

ELETROFIAÇÃO: UMA ALTERNATIVA PARA A PRODUÇÃO DE NÃOTECIDOS

ELECTROSPINNING: AN ALTERNATIVE FOR NONWOVENS' PRODUCTION

VENTURELLI, Rafaela Bohaczuk¹
GRIPA, Sidnei²

RESUMO: Eletrofiação, conhecida internacionalmente como *electrospinning*, é uma técnica patenteada por Formhals, em 1974, mas que somente no momento vem sendo explorada de forma mais consistente, devido aos avanços da indústria têxtil no desenvolvimento de tecidos e não tecidos com propriedades especiais. Os não tecidos produzidos através da eletrofiação podem possuir as mais diversas características, possibilitando sua aplicação em diversos seguimentos, de acordo com várias áreas de aplicações, como por exemplo engenharia de tecido, cicatrização de ferida, liberação controlada, sensores, membranas de seleção e recuperação de metais. Por meio da eletrofiação é possível produzir fibras poliméricas de tamanhos micrométrico, sub-micron ou nanométrico. O presente trabalho tem o objetivo de apresentar esta técnica de produção de não tecidos que está em crescente demanda no mercado internacional. Com a presente revisão, a eletrofiação mostrou-se uma alternativa para a produção de tecido tecnológicos e inteligentes, com propriedades específicas das mais variadas. Ainda assim, a técnica é pouco desenvolvida industrialmente. Com a abrangência e forte concorrência do mercado asiático, a melhoria e desenvolvimento de produtos têxteis são cada vez mais importantes.

Palavras-Chave: Eletrofiação. Não tecidos. Têxtil.

ABSTRACT: *Known internationally as electrospinning, is a technique patented by Formhals in 1974, but only now being seen to be exploited more consistently due to the advances of the textile industry in the development of fabrics and nonwovens with special properties. Nonwovens produced by electrospinning can have several characteristics, allowing their application in several segments, according to application areas, such as tissue engineering, wound healing, controlled release, sensors, selection membranes and recovery metals. Through electrospinning it is possible to produce polymer fibers of micrometric, sub-micron or nanometer sizes. The present work has the objective of presenting this technique of production of nonwovens, which is in increasing demand in the international market. With the present review, electrospinning has proved to be an alternative to produce technological and intelligent fabrics, with several specific properties. Still, the technique is poorly developed industrially. With the strong competition of the Asian market, the improvement and development of textile products are increasingly important.*

¹Doutora em Engenharia Química, professora no Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE, rafaella.knop@unifebe.edu.br

²Mestre em Engenharia de Produção, professor no Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE, gripa@unifebe.edu.br



Keywords: *Electrospinning. Nonwoven. Textile.*

1 INTRODUÇÃO

Um método cada vez mais popular para a produção de nãotecidos é o *electrospinning* (eletrofiação). Eletrofiação é uma técnica utilizada em múltiplas áreas na qual fibras com tamanhos menores que 100 nm são criadas em filamentos contínuos. As fibras eletrofiadas são extremamente finas, tornando-as úteis em uma ampla gama de aplicações avançadas, cobrindo as seguintes áreas de aplicação: filtração seletiva de líquidos, membranas de atividade, por exemplo, para recuperação dos íons metálicos, engenharia de tecidos, sensores, ou materiais de barreira para aplicações de armazenamento de energia (KWANKHAO, 2013).

A técnica de *electrospinning*, ou eletrofiação, utiliza um campo elétrico para produzir micro e nano fibras a partir de uma solução polimérica. É um processo simples e ao mesmo tempo eficaz para a produção de nanofibras. Apesar de ter sido patenteada pela primeira vez em 1934 por Formhals, a eletrofiação só se tornou popular nos anos 90 devido ao crescente interesse em nanotecnologia e a busca de novos materiais. Desde então, a maior parte das pesquisas concentraram-se em quais polímeros podem ser eletrofiados e na otimização do processo de eletrofiação para aplicações específicas.

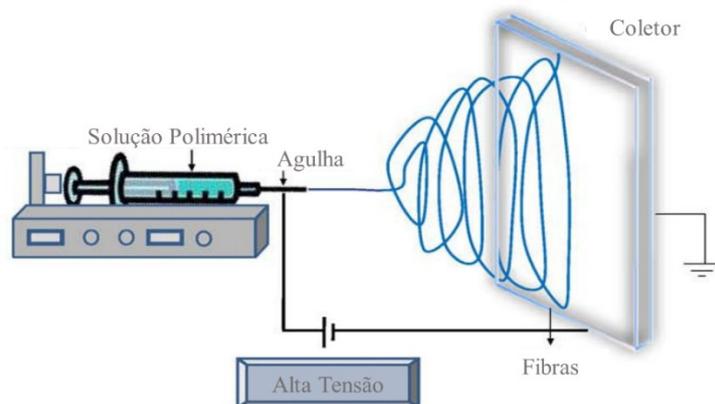
O processo de eletrofiação pode produzir fibras poliméricas de tamanhos micrometro (10-100 μm) para sub-micron ou nanometro (0,01-0,1 μm). Isso levou a criar algumas características especiais, tais como área de superfície elevada em relação ao volume (10^3 vezes maiores que a microfibras), alta porosidade e tamanho de poros pequenos. A nanofibra eletrofiada é extremamente fina o que a torna muito útil em várias aplicações avançadas, como por exemplo filtração seletiva de líquidos, membranas de atividade, por exemplo recuperação de íons metálicos, engenharia de tecidos, sensores, barreiras de materiais para armazenamento de energia (KWANKHAO, 2013).

No processo de eletrofiação, um polímero em solução é transformado numa matriz fibrosa por aplicação de uma diferença de potencial muito elevada. As fibras formadas distinguem-se das fibras obtidas pelos processos convencionais devido ao seu diâmetro reduzido. A configuração padrão do sistema de eletrofiação consiste de uma fonte de



alimentação de alta tensão, uma bomba de seringa com seringa e uma agulha metálica, e um coletor ligado à terra. Durante o processo de eletrofiação, uma corrente de alta voltagem é aplicada para criar jato eletricamente carregado de uma solução polimérica. À medida que este jato viajar da ponta da agulha para o coletor, as moléculas de polímeros são esticadas e o solvente evapora-se, gerando a fibra (VELEIRINHO *et al.*, 2008). Os instrumentos básicos de eletrofiação incluem uma fonte de alta tensão, uma agulha de diâmetro pequeno, um coletor, uma bomba de infusão e um tubo capilar com a solução polimérica, como apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Vista esquemática de um equipamento de eletrofiação: fonte de alta tensão, uma agulha de diâmetro pequeno, um coletor, uma bomba de infusão e um tubo capilar com a solução polimérica

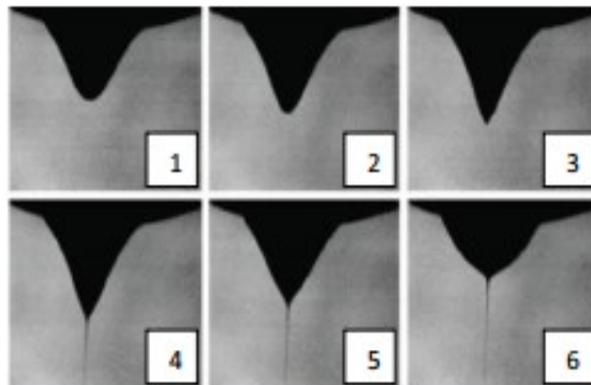


(Fonte: POLYMER PHYSICS LABORATORY).

Uma fonte de alimentação de alta tensão é utilizada para criar um campo elétrico entre a solução polimérica e o coletor. Quando a diferença de potencial é aplicada entre a agulha e o coletor, a gota adquire a forma de um cone, formando uma estrutura denominada por cone de Taylor. Sob condições apropriadas, ocorrerá a formação de um jato de solução eletricamente carregado, que se dirige para o coletor. Durante a trajetória deste jato, as moléculas de polímeros sofrem estiramento e o solvente é evaporado, formando fibras que são recolhidas no coletor (MCCANN *et al.*, 2005; KWANKHAO, 2013). A evolução do menisco de solução de óxido de polietileno com água durante a formação do jato sob o campo elétrico é mostrada na Figura 2.



Figura 2 - Evolução da forma do menisco da solução de óxido de polietileno em água sob um campo elétrico.



Fonte: KWANKHAO, 2013.

Nota. O menisco é primeiro transformado em uma forma cônica pelo potencial elétrico aplicado (1,2) A ponta arredondada, torna-se mais nítida (3), e um jato é finalmente emitido a partir da ponta do cone (4). A forma de cone é alterada para uma nova forma, estável e arredondada (5), que persiste enquanto a solução levada pelo jato é substituída por um fluido que flui para o menisco (6).

Normalmente, essas fibras são coletadas na forma de malhas de tecidos-não-tecido fibrosos (fibras desalinhadas). No entanto, recentemente, têm sido desenvolvidas configurações inovadoras do sistema, de modo a obter fibras alinhadas (CHEW *et al.*, 2005; SUBRAMANIAN *et al.*, 2005) e fios (DALTON *et al.*, 2005; SMIT *et al.*, 2005).

Atualmente já foram produzidas por eletrofiação nanofibras de diversos polímeros e biopolímeros, o que demonstra a excepcional versatilidade desta técnica. A maior parte dos biopolímeros apresentam uma série de atributos, tais como a hidrofiliidade, a não toxicidade e biocompatibilidade, que os torna vantajosos em muitas aplicações, face aos polímeros sintéticos. Estes compostos apresentam ainda a vantagem de serem, normalmente, menos poluentes e provenientes de fontes renováveis. No entanto, o sucesso do processo de eletrofiação é mais difícil de ser alcançado no caso dos biopolímeros e as matrizes obtidas apresentam, em geral, inferior qualidade mecânica. Alguns exemplos de biopolímeros a partir dos quais foram desenvolvidas nanofibras por *electrospinning* são: quitosana, colágeno, gelatina, seda, alginato, proteína da membrana do ovo, caseína, proteína de trigo e dextrano (GENG *et al.*, 2005; SUBRAMANIAN *et al.*, 2005; LI & HSIEH, 2006; BUTTAFOCO *et al.* 2006; RHO *et al.* 2006; KI *et al.*, 2005; ZHANG *et al.*, 2006; BHATTARAI *et al.*, 2006; WOERDEMAN *et al.*, 2005). Em relação aos polímeros sintéticos destacam-se o poli (tereftalato de etileno) (PET), o poliestireno, o álcool polivinílico (PVA), poli (óxido de etileno) (PEO) e ácido polilático



(PLA) (MA *et al.*, 2005; WANNATONG *et al.*, 2004; KOSKI *et al.*, 2004; CHEN *et al.*, 2008; IMMICH *et al.*, 2013).

Os nãotecidos eletrofiados são caracterizados por uma alta porosidade, poros de tamanhos pequenos e interligados, e uma alta área de superfície por unidade de volume. Estas características fazem os nãotecidos eletrofiados terem uma variedade de aplicações, incluindo filtração (SHIN *et al.* 2005; GOPAL *et al.* 2006), roupas de proteção (SCHREUDER-GIBSON *et al.* 2002), e aplicações biomédicas (BARNES *et al.* 2007; POWELL & BOYCE 2007; SIKAREEPAISAN *et al.* 2008).

Uma das vantagens mais importantes da técnica de eletrofiação é a versatilidade. Morfologias diversas podem ser alcançadas variando a configuração e os parâmetros do processo. Dependendo das configurações pode-se desenvolver nãotecido alinhados (LI *et al.*, 2003), porosos (HSU & SHIVKUMAR, 2004), ocos (LI & XIA, 2004), e nanofibras de núcleo-revestimento (SUN *et al.*, 2003). Além disso, muitos estudos sistemáticos trouxeram avanços no conhecimento dos parâmetros que regem o processo de eletrofiação. Apesar disto, a otimização do sistema de eletrofiação ainda é trabalhosa, devido ao elevado número de parâmetros que afetam o processo e a interdependência entre eles. A configuração e otimização dos parâmetros de eletrofiação são fortemente relacionados com o polímero e o solvente.

2 PARÂMETROS DO PROCESSO DE ELETROFIAÇÃO

A escassez de estudos de otimização e caracterização de propriedades mecânicas de matrizes produzidas por eletrofiação constitui uma grande limitação para a aplicação das matrizes como membrana de filtração. Assim, o desenvolvimento de um sistema que satisfaça estas características, bem como a sua caracterização, é um passo fundamental para o avanço desta nova tecnologia.

No processo de eletrofiação, muitos parâmetros (por exemplo, solução polimérica, potencial elétrico, distância entre agulha e coletor, umidade e temperatura) podem influenciar nas propriedades e performance das nanofibras eletrofiadas. É possível obter nanofibras com diferentes morfologias, tamanho de poro, diâmetro, etc., variando estes parâmetros (KWANKHAO, 2013).



Existem vários parâmetros que podem afetar a morfologia e as propriedades das fibras obtidas por eletrofiação. Estes parâmetros podem ser divididos em três grupos: propriedades intrínsecas da solução (viscosidade, concentração do polímero, massa molecular do polímero, condutividade, constante dielétrica, elasticidade e tensão superficial), condições operacionais (voltagem aplicada, distância entre a agulha e o coletor, velocidade do fluxo e diâmetro da seringa) e condições ambientais (temperatura, humidade e pressão atmosférica) (TAN *et al.*, 2005).

Vários estudos foram desenvolvidos com o intuito de avaliar a influência destes parâmetros no processo de eletrofiação e nas características das nanofibras (TAN *et al.*, 2005; YANG *et al.*, 2006). Destes estudos resultaram importantes conclusões que permitem uma compreensão mais aprofundada do processo e são deste modo importantes para a criação de novos sistemas de eletrofiação. No entanto, o efeito dos diferentes parâmetros está fortemente ligado ao sistema polímero/solvente em estudo e é difícil extrapolar as conclusões para um sistema diferente. Assim, o desenvolvimento do sistema de eletrofiação para um novo sistema polímero/solvente implica sempre uma etapa de otimização dos parâmetros, de modo a se obterem nanofibras com as características pretendidas. O grande número de parâmetros envolvidos e a interdependência existente entre eles torna o processo de otimização difícil e demorado. A compreensão do modo como estes parâmetros atuam pode facilitar este processo.

A composição química da solução de eletrofiação é componente fundamental das propriedades físico-químicas, mecânicas e biológicas do material eletrofiado. Pode-se controlar a morfologia, especialmente o tamanho das fibras, variando a concentração e a massa molar do polímero. Utilizando uma alta concentração e/ou uma alta massa molar, obtêm-se como resultado, um aumento no diâmetro da fibra, consequência do aumento da viscosidade. O diâmetro das fibras de PET, por exemplo, pode aumentar de 201 nm a 729 nm, alterando a concentração da solução de 10 para 30%*m/m*. (VELEIRINHO *et al.*, 2008). Koski *et al.* (2004) relataram os diâmetros das fibras de PVA aumentado de 250 nm a 2 mm, através do aumento da concentração de polímero e da massa molar.

No caso de misturas de polímeros, alterar a concentração de polímero pode modificar não só a morfologia, mas também, modificar propriedades mecânicas e físico-químicas do não tecido eletrofiado. Por exemplo, através do aumento da concentração de



quitosana em sistemas híbridos de PVA e quitosana, melhora-se a uniformidade das fibras (LIN *et al.*, 2006). Modificações nas propriedades mecânicas também foram obtidas pela mudança de concentração em blendas de pululana e PVA (KARIM & ISLAM, 2011). Em misturas de PVA e quitosana, o aumento da quantidade de quitosana na solução polimérica, resultou em diâmetros de fibras menores (ALIPOUR *et al.*, 2009).

O efeito do solvente é complexo uma vez que várias propriedades afetam o processo de eletrofição. Em geral, os solventes de baixa tensão superficial, elevada volatilidade, e maior constante dielétrica, melhoram a eletrofiabilidade e diminuem o diâmetro das fibras eletrofiadas (VELEIRINHO *et al.*, 2008; CHUANGCHOTE *et al.* 2009).

3 ESTRUTURA DAS NANOFIBRAS

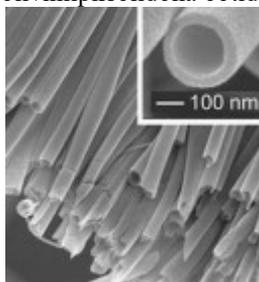
A técnica de eletrofição permite obter além de excelentes propriedades (PICCIANI *et al.*, 2009), os mais diversos tipos de fibras por meio de simples ajustes nas variáveis de processo (MEDEIROS *et al.*, 2009), tornando-se muito versátil (COSTA *et al.*, 2012).

Devido a suas aplicações em membranas de liberação controlada, sensoriamento, separação, catálise, armazenamento e estoque de energia, os nanotubos poliméricos vem sendo pesquisados (MCCANN *et al.*, 2005; LI & XIA, 2004). Normalmente os nanotubos são desenvolvidos através da técnica de eletrofição coaxial (MCCANN *et al.*, 2005). Nessa técnica, a agulha ou capilar, usualmente empregado é substituído por um sistema de dois capilares concêntricos que ejetam soluções de forma independente. Assim, a fibra final será constituída por dois materiais (COSTA *et al.*, 2012).

McCann *et al.* propuseram em 2005 um sistema de eletrofição coaxial estável baseado em soluções imiscíveis, seguido de uma reticulação e estabilização da camada exterior da estrutura *core-shell*. Em seus trabalhos foram empregados na estrutura *shell* polivinilpirrolidona (PVP) e isopropóxido de titânio e um óleo mineral como *core*. Uma estrutura de nanotubos (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** 3) pôde ser obtida após a extração do óleo mineral por meio do emprego de um solvente adequado (LI & XIA, 2004).



Figura 3 - Nanotubos de polivinilpirrolidona obtidos por eletrofiação coaxial.



Fonte: McCann *et al.*, 2005.

As fibras obtidas por eletrofiação podem conter poros, para facilitar a liberação de algum composto. Alguns autores (MEGELSKI *et al.*, 2002; CASPER *et al.*, 2004), apontam que o fenômeno de formação de poros nas nanofibras obtidas por eletrofiação se dá devido à evaporação do solvente. Durante a evaporação do solvente a solução torna-se termodinamicamente instável. Este fenômeno ocorre devido à formação de duas fases na nanofibra, uma rica em polímero e outra rica em solvente. Desta forma a fase rica em polímero se solidifica logo que ocorre a segregação das duas fases enquanto que a evaporação do solvente ocasiona a formação de nanofibras porosas (COSTA *et al.*, 2012).

Um grande desafio da comunidade científica é o controle da orientação espacial das fibras, para que sejam obtidas de forma alinhada, por exemplo. Outro problema comum, é a formação de contas ou *beads*. As contas são aglomerados poliméricos que se formam durante a eletrofiação, e podem interferir nas propriedades dos nãotecidos produzidos.

Vários fatores podem afetar a formação das contas nas nanofibras, como a viscoelasticidade da solução, a voltagem aplicada, a densidade de cargas elétricas e a tensão superficial da solução. Jeong *et al.* (2005) investigaram o efeito de diversos solventes na morfologia de fibras de poli (butileno succinato), PBS. Uma forte relação entre o solvente ou mistura de solventes empregados e a formação de contas foi observada (COSTA *et al.*, 2012).

4 APLICAÇÕES DAS NANOFIBRAS



As nanofibras eletrofiadas possuem uma ampla faixa de propriedades como alta área superficial por razão de volume, alta porosidade e tamanho de poro reduzido. Isto faz com que as nanofibras sejam utilizadas em diversos seguimentos, de acordo com várias áreas de aplicações, como por exemplo engenharia de tecido, cicatrização de ferida, liberação controlada, sensores, membranas de seleção e recuperação de metais (KWANKHAO, 2013).

A enorme gama de possibilidades abertas pelo processo de eletrofiação permite que diferentes aplicações sejam derivadas destes materiais, desde aplicações objetivas para o polímero em questão até outras, não tão usuais.

Wu et al., 2007, estudaram as propriedades magnéticas de nanofibras de ferro, níquel e cobalto obtidas por eletrofiação. Estas novas nanofibras magnéticas têm potencial para emprego em sensores magnéticos, magnetos flexíveis e dispositivos de armazenamento de dados (COSTA *et al.*, 2012).

Segundo Costa e colaboradores, 2012, o desenvolvimento de nanocompósitos também guarda ainda muitas possibilidades de avanço, tanto em novos sistemas polímero/carga quanto na aplicação industrial destes materiais. Reforço de materiais de engenharia, membranas de filtração com alta seletividade, recobrimento de próteses médicas, nanoatuadores magnéticos, são apenas algumas das inúmeras possibilidades de aplicação destes compósitos nanoestruturados.

O PLA tem sido amplamente estudado na área de biomateriais e liberação de fármacos, por se tratar de um polímero biodegradável e biocompatível. Immich *et al.*, 2013, estudaram a liberação de ibuprofeno a partir de uma membrana eletrofiada de PLA e verificaram que a liberação do fármaco é fortemente dependente da espessura da membrana eletrofiada e não da concentração de fármaco existente.

Os nãotecidos de materiais poliméricos biocompatíveis também têm sido utilizados na substituição de tecidos ou órgãos em seres humanos, para que o paciente tenha uma rápida recuperação. Na literatura, foi reportada a aplicação destas nanofibras como parte de próteses (YOSHIMOTO *et al.*, 2003), vasos sanguíneos (VENUGOPAL & RAMAKRISHNA, 2005), pele artificial (DAI *et al.*, 2004), biossensores e liberação controlada de fármacos (SILL & VON RECUM, 2008; IMMICH *et al.*, 2013), *scaffolds* (PHAM *et al.*, 2006) e curativos (KHIL *et al.*, 2003).



Sensores de nanoestruturas fibrilares também têm sido objeto de estudo. Os principais benefícios são a altíssima área superficial, principalmente quando fibras porosas são utilizadas. As nanofibras podem ser utilizadas tanto como suporte de alta área, por exemplo, para enzimas, quanto como material transdutor em si, por exemplo, monitorando variações de condutividade ou constante dielétrica que ocorrem no material quando da sorção de determinado analito. Outra possibilidade é a modulação das propriedades óticas das fibras quando em contato com a substância de interesse, detectável por colorimetria, fluorimetria, refratometria, entre outras possibilidades (COSTA *et al.*, 2012).

Buscando o desenvolvimento de novos produtos com maior valor agregado voltados para o agronegócio, alguns grupos de pesquisa vêm publicando trabalhos relativos ao emprego de nanofibras obtidas pela técnica de eletrofiação em barreiras protetoras a pesticidas (LEE & OBENDORF, 2007), membranas de clarificação de suco de maçã (VELEIRINHO & LOPES-DA-SILVA, 2009), nanofibras de seda (OHGO *et al.*, 2003; TORRES-GINER *et al.*, 2008), embalagens ativas (TAEPAIBOON *et al.*, 2007; VEGA-LUGO & LIM, 2009) e liberação controlada de vitaminas (TAEPAIBOON *et al.*, 2007).

5 CONCLUSÕES

A eletrofiação é uma alternativa versátil para a produção de artigos com aplicações nas áreas da saúde como implantes, tecidos com finalidades biomédicas, com incorporação de fármacos, suporte para crescimento celular e regeneração de tecidos humanos lesionados, tecidos com liberação controlada de fármacos, catalisadores, nanotubos, encapsulamentos de produtos ativos, etc.

Conclui-se que a eletrofiação é uma alternativa para a produção de tecido tecnológicos e inteligentes, com propriedades específicas, das mais variadas. Ainda assim, a técnica é pouco desenvolvida industrialmente, apesar de patenteada em 1974. Com a abrangência e forte concorrência do mercado asiático, a melhoria e desenvolvimento de produtos têxteis são cada vez mais importantes.



REFERÊNCIAS

- ALIPOUR, Shiva M.; NOURI, Mahdi; MOKHTARI, Javad; BAHRAMI, S. Hagir. **Electrospinning of poly(vinyl alcohol)-water-soluble quaternized chitosan derivative blend**. Carbohydrate Research, 344, p. 2496-2501, 2009. Doi: 10.1016/j.carres.2009.10.004
- BARNES, Catherine P.; SELL, Scott A.; BOLAND, Eugene D.; SIMPSON, David G.; BOWLIN, Gary L. **Nanofiber technology: Designing the next generation of tissue engineering scaffolds**. Advanced Drug Delivery Reviews, 59, p. 1413 – 1433, 2007. Doi: 10.1016/j.addr.2007.04.022
- BHATTARAI, Narayan; LI, Zhensheng; EDMONDSON, Dennis; ZHANG, Miqin. **Alginate-based nanofibrous scaffolds: Structural, mechanical, and biological properties**. Advanced Materials, 18, p. 1463 - 1467, 2006. Doi: 10.1002/adma.200502537
- BUTTAFOCO, L.; KOLKMAN, N. G.; ENGBERS -BUIJTENHUIJS, P.; POOT, A. A.; DIJKSTRA, P. J.; VERMES, I.; FEIJEN, J. **Electrospinning of collagen and elastin for tissue engineering applications**. Biomaterials, 27, p. 724 – 734, 2006. Doi: 10.1016/j.biomaterials.2005.06.024
- CASPER, Cheryl L.; STEPHENS, Jean S.; TASSI, Nancy G.; CHASE, D. Bruce; RABOLT, John F. **Controlling surface morphology of electrospun polystyrene fibers: Effect of humidity and molecular weight in the electrospinning process**. Macromolecules, 37, p. 573 – 578, 2004. Doi: 10.1021/ma0351975
- CHEN, Jyh –Ping; CHANG, Gwo –Yun; CHEN, Jan –Kan. **Electrospun collagen/chitosan nanofibrous membrane as wound dressing**. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 313 – 314, p. 183 – 188, 2008. Doi: 10.1016/j.colsurfa.2007.04.129
- CHEW, Sing Yian; WEN, Jie; YIM, Evelyn K. F.; LEONG, Kam W. **Sustained release of proteins from electrospun biodegradable fibers**. Biomacromolecules, 6, p. 2017 – 2024, 2005. Doi: 10.1021/bm0501149
- CHUANGCHOTE, Surawut; SAGAWA, Takashi; YOSHIKAWA, Susumu. **Electrospinning of poly(vinyl pyrrolidone): Effects of solvents on electrospinnability for the fabrication of poly(p-phenylene vinylene) and TiO(2) nanofibers**. Journal of Applied Polymer Science, 114, p. 2777 – 2791, 2009. Doi: 10.1002/app.30637



COSTA, R. G. F.; OLIVEIRA, J. E. De; PAULA, G. F. De; MEDEIROS, E. S. De; RIBEIRO, C.; MATTOSO, L. H. C.; INSTRUMENTAÇÃO, E.; CARLOS, S. **Parte I : Fundamentação Teórica**. *Polímeros*, v. 22, p. 170–177, 2012.

DAI, N. -T.; WILLIAMSON, M. R.; KHAMMO, N.; ADAMS, E. F.; COOBES, A. G. A. **Composite cell support membranes based on collagen and polycaprolactone for tissue engineering of skin**. *Biomaterials*, 25, p. 4263-4271, 2004. Doi: 10.1016/j.biomaterials.2003.11.022

DALTON, Paul D.; KLEE, Doris; MOLLER, Martin. **Electrospinning with dual collection rings**. *Polymer*, 46, p. 611 – 614, 2005. Doi: 10.1016/j.polymer.2004.11.075

GENG, Xinying; KWON, Oh –Hyeong; JANG, Jinho. **Electrospinning of chitosan dissolved in concentrated acetic acid solution**. *Biomaterials*, 26, p. 5427 – 5432, 2005. Doi: 10.1016/j.biomaterials.2005.01.066

GOPAL, Renuga; KAUR, Satinderpal; MA, Zuwei; CHAN, Casey; RAMAKRISHNA, Seeram; MATSUURA, Takeshi. **Electrospun nanofibrous filtration membrane**. *Journal of Membrane Science*, 281, p. 581 – 586, 2006. Doi: 10.1016/j.memsci.2006.04.026

HSU, Chen –Ming; SHIVKUMAR, S. **Nano –sized beads and porous fiber constructs of poly(ϵ -caprolactone) produced by electrospinning**. *Journal of Materials Science*, 39, p. 3003 – 3013, 2004. Doi: 10.1023/b:jmsc.0000025826.36080.cf

IMMICH, A. P. S.; ARIAS, M. L.; CARRERAS, N.; BOEMO, R. L.; TORNERO, J. A. **Drug delivery systems using sandwich configurations of electrospun poly(lactic acid) nanofiber membranes and ibuprofen**. *Materials Science and Engineering C*, v. 33, n. 7, p. 4002–4008, 2013.

JEONG, Eun Hwan; IM, Seung Soon; YOUK, Ji Ho. **Electrospinning and structural characterization of ultrafine poly(butylene succinate) fibers**. *Polymer*, 46, p. 9538 – 9543, 2005. Doi: 10.1016/j.polymer.2005.07.100

KARIM, Mohammad Rezaul; ISLAM, Md. Shahidul. **Thermal behavior with mechanical property of fluorinated silane functionalized superhydrophobic pullulan/poly(vinyl alcohol) blends by electrospinning method**. *Journal of Nanomaterials*, p. 1 – 7, 2011. Doi: 10.1155/2011/979458

KHIL, Myung –Seob; CHA, Dong –II; KIM, Hak –Yong; KIM, In –Shink; BHATTARAI, Narayan. **Electrospun nanofibrous polyurethane membrane as wound dressing**. *Journal of Biomedical Research Part B – Applied Biomaterials*, 67B, p. 675 – 679, 2003. Doi: 10.1002/jbm.b.10058

KI, Chang Seok; BAEK, Doo Hyun; GANG, Kyung Don; LEE, Ki Hoon; UM, In Chul; PARK, Young Hwan. **Characterization of gelatin nanofiber prepared from gelatin-**



formic acid solution. Polymer, 46, p. 5094 – 5102, 2005. Doi: 10.1016/j.polymer.2005.04.040

KOSKI, A; YIM, K; SHIVKUMAR, S. **Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning.** Materials Letters, 58, p. 493 – 497, 2004. Doi: 10.1016/s0167-577x(03)00532-9

KWANKHAO, Bintasan. **Microfiltration membranes via electrospinning of polyethersulfone solutions.** Thesis. Department of Chemistry of University of Duisburg – Essen, 2013.

LEE, Seungsin; OBENDORF, S. Kay. **Use of electrospun nanofiber web for protective textile materials as barriers to liquid penetration.** Textile Research Journal, 77, p. 696 – 702, 2007. Doi: 10.1177/0040517507080284

LI, Dan; WANG, Yuliang; XIA, Younan. **Electrospinning of polymeric and ceramic nanofibers as uniaxially aligned arrays.** Nano Letters, 3, p. 1167 – 1171, 2003. Doi: 10.1021/nl0344256

LI, Dan; XIA, Younan. **Direct fabrication of composite and ceramic hollow nanofibers by electrospinning.** Nano Letters, 4, p. 933 – 938, 2004. Doi: 10.1021/nl049590f

LI, Lei; HSIEH, You –Lo. **Chitosan bicomponent nanofibers and nanoporous fibers.** Carbohydrate Research, 341, p. 374 – 381, 2006. Doi: 10.1016/j.carres.2005.11.028

LIN, Tong; FANG, Jian; WANG, Hongxia; CHENG, Tong; WANG, Xungai. **Using chitosan as a thickener for electrospinning dilute PVA solutions to improve fibre uniformity.** Nanotechnology, 17, p. 3718 – 3723, 2006. Doi: 10.1088/0957-4484/17/15/017

MA, Zuwei; KOTAKI, Masaya; YONG, Thomas; HE, Wei; RAMAKRISHNA, Seeram. **Surface engineering of electrospun polyethylene terephthalate (PET) nanofibers towards development of a new material for blood vessel engineering.** Biomaterials, 26, p. 2527 – 2536, 2005. Doi: 10.1016/j.biomaterials.2004.07.026

MCCANN, Jesse T.; LI, Dan; XIA, Younan. **Electrospinning of nanofibers with coresheath, hollow, or porous structures.** Journal of Materials Chemistry, 15, p. 735 – 738, 2005. Doi: 10.1039/b415094e

MEDEIROS, Eliton S.; GLENN, Gregory M.; KLAMCZYNSKI, Artur P.; ORTS, William J.; MATTOSO, Luiz H. C. **Solution blow spinning: a new method to produce micro- and nanofibers from polymer solutions.** Journal of Applied Polymer Science, 113, p. 2322–2330, 2009. Doi: 10.1002/app.30275



MEGELSKI, Silke; STEPHENS, Jean S.; CHASE, D. Bruce; RABOLT, John F. **Micro and nanostructured surface morphology on electrospun polymer fibers.**

Macromolecules, 35, p. 8456 – 8466, 2002. Doi: 10.1021/ma020444a

OHGO, Kosuke; ZHAO, Chenhua; KOBAYASHI, Mitsuhiro; ASAKURA, Tetsuo. **Preparation of non-woven nanofibers of Bombyx mori silk, Samia cynthia ricini silk and recombinant hybrid silk with electrospinning method.** Polymer, 44, p. 841 – 846, 2003. Doi: 10.1016/S0032-3861(02)00819-4

PHAM, Quynh P.; SHARMA, Upma; MIKOS, Antonios G. 2006. **Electrospinning of polymeric nanofibers for tissue engineering applications: a review.** Tissue engineering, 12, p. 1197 – 1212, 2006. Doi: 10.1089/ten.2006.12.1197

PICCIANI, Paulo H. S.; MEDEIROS, Eliton S.; PAN, Zhongli; ORTS, William J.; MATTOSO, Luiz H. C.; SOARES, Bluma G. **Development of conducting polyaniline/poly (lactic acid) nanofibers by electrospinning.** Journal of Applied Polymer Science, 112, p. 744 – 753, 2009. Doi: 10.1002/app.29447

POLYMER PHYSICS LABORATORY. **Institute of Fundamental Technological Research.** Disponivel em: <http://ppl.ippt.gov.pl/18-few-words-about/17-electrospinning>. Acesso: 25/04/2015.

POWELL, H. M.; BOYCE, S. T. **Fiber density of electrospun gelatin scaffolds regulates morphogenesis of dermal-epidermal skin substitutes.** Journal of Biomedical Materials Research Part A, 84, p. 1078 – 1086, 2007. Doi: 10.1002/jbm.a.31498

RHO, Kyong Su; JEONG, Lim; LEE, Gene; SEO, Byoung –Moo; PARK, Yoon Jeong; HONG, Seong –Doo; ROH, Sangho; CHO, Jae Jin; PARK, Won Ho; MIN, Byung – Moo. **Electrospinning of collagen nanofibers: Effects on the behavior of normal human keratinocytes and early-stage wound healing.** Biomaterials, 27, p. 1452 – 1461, 2006. Doi: 10.1016/j.biomaterials.2005.08.004

SCHREUDER-GIBSON, H., P. GIBSON, K. SENEAL, M. SENNETT, J. WALKER, W. YEOMANS, D. ZIEGLER, AND P. P. TSAI. 2002. **Protective textile materials based on electrospun nanofibers.** Journal of Advanced Materials 34 (3):44-55.

SHIN, C.; CHASE, G. G.; RENEKER, D. H. **Recycled expanded polystyrene nanofibers applied in filter media.** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 262, p. 211 – 215, 2005. Doi: 10.1016/j.colsurfa.2005.04.034

SIKAREEPAISAN, Panprung; SUKSAMRARN, Apichart; SUPAPHOL, Pitt. **Electrospun gelatin fiber mats containing a herbal - Centella asiatica - extract and release characteristic of asiaticoside.** Nanotechnology, 19, p. 1 – 10, 2008. Doi: 10.1088/0957-4484/19/01/015102



- SILL, Travis J.; VON RECUM, Horst A. **Electrospinning: Applications in drug delivery and tissue engineering**. *Biomaterials*, 29, p. 1989 - 2006, 2008. Doi: 10.1016/j.biomaterials.2008.01.011
- SMIT, Eugene; BUTTNER, Ulrich; SANDERSON, Ronald D. **Continuous yarns from electrospun fibers**. *Polymer*, 46, p. 2419 – 2423, 2005. Doi: 10.1016/j.polymer.2005.02.002
- SUBRAMANIAN, Anuradha; VU, David; LARSEN, Gustavo F.; LIN, Larsen Et Hsin –Yi. **Preparation and evaluation of the electrospun chitosan/PEO fibers for potential applications in cartilage tissue engineering**. *Journal of Biomaterials Science - Polymer Edition*, 16, p. 861 – 873, 2005. Doi: 10.1163/1568562054255682
- SUN, Zaicheng; ZUSSMAN, Eyal; YARIN, Alexander L.; WENDORFF, Joachim H.; GREINER, Andreas. 2003. **Compound core-shell polymer nanofibers by co-electrospinning**. *Advanced Materials*, 15, p. 1929 – 1932, 2003. Doi: 10.1002/adma.200305136
- TAEPAIBOON, Pattama; RUNGSARDTHONG, Uracha; SUPAPHOL, Pitt. **Vitamin-loaded electrospun cellulose acetate nanofiber mats as transdermal and dermal therapeutic agents of vitamin A acid and vitamin E**. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 67, p. 387-397, 2007. Doi: 10.1016/j.ejpb.2007.03.018
- TAN, S. –H.; INAI, R.; KOTAKI, M.; RAMAKRISHNA, S. **Systematic parameter study for ultra-fine fiber fabrication via electrospinning process**. *Polymer*, 46, p. 6128 – 6134, 2005. Doi: 10.1016/j.polymer.2005.05.068
- TORRES-GINER, S.; GIMENEZ, E.; LAGARON, J. M. **Characterization of the morphology and thermal properties of Zein Prolamine nanostructures obtained by electrospinning**. *Food Hydrocolloids*, 22, p. 601-614, 2008. Doi: 10.1016/j.foodhyd.2007.02.005
- VEGA-LUGO, Ana-Cristina; LIM, Loong-Tak. **Controlled release of allyl isothiocyanate using soy protein and poly(lactic acid) electrospun fibers**. *Food Research International*, 42, p. 933-940, 2009. Doi: 10.1016/j.foodres.2009.05.005
- VELEIRINHO, Beatriz; LOPES –DA –SILVA, J. A. **Application of electrospun poly(ethylene terephthalate) nanofiber mat to apple juice clarification**. *Process Biochemistry*, 44, p. 353 – 356, 2009. Doi: 10.1016/j.procbio.2008.11.008
- VELEIRINHO, Beatriz; REI, Manuel F.; LOPES-DA-SILVA; J. A. **Solvent and concentration effects on the properties of electrospun poly(ethylene terephthalate) nanofiber mats**. *Journal of Polymer Science Part B – Polymer Physics*, 46, p. 460 – 471, 2008. Doi: 10.1002/polb.21380



- VENUGOPAL, J.; RAMAKRISHNA, S. **Applications of polymer nanofibers in biomedicine and biotechnology.** Applied Biochemistry and Biotechnology, 125, p. 147-157, 2005. Doi: 10.1385/ABAB:125:3:147
- WANNATONG, Ladawan; SIRIVAT, Anuvat; SUPAPHOL, Pitt. **Effects of solvents on electrospun polymeric fibers: preliminary study on polystyrene.** Polymer International, 53, p. 1851 – 1859, 2004. Doi: 10.1002/pi.1599
- WOERDEMAN, Dara L.; YE, Peng; SHENOY, Suresh; PARNAS, Richard S.; WNEK, Garry E.; TROFIMOVA, Olga. **Electrospun fibers from wheat protein: Investigation of the interplay between molecular structure and the fluid dynamics of the electrospinning process.** Biomacromolecules, 6, p. 707 – 712, 2005. Doi: 10.1021/bm0494545
- WU, Hui; ZHANG, Rui; LIU, Xinxin; LIN, Dandan; PAN, Wei. **Electrospinning of Fe, Co, and Ni nanofibers: synthesis, assembly, and magnetic properties.** Chem. Mater., 19, p. 3506-3511, 2007. Doi: 10.1021/cm070280i
- YANG, Ying; JIA, Zhidong; LI, Qiang; GUAN, Zhicheng. **Experimental investigation of the governing parameters in the electrospinning of polyethylene oxide solution.** Ieee Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 13, p. 580 – 585, 2006. Doi: 10.1109/tdei.2006.1657971
- YOSHIMOTO, H.; SHIN, Y. M.; TERAJ, H.; VACANTI, J. P. **A biodegradable nanofiber scaffold by electrospinning and its potential for bone tissue engineering.** Biomaterials, 24, p. 2077–2082, 2003. Doi: 10.1016/S0142-9612(02)00635-X
- ZHANG, Y. Z.; VENUGOPAL, J; HUANG, Z. –M.; LIM, C. T.; RAMAKRISHNA, S. **Crosslinking of the electrospun gelatin nanofibers.** Polymer, 47, p. 2911 – 2917, 2006. Doi: 10.1016/j.polymer.2006.02.046