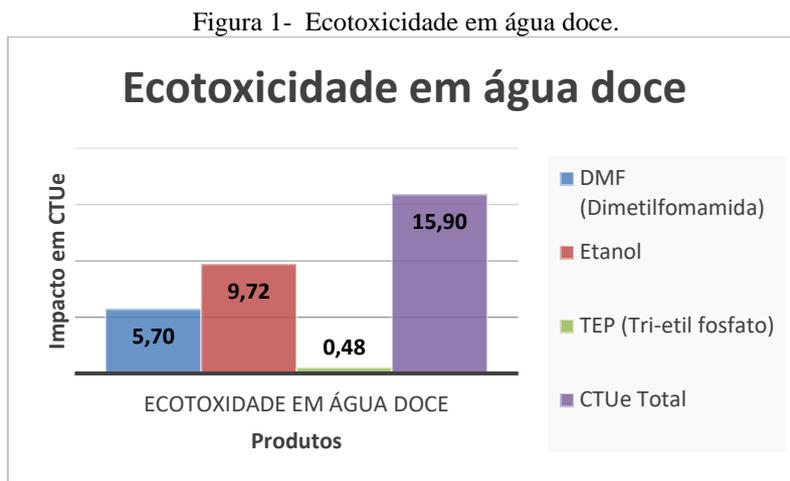
<sup>3</sup>kg NMVOC eq: Emissões de compostos orgânicos voláteis não metano (NMVOC)

Fonte: Autoria própria.

O objetivo na utilização do método ILCD 2011 Midpoint+ é permitir identificar os impactos deixados para que assim possam ser avaliadas sugestões de redução destes no processo de produção de nanofibras, tendo em conta as atividades da cadeia de abastecimento desde a extração de matérias-primas, passando pela produção e utilização e até à gestão de resíduos finais. Isto é alcançado através da aplicação dos métodos de análise disponíveis no software openLCA que permite o fornecimento de requisitos detalhados para modelar os impactos ambientais dos fluxos de material / energia e as emissões e fluxos de resíduos associados a um produto ao longo do seu ciclo de vida. E no caso do processo ILCD 2011 Midpoint+, este permite a separação entre o impacto deixado sobre ecotoxicidade na água sendo o Etanol um insumo de grande

representatividade no processo que pode gerar significativa contaminação aos mananciais assim como o TEP, o Midpoint se mostrou o método mais apurado para as análises a serem realizadas.

Como pode ser observado na Figura 1 quanto à ecotoxicidade em água doce o processo total gera de resíduo 15,90CTUe, sendo o principal contribuinte para o processo o solvente Etanol, que contribui com 61,11% do total gerado.



Fonte: Autoria própria.

A caracterização do fator de impacto para a água é expresso em CTUe (Comparative toxic units) que apresenta uma estimativa das frações com potencial efeito para o ambiente em unidade de volume por unidade de massa do elemento químico envolvidos (CTUe por Kg emitido), assim o processo para a obtenção de 1 kg de nanofibra de hidroxapatita gera um potencial de 15,90 CTUe, não há um valor referencial sobre a quantidade mínima ou máxima de emissão, sendo assim, o ideal seria o zero emissão no ambiente, no entanto, através da avaliação do OpenLCA este valor pode ser mensurado e conhecido.

Quanto a emissão no ar, o insumo de maior contribuição é o Etanol já que seu consumo está diretamente relacionado à concentração de ozônio troposférico, sendo a formação de O<sub>3</sub> nas camadas mais baixas da atmosfera a presença deste gás, pode a longo prazo ter efeitos nocivos aos sistemas respiratórios, já havendo estudos que revelam um número significativo de mortes pela alta concentração no ambiente, como reportado pela ACS (American Cancer Society) (Fridell, 2010). Neste estudo, foi especificado que uma concentração próxima de 0,2% por µg/m<sup>3</sup>, já é suficiente para contribuir com as taxas de mortalidade pela intoxicação humana por ozônio, e como apresentado pelos resultados

obtidos com o openLCA, a emissão de Ozônio pelo processo está na faixa de 42,54 KgNMVOC Eq, sendo o principal responsável o Etanol utilizado com solvente, e convertendo esta unidade para metros cúbicos utilizando o método proposto por Dong et al. (2021) temos um fator de 1:1 quando relacionado à produção de ozônio no LCA para o método EDIP que relaciona os resultados em  $m^3$ , assim tem-se que na emissão atmosférica, o processo deposita aproximadamente  $0,4254\mu g/m^3$ , que em determinados ambientes pode representar um risco alto de atingir os valores máximos recomendados.

Quanto ao DMF nota-se que o valor liberado no processo é de aproximadamente  $5,14 \times 10^{-5}$  CTUh, que conforme utilizando a tabela de conversão proposta por Dong et al. (2021) equivale à  $5,01 \times 10^{-6} \times 5,14 \times 10^{-5}$ , resultando em  $2,57 \times 10^{-10}$ , isto é, 0,257 partículas por bilhão, sendo o limite de exposição recomendado pelo NIOSH (REL), o limite de exposição permissível (PEL) da Administração de Segurança e Saúde Ocupacional (OSHA) e o valor limite da Conferência Americana de Higienistas Industriais Governamentais (ACGIH) são todas 10 partes do DMF por milhões de partes de ar (10 ppm), ou 30 miligramas de DMF por metro cúbico de ar ( $30 \text{ mg}/m^3$ ). Esses limites de exposição são baseados nos efeitos agudos do DMF (principalmente lesões no fígado). Os padrões em outros países incluem 20 ppm na Alemanha, 3 ppm na URSS e 10 ppm na Suécia e Tchecoslováquia. Nota-se que os valores encontrados no processo são bem aquém dos estipulados pelos Órgãos Regulamentadores internacionais, sendo no entanto um valor contributivo para a deposição do elemento na atmosfera.

#### 4 CONCLUSÃO

O software OpenLCA se mostra uma importante ferramenta para a mensuração do impacto que determinados processos podem deixar no ambiente, o próprio estudo do ciclo de vida dos produtos é por si só um importante estudo para a determinação da degradação que pode ser gerada por um processo, e poder mensurar os valores que são emitidos é de suma importância para melhor adequação dos processos e procedimentos produtivos. Durante o processo de obtenção de nanofibra de hidroxiapatita pela técnica de fiação por sopro em solução, vimos que para obtenção de 1kg de nanofibra o processo deixa a sua contribuição na degradação da água doce e do ar atmosférico, conforme foi utilizando o método de MidPont+ para a terminação, e sendo considerado somente o impacto gerado pelos solventes DMF e Etanol, e pelo TEP. Através do cálculo do consumo energético na produção do material observou-se que este possui um elevado consumo que está relacionado também com um aumento ainda maior do impacto

ambiental do processo de nanofabricação. Vale ressaltar que há ainda outros insumos no processo que não puderam ser avaliados bem como há outros métodos de mensuração que podem retornar dados mais ou menos extensos do que o utilizado.

### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais – Campus Juiz de Fora pelo suporte financeiro – Editais nº 04/2021 e 18/2021.

## REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040:2009. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro. 2009.

BHARDWAJ N, KUNDU SC. Electrospinning: a fascinating fiber fabrication technique. **Biotechnol Adv**, 28(3):325-47, 2010.

CANILLAS, M. et al. Calcium phosphates for biomedical applications. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 56, p. 91-112, 2017.

DONG, Y.; HOSSAIN, M.U.; LI, H.; LIU, P. Developing Conversion Factors of LCIA Methods for Comparison of LCA Results in the Construction Sector. **Sustainability**, 13, 9016, 2021.

EEA. **Indicator Specification**. European Environment Agency. 2015.

FRIDELL, E.; HAEGER-EUGENSON, M.; MOLDOVANA; J. **A comparison of emissions from ethanol and petrol fueled cars**. Swedish: Environmental Research Institute, 2010.

GNANSOUNOU, E, DAURIAT, A. Ethanol fuel from biomass: A review. **CSIR-NISCAIR**, v.64, p. 809-821, 2005.

GONÇALVES, A. R. **Hepatotoxicidade da dimetilformamida / Hepatotoxicity of dimethylformamide**, 1997.

HU J, MA PX. **Nano-fibrous tissue engineering scaffolds capable of growth factor delivery**. *Pharm Res*. 28(6):1273-81, 2011.

ISO 14040. **Gestão ambiental- avaliação do ciclo de vida- princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ISO 14044. **Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines**. Geneva: ISO. 46p, 2006.

LOUVIS, A. R.; SILVA, N. A. A. **Métodos de Preparação Industrial de Solventes e Reagentes Químicos N,N-DIMETILFORMAMIDA**. *Rev. Virtual Quim.*, 8 (5), 1764-1785, 2016.

LU, J.; YU, H.; CHEN, C. Biological properties of calcium phosphate biomaterials for bone repair: a review. *RSC Advances*, v.8, iss.4, 2018.

MEDEIROS, E. S. et al. Solution Blow Spinning: A new method to produce micro and nanofibers from polymer solutions. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 113, p. 2322-2330, 2009.

OLIVEIRA, M. J. C. et al. **Calcium phosphate submicrometric fibers produced by solution blow spinning**. *Materials Research*, v. 22, p. 1-8, 2019.

RAMBHIA, K. J., MA, P. X. Controlled drug release for tissue engineering. **Journal of Controlled Release**, v. 219, p. 119-128, 2015.

RODRIGUES, G. S.; MARTINS, R. A. **Efeitos potenciais do ozônio troposférico sobre as plantas cultivadas e o biomonitoramento ambiental.** São Paulo: Embrapa, 2001.

Saouter, E., Biganzoli, F., Ceriani, L., Versteeg, D., Crenna, E., Zampori, L., Sala, S., Pant, R. **Environmental Footprint: Update of Life Cycle Impact Assessment Methods – Ecotoxicity freshwater, human toxicity cancer, and non-cancer.** EUR 29495 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018.

SIMON, B. BACHTIN, K., KILIÇ, A., AMOR, B., WEIL, M. Proposal of a Framework for Scale-Up Life Cycle Inventory: A Case of Nanofibers for Lithium Iron Phosphate Cathode Applications. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 12, p. 465–477, 2016.

SOUZA, R. B, et al. **A influência do etanol combustível na emissão de etanol, aldeídos e hidrocarbonetos expelidos pelo escapamento em veículos leves.** São Paulo: CETESB, 2016.

U.S. EPA. **Health And Environmental Effects Profile for Trimethyl Phosphate.** U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/X-85/367 (NTIS PB88182720).

ZAIRANI, N. A. S. et al. Fabrication and characterization of porous  $\beta$ -tricalcium phosphate scaffolds coated with alginate. **Ceramics International**, v. 42, p. 5141-5147, 2016.

ZAMPORI, L. e PANT, R., Sugestões para atualizar o método da pegada ambiental do produto (PEF), EUR 29682 EN, **Serviço de Publicações da União Europeia**, Luxemburgo, 2019.