

APLICAÇÕES DE ENZIMAS EM POLIURETANO: UMA REVISÃO DAS DISSERTAÇÕES E TESES BRASILEIRAS¹

APPLICATIONS OF ENZYMES IN POLYURETHANE: A REVIEW OF BRAZILIAN DISSERTATIONS AND THESES

**Lucas Repecka Alves², Giovanni Miraveti Carriello³, Guilherme Manassés Pegoraro⁴,
Maira de Lourdes Rezende⁵, Aparecido Junior de Menezes⁶**

RESUMO

Os polímeros conquistaram um espaço importantíssimo dentro da sociedade, em virtude de suas multifuncionalidades. Entretanto, suas estruturas químicas favorecem uma longa permanência indesejada no meio ambiente, como o caso do poliuretano, um polímero sintético na forma de espuma com vastas aplicações. Contudo após usado esse material não pode ser fundido novamente por se tratar de um plástico termorrígido. Assim, emerge-se a importância de pesquisas envolvendo meios para degradar esses materiais e a utilização de enzimas é um meio promissor, pois estas são catalisadores biológicos com objetivo de acelerar reações bioquímicas podendo ser utilizadas na deterioração destes materiais. Usando a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações, durante o período de maio de 2022, realizou-se uma revisão da literatura para tal o buscador booleano, que encontrou 29 trabalhos empregando poliuretano através da utilização dos termos “poliuretano” e “enzima”. Os trabalhos demonstraram uma considerável tendência de aplicações envolvendo imobilização de enzimas com o uso do poliuretano, o que demonstrou uma excelente aplicabilidade para esse fim, porém observa-se uma tímida utilização de enzimas a fim de degradar esse material, que pode gerar um problema ambiental.

Palavras-chave: Plásticos, Degradação, Pós-graduação.

ABSTRACT

Polymers have conquered a very important space within society, due to their multifunctionality. However, their chemical structures favor a long undesired permanence in the environment, as in the case of polyurethane, a synthetic polymer in the form of foam with wide applications. However, once used, this material cannot be melted again because it is a thermoset plastic. Thus, the importance of research involving means to degrade these materials emerges and the use of enzymes is a promising way, as these are biological catalysts with the objective of accelerating biochemical reactions and can be used in the deterioration of these materials. Using the Brazilian Digital Library of Theses and Dissertations, during the period of May 2022, a literature review was carried out for this purpose using the Boolean search engine, which found 29 works using polyurethane through the use of the terms “polyurethane” and “enzyme”. The works showed a considerable tendency of applications involving immobilization of enzymes with the use of polyurethane, which demonstrated an

1 Trabalho de revisão bibliográfica.

2 Mestrando em Ciência dos Materiais pela Universidade Federal de São Carlos. E-mail: lucasrepecka@estudante.ufscar.br

3 Mestrando em Ciência dos Materiais pela Universidade Federal de São Carlos. E-mail: giovannimiraveti@estudante.ufscar.br

4 Mestrando em Ciência dos Materiais pela Universidade Federal de São Carlos. E-mail: guilherme.pegoraro@estudante.ufscar.br

5 Doutora em Nanociência e Materiais Avançados pela Universidade Federal do ABC. Professora da Faculdade de Tecnologia José Crespo Gonzales. E-mail: maira.rezende@fatec.sp.gov.br

6 Doutor em Química pelo Instituto de Química de São Carlos. Professor do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais pela Universidade Federal de São Carlos. E-mail: jrmenezes@ufscar.br

excellent applicability for this purpose, however, there is a timid use of enzymes to degrade this material, which can generate an environmental problem.

Keywords: *Plastics, Degradation, Graduate studies.*

INTRODUÇÃO

Os polímeros, em especial os plásticos, têm um papel de extrema importância dentro do mundo contemporâneo, uma vez que têm substituído diversos materiais convencionais como a madeira e os metais e contribuído para uma melhor qualidade de vida da sociedade. Todavia, esses materiais acabam se acumulando no meio ambiente em razão de sua natureza química que favorece uma alta durabilidade, e conseqüentemente, danos ambientais. Por conta disso, estudos que envolvem a degradação desses materiais por microrganismos como bactérias e fungos através de mecanismos enzimáticos são extremamente relevantes (ALVES *et al.*, 2021a; CANTO, 2019).

Os poliuretanos (PUs) são materiais plásticos que estão presentes nos mais variados segmentos da indústria graças à sua imensa versatilidade, sendo possível citar aplicações desde itens básicos como colchões até aplicações médicas envolvendo implantes. Esse material é fruto da reação entre o isocianato e uma substância contendo grupos (-OH) denominada polioliol, o qual apresenta aparência final de espuma, que pode ser flexível ou rígida. Como qualquer outro material polimérico. O PU também possui implicações ambientais em relação ao seu destino final, neste contexto o uso de enzimas com potencial ação de degradação é de extrema importância, uma vez que determinadas enzimas têm capacidade de degradar o PU eficientemente, resultando em uma menor quantidade de resíduos, além de conferir ao produto final um valor comercial agregado. É relevante destacar a definição de enzima, a qual pode ser descrita como biomoléculas complexas compostas por cadeias de aminoácidos unidas por ligações peptídicas. As enzimas são catalisadores biológicos, as quais promovem a aceleração de reações bioquímicas e podem ser utilizadas na síntese de compostos químicos, e bem como, na degradação de materiais (ALVES *et al.*, 2021a; CANGEMI; SANTOS; NETO, 2009; CANTO, 2019; CENTENARO, 2017; FACIN, 2017; GARCIA, 2010).

De acordo com Santos e Souza (2016), a Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD) é uma importante base nacional que reúne em seu portal uma ampla gama de teses e dissertações defendidas em todo o Brasil, tratando-se de um relevante meio de divulgação da comunidade acadêmica nacional. Com o exposto, o presente trabalho de revisão busca analisar as principais tendências empregando o material (PU), principalmente através da aplicação de enzimas com foco em sua degradação.

COLETA DE DADOS

A coleta de dados referente às dissertações e teses para a revisão foi realizada através da pla-

taforma Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD). Para tanto, foi adaptada uma metodologia proposta por Alves *et al.* (2021b), a qual consiste na aplicação de um operador booleano no campo de pesquisa avançada do portal e para isso foram utilizados os termos do objeto a ser tratado. Dessa forma, foi aplicado o buscador booleano “Poliuretano OR Poliuretana OR Poliuretanos OR Poliuretanas AND Enzima OR Enzimática OR Enzimas OR Enzimáticas”, sem aspas. Seguidamente, foram analisadas todas as dissertações e teses encontradas durante o mês de maio de 2022, em que não foi limitada nenhuma data, com possibilidade de retorno de trabalho de qualquer ano conforme o código definido.

Posteriormente, foram criadas categorias e subcategorias de forma a facilitar a compreensão e a organização do trabalho. As categorias foram criadas conforme as definições trazidas por Carlomagno e Rocha (2016), os quais declaram que:

- a) é preciso existir regras claras sobre os limites e definição de cada categoria; b) as categorias devem ser mutuamente exclusivas (o que está em uma categoria, não pode estar em outra); c) as categorias devem ser homogêneas (não ter coisas muito diferentes entre si, no mesmo grupo); d) é preciso que as categorias esgotem o conteúdo possível (não sobre conteúdos [...] que não se encaixem em alguma categoria); e) é preciso que a classificação seja objetiva, possibilitando a replicação do estudo (CARLOMAGNO; ROCHA, 2016, p. 184).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisados 29 trabalhos entre dissertações e teses, com exceção de apenas um que não foi possível encontrá-lo visto que o arquivo não estava disponível na plataforma no momento que a pesquisa foi executada. Os trabalhos de pós-graduação selecionados para a discussão podem ser observados na tabela 1. Ulteriormente, após serem analisados e selecionados, cada trabalho recebeu uma categoria seguindo as definições de Carlomagno e Rocha (2016). Em seguida, foram criadas 5 categorias e definidos seus respectivos critérios: Estudo computacional, Ciências da saúde, Aplicações de enzimas, Síntese e caracterização e Biomateriais. As categorias foram quantificadas seguindo o critério proposto e sua quantidade pode ser visualizada na tabela 1.

Tabela 1 - Categorias criadas para análise das teses e dissertações, tal como suas características.

Categoria (Área)	Critério	Total de trabalhos (dissertações e teses)
Estudo computacional	Trabalhos que utilizaram a simulação computacional para analisar a degradação do material ou que não tiveram ensaio laboratorial.	1
Ciências da saúde	Trabalhos que se concentraram na área de microbiologia, biotecnologia, medicina e suas ramificações.	7
Aplicações de enzimas	Trabalhos que usaram variados tipos de enzimas, não necessariamente para a degradação do material.	9
Síntese e caracterização	Trabalhos que tiveram como objetivo principal a síntese ou a caracterização do material.	7

Biomateriais	Trabalhos que abordaram o uso de materiais sintéticos ou naturais que podem ser usados em sistemas biológicos.	5
Total		29

Fonte: Construção do Autor.

ESTUDO COMPUTACIONAL

Canto (2019) realizou um estudo computacional de degradação de PU com o uso de seis enzimas provenientes da bactéria do gênero *Pseudomonas*. As estruturas das enzimas são: amidase (PDB-IB 2UXY), lipase (PDB-ID 2Z8X) e a protease (PDB-ID 1GA6) que foram adquiridas pelo *Protein Data Bank*. As outras três enzimas, esterase A e B (pueA e pueB) e também poliuretano lipase A (pulA) foram estruturadas através da técnica de modelagem molecular por homologia. Após descobertas as estruturas das enzimas, foram inseridos treze ligantes diferentes a essas enzimas por docagem molecular, as quais demonstraram boas interações, como também potencial ação na degradação do PU.

CIÊNCIAS DA SAÚDE

Filho (2007), Neto (2012), Pereira (2014), Schiavo (2018), Viana (2014), Gusmão (2018) e Stets (2008) utilizaram o PU de forma secundária para a realização dos trabalhos. Viana (2014) verificou como a inflamação aguda e crônica contribui para o desenvolvimento de tumor mamário utilizando implantes de PU para acomodar as células. Pereira (2014) também verificou o nível de inflamação, porém utilizando o veneno da aranha do gênero *Loxosceles*, para tanto utilizou implantes com discos de esponja de PU.

Gusmão (2018) avaliou o potencial de virulência das cepas de *Corynebacterium striatum* presente em hospitais, o qual possui a capacidade de formação de biofilme na superfície de cateter de PU. Neto (2012) isolou fungos ligninolíticos da linhagem *Peniophora cinerea*, a qual possui a capacidade de descolorir corantes reativos, para isso o fungo foi isolado em espumas de PU. Filho (2007) analisou o processo de limpeza de medidores para implantes mamários a fim de se quantificar a redução de carga microbiana e utilizou medidores com superfície revestida de PU. Schiavo (2018) apresentou em seu trabalho o microrganismo *Enterobacter aerogenes* que através de um processo fermentativo com glicerol como fonte de energia produz o composto 2,3-butano-diol (BDO), o qual pode ser utilizado para a fabricação de espumas de PU. Stets (2008) avaliou a eficiência no tratamento de efluente de abatedouro, o qual possui elevada carga de matéria orgânica, para tanto utilizou um reator preenchido com espuma de PU que apresentou resultados satisfatórios na remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO).

APLICAÇÕES DE ENZIMAS

Centenaro (2017) e Farias (2017) utilizaram a enzima *Horseradish peroxidase* (HRP) a fim de se avaliar a degradação do corante azul reativo RB 198. A remoção por adsorção com imobilização em espuma de PU modificada com quitosana através de um complexo EPU-Peroxidase-quitosana conseguiu reduzir cerca de 99% da cor das soluções em meios aquosos, enquanto com 50% de reuso do efluente de tingimento obteve-se valores superiores de perda de cor do que o utilizado com 100% de água limpa. Os resultados de imobilização em espumas de PU por esta técnica demonstraram 72% de degradação para o corante RB 198.

Faria (2010b) estudou as melhores condições para a produção de manganês peroxidase (MnPs) e lacases (Lacs) pelo fungo *C. Subvermispora* que tem a condição de degradar os segmentos da parede celular, inclusive a lignina da madeira, para tanto foram realizados cultivos submersos e com micélio imobilizado em espuma de PU em meio complexo ou definido. Os cultivos submerso e imobilizado se mostraram eficientes para a produção de Lac, enquanto o cultivo imobilizado em meio definido provocou máxima produção de MnP.

Facin (2017) avaliou diferentes métodos de imobilização da lipase NS-40116 de *Thermomyces lanuginosose* utilizando espumas flexíveis de PU de forma a verificar sua capacidade catalítica em reações de hidrólise do óleo de soja. Os resultados demonstraram que após 30 dias em armazenamento, a lipase teve apenas uma redução de 20% em sua atividade catalítica. A lipase imobilizada foi testada em ciclos de reuso e demonstrou atividade superior a 50% depois de 5 ciclos, destacando a sua eficiência.

Garcia (2010) utilizou a mesma enzima que Centenaro (2017) e Farias (2017), a *Horseradish peroxidase*, porém com a sua imobilização em nanopartículas de poliuretano peguiladas (PU-PEG). Após os testes de caracterização, as nanopartículas PU-PEG mostraram-se suportes apropriados para a imobilização da peroxidase extraída do pinhão, juntamente com o eletrodo de pasta de carbono que se mostrou eficiente para a determinação de dopamina, hesperidina e diosmina, com altas faixas de concentração.

Gaio (2016) estudou meios de melhorar a estabilidade e atividade enzimática da pectina liase (PMGL) e pectinametilesterase (PME) imobilizadas em suporte de PU com tratamento usando gás liquefeito de petróleo (GLP), avaliando-se variáveis como pressão, despressurização e tempo de reação a fim de se avaliar a sua eficiência na clarificação do suco de pêssego. Os resultados demonstraram que o complexo enzimático imobilizado em PU adquiriu um aumento de 56% de atividade da PME, além da eficácia para clarificação, bem como a sua redução de turbidez.

Lima (2017) produziu um biocatalisador proveniente das células íntegras do fungo *Penicillium citrinum* para aplicação na hidrólise de óleos vegetais. As espumas de PU serviram como suporte para a imobilização das células contendo lipase e após isso os biocatalisadores foram caracterizados e definidos os valores ótimos de atuação. O comportamento do biocatalisador imobilizado na reação de hidrólise do óleo de soja mostrou resultados favoráveis, com grau máximo de 55,7% em 12h de

reação, tratando-se de uma possibilidade ao método tradicional de catálise.

Cipolatti (2015) imobilizou lipases de *Candida antarctica* B (CalB) e *Thermomyces lanuginosus* (TLL) para aplicação em derivados enzimáticos a fim de se produzir ésteres etílicos (EE) de ácidos graxos. TLL e CalB foram imobilizados em suportes de espumas de PU com diferentes tamanhos de cadeia de polietilenoglicol (PEG). O polímero derivado de PU e PEG teve como resultado altas taxas de produção de EE de ácidos graxos, além de elevadas porcentagens de imobilização evidenciando sua utilização como suporte para imobilização de lipases.

Costa (2001) estudou a degradação do PU por linhagens fúngicas com crescimento em meio líquido de saís, em pH 6,8, com 0,1% de tiamina por um período de 20, 30 e 40 dias de cultivo. O crescimento microbiano se demonstrou satisfatório, com crescimento acima de 60% por *P. Chrsosporium*, *P. Sajor caju* e levedura L7A. Além disso, o *P. Sajor caju* induziu uma perda de 6% de massa no PU, e por fim na análise morfológica o micélio fúngico foi capaz de destruir a rede polimérica, o que evidenciou a degradação do material.

SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO

Faria (2014a) apresentou novas rotas para a produção de biodiesel por ações de enzimas utilizando células do fungo *Mucor circinelloides* URM 4182, o qual foi cultivado e imobilizado *in situ* em espumas de PU para atuar como biocatalisador na produção de ésteres de ácidos graxos para reações de transesterificação envolvendo óleo de coco e o etanol como agente acilante. O rendimento de transesterificação com óleo de coco utilizando o *M. Ciricenlloides* URM 4182 chegou em 96% em até 144 horas.

Silva (2017a) propôs modelos matemáticos para realizar reações de esterificação e transesterificação por catálise enzimática para produção de geranil cinamato. Para esse propósito, foi desenvolvido um modelo matemático contendo sistemas de equações diferenciais para explicar a cinética da reação envolvida. Os parâmetros encontrados com a ferramenta algoritmo genético proporcionaram estimativas para validar os parâmetros ótimos para melhor descrever o modelo, o que possibilitou a construção de gráficos para determinar a concentração ideal dos substratos e produtos.

Nicoletti (2014) selecionou o método mais apropriado de interação entre a espuma de PU e a lipase B de *Candida antarctica* (CalB) para realizar a síntese do éster geranil propionato utilizando diferentes métodos de imobilização, como: adsorção (PU-ADS), incorporação (PU) e ligação covalente com polietilenoimina (PU-PEI). Após realizadas as caracterizações e definidos os melhores parâmetros, foi constatado que os métodos PU e PU-ADS obtiveram boa estabilidade obtendo-se conversões de 83,5% de PU e 95,9% para PU-ADS na síntese do geranil propionato.

Rico (2015) utilizou a mesma enzima que Faria (2014) para produção de biodiesel etílico, *Mucor circinelloides* e sintetizou a espuma de PU para servir como suporte de crescimento de biomassa microbiana a partir do óleo de babaçu. Os resultados apontaram que os suportes de PU em

forma de cubo apresentaram altas taxas de conversão, além de serem mais estáveis para o reator de leito fixo e fluxo contínuo chegando a aproximadamente 64%, com perda de biomassa de 2%.

Silva (2017b) realizou a síntese de polioli de óleo de andiroba (POA) por catálise enzimática para a produção de PU. Para tal, utilizou a lipase comercial *Novozym 435* e na síntese empregou óleo de andiroba e glicerol (GLI) como substrato. Após a caracterização do óleo, o POA foi usado na síntese do PU na proporção de 25 e 50% com GLI e os resultados demonstraram propriedades mecânicas similares às reportadas na literatura, além da possibilidade de utilização do óleo de andiroba para a síntese de filmes de PU.

Miqueleto (2006) avaliou os fatores que induzem a produção de exopolissacarídeos (EPS) obtidos por tratamento anaeróbio através de um reator por batelada sequencial, para isso analisou diferentes fontes de carbono e a relação carbono/nitrogênio com biomassa imobilizada (ASBBR) em espuma de PU. Constatou-se que substâncias como frutose, sacarose, galactose e glicose contribuem com a produção de EPS e os ensaios de caracterização demonstraram que a composição química não sofreu influência pelas fontes de carbono.

Alba (2009) utilizou a glicerina loira, um subproduto obtido pelo processo de produção de biodiesel para realizar a síntese de polióis através do processo de esterificação com ácidos graxos de óleos vegetais, após isso os óleos foram aplicados para a síntese de adesivos de PU. Ao final, os testes de cisalhamento apresentaram tensão máxima próxima ao comercial, em torno de 3,12 MPa a 3,72 MPa, evidenciando uma nova rota de preparação de PUs.

BIOMATERIAIS

Miléo (2011) separou os principais componentes da cana-de-açúcar, como a celulose para realizar a síntese da carboximetilcelulose (CMC) a partir da celulose branqueada por processos químicos e enzimáticos. Após isso, a polpa branqueada foi adicionada como fibras de reforço na matriz do PU de óleo de mamona. Os resultados demonstraram que a adição das fibras melhorou as propriedades mecânicas do biomaterial, além de conferir uma redução de custos sobre o produto final.

Saran (2011) implantou o PU derivado de óleo de mamona no canal medular da tíbia de coelhos. Para tanto, selecionou 44 coelhos machos, sendo 12 animais para grupo controle, os quais sofreram a fresagem do canal medular e sem o preenchimento do PU e o restante passou pelo mesmo procedimento, porém com o preenchimento de cilindros de PU de óleo de mamona. Os resultados demonstraram que o PU vegetal induziu a formação de tecido ósseo, bem como se apresentou bio-compatível e sem indícios de reação inflamatória obtidos pelas análises.

Cabral (2012) sintetizou PU bioestáveis para aplicações na área cardiovascular através das reações entre policaprolactona diol (PCL) com diferentes isocianatos (HDI e H12MDI), e então fo-

ram caracterizados e avaliados quanto à sua citotoxicidade *in vitro* através de testes de viabilidade celular e proliferação celular. Os resultados de estabilidade apontaram que o PU de óleo de mamona sofreu baixa degradação por um longo período de tempo, alta viabilidade celular (acima de 80%) e sem toxicidade, o que demonstra seu potencial de aplicação na área cardiológica.

Nóbrega (2014) implantou o PU de mamona acrescido com carbonato de cálcio em osso III metacarpiano a fim de se avaliar a resposta biológica dos equinos frente ao implante. Selecionou-se 6 equinos hígidos, os quais foram submetidos ao processo de ostectomias unicorticais, próximas à região dorsal do III metacarpiano, após isso o polímero foi implantado em um membro e no outro membro não houve preenchimento. O material preenchido demonstrou ser biocompatível, além de não apresentar reações inflamatórias e alta capacidade de substituição óssea.

Hoffmann (2016) preparou PU ramificados a partir de pentaeritritol (PETT) utilizando policaprolactona diol (PCL) como polioli em diferentes proporções, entre 5, 10 e 15% em relação à massa de PCL para utilização na engenharia de tecidos. Após as caracterizações, o PU-PETT 5% exibiu as melhores propriedades morfológicas, e então com ele foram preparadas membranas lixiviadas, as quais apresentaram alta porosidade, boa estabilidade e interconectividade, sendo estas características imprescindíveis para a regeneração tecidual.

DISCUSSÃO DOS DADOS OBTIDOS

É possível observar com a tabela 2 que foram encontrados poucos microrganismos para a degradação de PU, no entanto existem diversas enzimas com potencial de degradação desse material. Em sua tese, Canto (2019) utilizando uma bactéria do gênero *Pseudomonas* afirma que a utilização de enzimas como hidrolases, protease e amilase podem servir para a recuperação de determinados reagentes, e assim auxiliar na síntese de novos materiais. Costa (2001), ao avaliar a degradação do PU por fungos, observou que os microrganismos listados na tabela 2 apresentaram crescimento acima de 60% em 40 dias sobre o material. Além disso, vale destacar a enzima CMCCase, que juntamente com a levedura L7A, obteve atividades celulolíticas em torno de 200 (UI/L), o que favorece a produção de enzimas nesse meio.

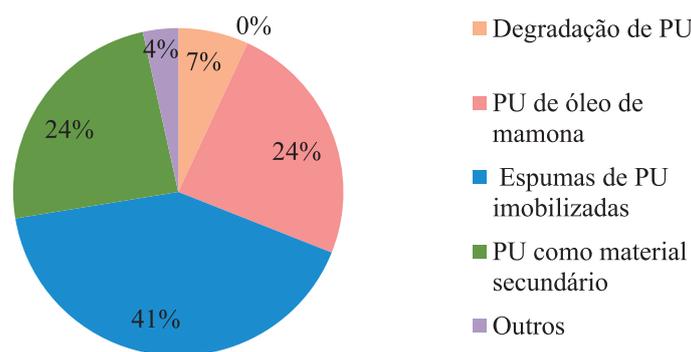
Tabela 2 - Autores que utilizaram microrganismos e suas respectivas enzimas para degradar o PU.

Microrganismos	Enzimas envolvidas no processo de degradação	Autor
<i>Pseudomonas</i>	Lipase, amidase, protease, poliuretano esterease A (pueA), poliuretano esterease B (pueB) e poliuretano lipase A (pulA).	Canto (2019)
<i>P. chrysosporium</i> , <i>P. Sajor caju</i> e levedura L7A	Avicelase, CMCCase, xilanase, lacase, peroxidase, MnP, AVO e LiP.	Costa (2001)

Fonte: Construção dos Autor.

A figura 1 demonstra quais foram as principais utilizações dos trabalhos envolvendo PU. Dentre eles destaca-se a imobilização do PU, com cerca de 41% utilizado para crescimento microbiano e imobilização de enzimas. Em seguida, com 24% o PU foi aproveitado como material secundário, ou seja, foi utilizado como revestimento, implante e na forma de espuma. A seguir, o PU de óleo de mamona aparece com 24% usado principalmente na área de biomateriais, uma vez que o óleo de mamona lhe confere importantes características de biocompatibilidade com sistemas biológicos, por conta de serem sintetizados utilizando polióis derivados de óleos vegetais, que lhes conferem propriedades semelhantes e até superiores aos polióis de fonte não renovável. Posteriormente, com 7% há os trabalhos envolvendo a degradação do PU, tratando-se um de uma bactéria e o outro de um fungo com diversas enzimas capazes de degradar a estrutura do material e induzir o crescimento de microrganismos. E por fim, com 4% estão classificados os restantes dos trabalhos, os quais não trataram do PU.

Figura 1 - Gráfico de pizza das 29 dissertações e teses envolvendo a utilização do poliuretano.



Fonte: Construção do autor.

CONCLUSÃO

A presente revisão de dissertações e teses produzidas no Brasil envolvendo PU apontou quais são as principais tendências de aplicações envolvendo esse material dentro do território nacional. Com isso, foi possível constatar a ampla aplicabilidade de segmentos que envolvem o PU, desde áreas da saúde até aplicações incluindo biomateriais. Foi possível averiguar com esse polímero múltiplas aplicações, por exemplo, cerca de 41% dos trabalhos sendo utilizados na forma de espuma para imobilização de enzimas ou suporte para o crescimento de microrganismos, o que demonstra o PU como um excelente material para esse fim. Além disso, 24% dos trabalhos se concentraram na síntese ou a aplicação desse material derivado de óleo de mamona dentre os trabalhos investigados. Apesar das inúmeras utilizações, a quantidade de trabalhos contendo a degradação de PU se mostrou

bastante escassa, uma vez que representa apenas cerca de 7% das produções examinadas, o que acaba por demonstrar uma baixa produção científica nacional desse tema envolvendo a degradação de PU através de enzimas, dado que esse material pode acabar se acumulando e gerar resíduos indesejáveis por conta de sua longa durabilidade.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ALBA, K. D. **Uma alternativa para a glicerina oriunda da produção do biodisel: preparo de polióis e aplicação em adesivos poliuretânicos**. 2009. 105 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Química, Porto Alegre, RS. 2009.

ALVES, L. R. *et al.* A utilização de óleos vegetais como fonte de polióis para a síntese de poliuretano: uma revisão. **Disciplinarum Scientia | Naturais e Tecnológicas**, v. 22, n. 1, p. 99-118, 2021a.

ALVES, L. R.; *et al.* Aplicações de hidrogéis como biomateriais: uma revisão de dissertações e teses brasileiras desde 2017. **Disciplinarum Scientia | Naturais e Tecnológicas**, v. 22, n. 2, p. 53-79, 2021b.

CABRAL, E. L. **Síntese e caracterização de poliuretanos bioestáveis com potencial aplicação na área cardiovascular**. 2012. 95 f. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Porto Alegre, RS. 2012.

CANGEMI, M. J.; SANTOS, A. M.; NETO, S. C. Poliuretano: de travesseiros a preservativos, um polímero versátil. **Química Nova na Escola**, v.31, n. 3, p. 159-164, 2009.

CANTO, V. P. **Poliuretanasas: estudo computacional de enzimas com potencial ação na degradação de poliuretanos**. 2019. 251 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Química, Porto Alegre, RS. 2019.

CARLOMAGNO, M. C.; ROCHA, L. C. Como criar e classificar categorias para fazer análise de conteúdo: uma questão metodológica. **Revista Eletrônica de Ciência Política**, v. 7, n. 1, p. 173-188, 2016.

CENTENARO, G. S. N. M. **Avaliação de estratégias para a biodegradação e remoção de corantes têxteis**. 2017. 119 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Florianópolis, SC. 2017.

CIPOLATTI, E. P. **Imbolização de lipases em suportes poliméricos**. 2015. 177 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis, SC. 2015.

COSTA, K. C. F. **Estudo da degradação de polímeros sintéticos de importância industrial por linhagens fúngicas**. 2001. 125 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Ciência de Alimentos, Campinas, SP. 2001.

FACIN, B. R. **Imobilização de lipase em suporte polimérico e aplicação na hidrólise de óleos vegetais**. 2017. 92 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis, SC. 2017.

FARIA, E. L. P. **Síntese enzimática de monoésteres de etila catalisada por células íntegras imobilizadas com elevada atividade lipolítica em reator de leito fixo operando em fluxo contínuo**. 2014. 78 f. Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Lorena, SP. 2014a.

FARIA, R. A. **Estudo da produção de enzimas ligninolíticas por *Ceriporiopsis subvermispora***. 2010. 102 f. Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo, Microbiologia Aplicada, Lorena, SP. 2010b.

FARIAS, S. **Reúso do efluente do processo de tingimento e utilização da enzima *Horseradish peroxidase* livre e imobilizada para a remoção de corantes reativos utilizados na indústria têxtil**. 2017. 180 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Florianópolis, SC. 2017.

FILHO, J. M. **Avaliação do impacto do processo de limpeza na esterilização de medidores de implantes mamários**. 2007. 57 f. Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em FÁrmaco e Medicamentos, São Paulo, SP. 2007.

GAIO, I. **Avaliação da atividade e estabilidade de pectinases comerciais imobilizadas e submetidas ao tratamento com gás liquefeito de petróleo**. 2016. 224 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química e de Alimentos, Florianópolis, SC. 2016.

GARCIA, M. B. F. **Imobilização de enzimas em materiais nanoestruturados: atividade, estabilidade e aplicação da peroxidase imobilizada em bicamadas lipídicas e nanopartículas poliméricas**. 2010. 154 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Química, Florianópolis, SC. 2010.

GUSMÃO, L. N. M. **Monitoramento de *Cornybacterium striatum* em hospital universitário da região metropolitana do Rio de Janeiro: aspectos epidemiológicos, microbiológicos e do potencial de virulência**. 2018. 115 f. Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado de Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Microbiologia, Rio de Janeiro, RJ. 2018.

HOFFMANN, M. S. **Síntese e caracterização de poliuretano ramificado com potencial aplicação em engenharia de tecidos**. 2016. 96 f. Dissertação (mestrado) - Pontífica Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Porto Alegre, RS. 2016.

LIMA, R. T. **Produção de células íntegras de *Penicillium citrinum* para aplicação na hidrólise do óleo de soja**. 2017. 81 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Alfenas, Instituto de Ciência e Tecnologia, Poços de Caldas, MG. 2017.

MILÉO, P. C. **Aplicações da celulose de palha de cana-de-açúcar: obtenção de derivados partindo de celulose branqueada e de biocompósitos com poliuretana obtida a partir de óleo de mamona (*Ricinus communis* L.)**. 2011. 114 f. Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial, Lorena, SP. 2011.

MIQUELETO, A. P. **Polímeros extracelulares insolúveis (ESP) nos reatores anareóbios operados em bateladas sequenciais: caracterização e fatores que favorecem a produção**. 2006. 120 f. Tese (doutorado) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP. 2006.

NETO, S. L. M. **Caracterização de lacase de *Peniophora cinerea* e estudo do potencial de aplicação biotecnológica**. 2012. 169 f. Tese (doutorado) - Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial, Lorena, SP. 2012.

NICOLETTI, G. **Imobilização de lipase B de *Candida antarctica* em espuma de poliuretano e aplicação na síntese do éster geranil propionato**. 2014. 81 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação Engenharia de Alimentos, Florianópolis, SC. 2014.

NÓBREGA, F. S. **Avaliação da interação biológica entre polímero de poliuretano de mamona acrescido de carbonato de cálcio e tecido ósseo de equinos**. 2014. 157 f. Tese (doutorado) - Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Clínica Cirúrgica Veterinária, São Paulo, SP. 2014.

PEREIRA, N. B. **Efeitos do veneno de *Loxosceles similis* no modelo de implante subcutâneo de esponja em camundogos *Swiss***. 2014. 134 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Patologia, Belo Horizonte, MG. 2014.

RICO, A. L. L. **Produção enzimática de biodiesel etílico em reator de leito fixo e regime de fluxo contínuo utilizando células íntegras de *Mucor circinelloides* imobilizadas em espuma de poliuretano**. 2015. 87 f. Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Lorena, SP. 2015.

SANTOS, K. G; SOUZA, L. G. S. A importância do IBICT para a divulgação científica brasileira. **Bibliotecas Universitárias: pesquisas, experiências e perspectivas**; v. 3, n. 2 (2016), p. 3-18, v. 24, n. 2, p. 18-3, 2016.

SARAN, W. R. **Estudos de fenômenos de osteogênese em implantes de polímero vegetal**. 2011. 58 f. Tese (doutorado) - Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos, São Carlos, SP. 2011.

SCHIAVO, M. **Utilização de recursos genéticos de *Enterobacter aerogenes* ATCC 13048 para o desenvolvimento de enzima quimérica glicerol desidrogenase - acetoína redutase**. 2018. 133 f. Dissertação (mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, Caxias do Sul, RS. 2018.

SILVA, A. S. **Estimação de parâmetros em modelos matemáticos de sistemas reacionais enzimáticos e de expansão de poliuretanos**. 2017. 75 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Curitiba, PR. 2017a.

SILVA, J. A. P. **Desenvolvimento de poliuretano empregando poliálcool de óleo de andiroba obtido via catálise enzimática**. 2017. 80 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Porto Alegre, RS. 2017b.

STETS, M. S. **Avaliação da influência do material suporte e caracterização da diversidade microbiana de reatores anaeróbios para o tratamento de efluentes de abatedouro**. 2008. 110 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Ponta Grossa, PR. 2008.

VIANA, C. T. R. **Caracterização do perfil inflamatório e angiogênico associados ao desenvolvimento de tumores murinos**. 2014. 149 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas, Belo Horizonte, MG. 2014.