

CAPÍTULO 6

O uso industrial das enzimas: ênfase na lacase

Danielly Maria Paixão Novi

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c6>

Resumo

As enzimas têm se consolidado como ferramentas essenciais para o desenvolvimento de processos industriais mais eficientes, sustentáveis e ambientalmente responsáveis. Por atuarem como catalisadores biológicos altamente específicos, essas biomoléculas permitem a realização de reações químicas sob condições brandas de temperatura, pH e pressão, reduzindo o consumo energético e a geração de subprodutos tóxicos. Nesse contexto, a lacase destaca-se como uma das enzimas de maior versatilidade biotecnológica, sendo amplamente aplicada na degradação de poluentes, no tratamento de efluentes industriais, na indústria têxtil, no setor de papel e celulose, na biorremediação ambiental e em processos de química verde. Este capítulo apresenta uma revisão descritiva sobre o uso industrial das enzimas, com ênfase na lacase, abordando suas características bioquímicas, fontes microbianas, estratégias de produção, aplicações industriais e perspectivas futuras, de forma acessível, visando a popularização da bioquímica e a aproximação entre ciência, indústria e sociedade.

Palavras-chave: enzimas industriais; lacase; biotecnologia; biorremediação; sustentabilidade.

Abstract

Enzymes have become essential tools for the development of more efficient, sustainable, and environmentally friendly industrial processes. Acting as highly specific biological catalysts, enzymes enable chemical reactions under mild conditions of temperature, pH, and pressure, reducing energy consumption and the generation of toxic by-products. In this context, laccase stands out as one of the most versatile biotechnological enzymes, being widely applied in pollutant degradation, industrial wastewater treatment, textile industry, pulp and paper sector, environmental bioremediation, and green chemistry processes. This chapter presents a descriptive review of the industrial use of enzymes, with emphasis on laccase, addressing its biochemical characteristics, microbial sources, production strategies, industrial applications, and future perspectives, using accessible language aimed at the popularization of biochemistry and the connection between science, industry, and society.

Keywords: industrial enzymes; laccase; biotechnology; bioremediation; sustainability.

1. Introdução

O crescimento industrial e o avanço tecnológico das últimas décadas trouxeram benefícios significativos para a sociedade, mas também intensificaram problemas ambientais, como a geração de resíduos, a contaminação de solos e águas e o aumento da demanda energética. Diante desse cenário, torna-se cada vez mais urgente o desenvolvimento de processos produtivos mais sustentáveis, capazes de conciliar eficiência econômica e responsabilidade ambiental.

A bioquímica surge como uma ciência central nesse processo de transformação, especialmente por meio do estudo e da aplicação das enzimas. Essas biomoléculas, produzidas naturalmente por organismos vivos, desempenham funções essenciais nos sistemas biológicos e, quando aplicadas industrialmente, permitem substituir processos químicos agressivos por alternativas mais limpas e eficientes¹².

As enzimas industriais já são amplamente utilizadas em setores como alimentos, detergentes, fármacos, biocombustíveis, papel e celulose, tratamento de efluentes e biorremediação ambiental. Entre elas, a lacase tem despertado grande interesse científico e tecnológico³ devido à sua ampla capacidade oxidativa, baixo impacto ambiental e versatilidade de aplicações⁴. Este capítulo tem como objetivo apresentar, de forma acessível e fundamentada, o papel das enzimas na indústria moderna, com ênfase especial na lacase, destacando sua importância como ferramenta biotecnológica para a construção de processos mais sustentáveis e inovadores.

2. Enzimas de interesse industrial

As enzimas podem ser definidas como catalisadores biológicos capazes de acelerar reações químicas específicas sem serem consumidas durante o processo. Diferentemente dos catalisadores químicos tradicionais, as enzimas atuam de maneira altamente seletiva, reconhecendo seus substratos com grande precisão, o que reduz a formação de produtos indesejáveis e aumenta a eficiência do processo⁵.

Do ponto de vista industrial, essa especificidade representa uma vantagem estratégica. Processos enzimáticos geralmente ocorrem em condições mais brandas de temperatura, pH e pressão, o que resulta em menor consumo energético e menor desgaste de equipamentos, além de reduzir riscos ocupacionais e impactos ambientais⁶.

Entre as principais classes de enzimas utilizadas industrialmente destacam-se as hidrolases (como amilases, proteases e lipases), as oxidoredutases (como lacases e peroxidases), as transferases e as isomerases. Cada uma dessas classes possui aplicações específicas, dependendo do tipo de reação desejada e do setor industrial envolvido.

As oxidoredutases, em especial, vêm ganhando destaque por sua capacidade de promover reações de oxidação e redução utilizando, muitas vezes, o oxigênio molecular como aceptor final de elétrons. Esse é o caso das lacases, enzimas multicobre que catalisam a oxidação de compostos fenólicos e não fenólicos, reduzindo o oxigênio a água, o que as torna particularmente atraentes sob a perspectiva da química verde⁽⁷⁾⁽⁸⁾.

Além disso, avanços na biotecnologia permitiram ampliar o uso industrial das enzimas por meio de estratégias:

- otimização das condições de cultivo,
- expressão heteróloga,
- imobilização enzimática,
- aplicação de mediadores redox,
- seleção de microrganismos produtores,

Essas abordagens têm contribuído para tornar os processos enzimáticos mais estáveis, reutilizáveis e economicamente viáveis em escala industrial⁹.

Dentro desse contexto, a lacase destaca-se como uma enzima modelo para demonstrar como a bioquímica pode ser aplicada de forma prática na indústria, unindo eficiência catalítica, sustentabilidade ambiental e inovação tecnológica.

3. Lacase: características bioquímicas e mecanismo de ação

A lacase é uma enzima pertencente à classe das oxidoredutases e é classificada como uma polifenol oxidase multicobre (EC 1.10.3.2). Sua principal característica é a capacidade de catalisar reações de oxidação de uma ampla variedade de compostos fenólicos e não fenólicos, utilizando o oxigênio molecular comoceptor final de elétrons e produzindo água como único subproduto da reação⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾.

Do ponto de vista estrutural, a lacase apresenta quatro átomos de cobre organizados em três tipos distintos de centros catalíticos: Cobre Tipo 1 (T1): responsável pela oxidação do substrato;

Cobre Tipo 2 (T2) e Cobre Tipo 3 (T3): formam um centro trinuclear, onde ocorre a redução do oxigênio molecular a água.

Essa organização permite que a lacase funcione como uma espécie de “bateria biológica”, armazenando elétrons provenientes das reações de oxidação do substrato até que quatro elétrons estejam disponíveis para reduzir completamente uma molécula de oxigênio⁽⁴⁾⁽⁷⁾.

Quando um substrato fenólico é oxidado pela lacase, ocorre a formação de radicais livres altamente reativos. Esses radicais podem seguir diferentes caminhos reacionais, como polimerização, despolimerização ou rearranjos estruturais, o que explica a ampla diversidade de aplicações dessa enzima em processos industriais e ambientais¹¹.

Uma característica particularmente relevante da lacase é sua capacidade de atuar em sistemas mediados. Nesse caso, pequenas moléculas conhecidas como mediadores redox são inicialmente oxidadas pela lacase e, posteriormente, transferem elétrons para substratos que, isoladamente, não seriam oxidados pela enzima. Essa estratégia amplia significativamente o espectro de compostos passíveis de degradação, incluindo poluentes complexos e recalcitrantes⁽¹²⁾⁽¹³⁾.

4. Fontes microbianas de lacase

As lacases estão amplamente distribuídas na natureza e podem ser encontradas em plantas, insetos, bactérias e fungos. No entanto, os fungos,

especialmente os basidiomicetos, são considerados as principais fontes de lacase com relevância industrial, devido à elevada atividade enzimática, estabilidade e facilidade de produção⁽¹⁾⁽²⁾.

Entre os fungos produtores de lacase, destacam-se os chamados fungos de podridão branca, como *Trametes versicolor*, *Pleurotus ostreatus*, *Phlebia radiata* e *Ganoderma lucidum*. Esses microrganismos possuem a capacidade de degradar a lignina da biomassa vegetal, um polímero altamente complexo e resistente, o que evidencia o elevado potencial oxidativo de suas lacases⁽³⁾⁽⁴⁾.

Além dos fungos, lacases bacterianas têm despertado crescente interesse, principalmente devido à sua maior estabilidade em condições extremas de pH, temperatura e salinidade. Espécies bacterianas como *Streptomyces*, *Serratia* e algumas cianobactérias demonstram potencial promissor para aplicações em ambientes industriais severos⁽⁵⁾⁽⁶⁾.

A diversidade de fontes microbianas permite selecionar lacases com propriedades específicas, adequadas a diferentes processos industriais, o que amplia a flexibilidade de aplicação dessa enzima.

5. Produção de lacase e fatores que influenciam a atividade enzimática

A produção de lacase é influenciada por diversos fatores relacionados às condições de cultivo do microrganismo produtor. Entre os principais parâmetros estão a composição do meio de cultura, a fonte de carbono e nitrogênio, o pH, a temperatura, a agitação e a presença de indutores químicos⁽⁷⁾⁽⁸⁾.

5.1 Fonte de carbono e nitrogênio

As fontes de carbono mais comumente utilizadas incluem glicose, frutose, maltose, lactose e substratos lignocelulósicos. No entanto, concentrações elevadas de glicose podem inibir a produção de lacase, enquanto substratos poliméricos, como celulose e resíduos agroindustriais, tendem a favorecer sua expressão⁽⁴⁾⁽⁹⁾.

A produção de lacase é frequentemente associada à limitação de nitrogênio no meio de cultivo, embora esse efeito varie entre diferentes espécies

e cepas fúngicas. A relação carbono/nitrogênio exerce papel fundamental na regulação da expressão gênica da lacase⁽⁷⁾.

5.2 Temperatura e pH

A faixa ótima de temperatura para a produção e atividade da lacase geralmente varia entre 25 °C e 50 °C, dependendo da origem microbiana da enzima. Algumas lacases fúngicas mantêm elevada atividade mesmo em temperaturas mais altas, o que é desejável para aplicações industriais⁽⁸⁾.

O pH também influencia significativamente a atividade da lacase, sendo comum a observação de um perfil em forma de sino. Em geral, valores de pH entre 4,0 e 6,0 são considerados ideais tanto para a produção quanto para a atividade catalítica da enzima⁽¹⁰⁾.

5.3 Indutores e metais

A adição de compostos aromáticos, como álcool veratrílico e xilidina, bem como íons metálicos, especialmente cobre, pode aumentar significativamente a produção de lacase. O cobre atua não apenas como componente estrutural da enzima, mas também como indutor da expressão gênica⁽⁸⁾⁽¹¹⁾.

6. Aplicações industriais da lacase

A lacase tem se consolidado como uma das enzimas mais versáteis da biotecnologia industrial moderna. Sua ampla especificidade por substratos, aliada ao uso do oxigênio molecular como acceptor final de elétrons e à geração de água como único subproduto, torna essa enzima altamente atrativa para processos industriais sustentáveis. Diferentemente de muitos catalisadores químicos, a lacase atua sob condições mais brandas de pH e temperatura, reduzindo custos energéticos e impactos ambientais⁽¹⁾⁽⁴⁾.

Nos últimos anos, avanços em produção microbiana, engenharia genética e imobilização enzimática ampliaram significativamente o uso da lacase em diferentes setores industriais, conforme discutido a seguir.

6.1 Aplicações da lacase na indústria de papel e celulose

Na indústria de papel e celulose, a lacase é empregada principalmente em processos de deslignificação e branqueamento enzimático. Tradicionalmente, essas etapas utilizam grandes quantidades de compostos clorados e outros reagentes químicos agressivos, que geram resíduos tóxicos ao meio ambiente.

O uso da lacase, isoladamente ou em sistemas lacase-mediador, permite a oxidação seletiva da lignina, facilitando sua remoção e reduzindo a necessidade de produtos químicos convencionais. Esse processo contribui para a diminuição da carga poluente dos efluentes industriais e para a produção de papel com menor impacto ambiental⁽²⁾⁽³⁾.

Além disso, a aplicação da lacase melhora a qualidade da polpa celulósica e se alinha aos princípios da química verde, tornando-se uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente responsável.

6.2 Uso da lacase na indústria têxtil

A indústria têxtil é uma das maiores geradoras de efluentes coloridos e tóxicos, devido ao uso intensivo de corantes sintéticos. A lacase tem sido amplamente estudada para a descoloração e detoxificação de corantes azo, antraquinônicos e reativos, presentes nos efluentes têxteis.

Estudos demonstram que a lacase é capaz não apenas de remover a coloração visível, mas também de reduzir a toxicidade dos produtos de degradação, tornando o efluente menos nocivo aos organismos aquáticos⁽⁵⁾⁽⁶⁾. Esse aspecto é fundamental, pois a simples remoção da cor não garante a segurança ambiental do efluente tratado.

A aplicação da lacase nesse setor representa uma alternativa eficiente aos métodos físico-químicos tradicionais, que frequentemente demandam altos custos e geram resíduos secundários.

6.3 Aplicações da lacase na indústria alimentícia

Na indústria alimentícia, a lacase é utilizada principalmente em processos de clarificação, estabilização e melhoria sensorial de produtos. Exemplos incluem a clarificação de sucos, vinhos e cervejas, onde a enzima atua na remoção de compostos fenólicos responsáveis por turbidez, escurecimento e sabores indesejáveis.

Além disso, a lacase pode ser aplicada na modificação controlada de componentes alimentares, contribuindo para a melhoria da textura e estabilidade de determinados produtos⁽¹⁾⁽³⁾.

Por se tratar de uma enzima de origem natural, seu uso é bem aceito pela indústria e pelos consumidores, especialmente em um contexto de crescente demanda por alimentos mais naturais e processos menos agressivos.

6.4 Lacase em processos industriais sustentáveis e economia circular

A lacase desempenha papel central em estratégias de economia circular, especialmente no aproveitamento de resíduos agroindustriais e lignocelulósicos. Esses resíduos podem ser utilizados tanto como substrato para a produção da enzima quanto como alvos de processos de degradação e valorização⁽⁸⁾.

Diversos estudos relatam o uso da lacase na biorremediação de solos e águas contaminadas por pesticidas, fármacos, plastificantes e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾.

Essas aplicações demonstram como a bioquímica pode contribuir diretamente para soluções ambientais, conectando ciência, indústria e sustentabilidade de forma integrada.

6.5 Imobilização enzimática como estratégia industrial

Apesar de suas vantagens, o uso industrial da lacase em sua forma livre apresenta limitações, como baixa estabilidade operacional e dificuldade de recuperação da enzima após o processo. Para contornar esses desafios, técnicas de imobilização enzimática têm sido amplamente desenvolvidas.

A imobilização da lacase em suportes como sílica, quitosana, nanotubos de carbono e materiais magnéticos aumenta sua estabilidade térmica, resistência a variações de pH e possibilidade de reutilização, reduzindo custos operacionais⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾.

Essas estratégias são fundamentais para viabilizar a aplicação da lacase em processos industriais contínuos e em larga escala.

6.6 Engenharia genética e produção em larga escala de lacase

O avanço das técnicas de engenharia genética tem permitido a produção heteróloga de lacases em microrganismos como leveduras e bactérias, aumentando o rendimento enzimático e facilitando o controle do processo produtivo.

A expressão de lacases fúngicas em sistemas como *Yarrowia lipolytica* e *Pichia pastoris*, bem como o uso de ferramentas modernas como CRISPR/Cas9, tem ampliado o potencial de aplicação industrial dessas enzimas⁽²²⁾⁽²³⁾⁽⁴⁾.

Esses avanços representam um passo importante para a consolidação da lacase como um biocatalisador estratégico na indústria do futuro.

7. Perspectivas futuras e popularização da bioquímica

A crescente preocupação com os impactos ambientais dos processos industriais tem impulsionado o interesse por soluções baseadas em enzimas. A lacase exemplifica como o conhecimento bioquímico pode ser traduzido em aplicações práticas, eficientes e sustentáveis.

A popularização da bioquímica, ao tornar esses conceitos acessíveis a públicos não especializados, contribui para aproximar ciência e sociedade. Compreender que enzimas naturais podem substituir processos poluentes reforça a importância da biotecnologia como ferramenta de transformação social e ambiental⁽¹⁾.

8. Considerações finais

A lacase destaca-se como uma enzima-chave para a transição rumo a processos industriais mais sustentáveis. Sua ampla aplicabilidade, aliada aos avanços em produção, imobilização e engenharia genética, consolida seu papel como um dos biocatalisadores mais promissores da biotecnologia moderna.

Ao integrar ciência básica, inovação tecnológica e aplicações industriais, a lacase representa um exemplo concreto de como a bioquímica pode contribuir para o desenvolvimento sustentável e para a construção de um futuro mais equilibrado.

9. Referências

1. AFREEN, Sumbul et al. Screening and optimization of laccase from cyanobacteria with its potential in decolorization of anthraquinonic dye Remazol Brilliant Blue R. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, v. 10, p. 403–410, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.05.004>.
2. AHMAD, Imran et al. Catalytic insights into laccase for sustainable remediation of multifaceted pharmaceutically active micropollutants from water matrices: A state-of-art review. *Journal of Water Process Engineering*, v. 70, p. 106901, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106901>.
3. ALEXANDRINO, Ana Maria et al. Aproveitamento do resíduo de laranja para a produção de enzimas lignocelulolíticas por *Pleurotus ostreatus* (Jack: Fr). *Food Science and Technology*, v. 27, p. 364–368, 2007.
4. BACKES, Emanuelli et al. Production of fungal laccase on pineapple waste and application in detoxification of malachite green. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, v. 57, n. 2, p. 90–101, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/03601234.2022.2025739>.
5. BANKOLE, Paul Olusegun et al. Enhanced removal of dibutyl phthalate in a laccase-mediator system: optimized process parameters, kinetics, and environmental impact. *Journal of Environmental Management*, v. 348, p. 119227, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119227>.
6. DAMASCENO, Andrey Azedo. *Purificação e caracterização da lacase do fungo Trametes cubensis (Mont.) Sacc. 1891*. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal, Brasil, 2016.
7. DE FREITAS, Emanuelle Neiverth et al. Removal of bisphenol A by laccases from *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus pulmonarius* and evaluation of ecotoxicity of degradation products. *Chemical Engineering Journal*, v. 330, p. 1361–1369, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.08.051>.

8. DE QUEIROZ BAPTISTA, Nelânia Maria et al. Produção das enzimas lignina peroxidase e lacase por fungos filamentosos. *Scientia Plena*, v. 8, n. 1, 2012.
9. HERMOSILLA, E. et al. Redox mediator system: Expanding the potential of laccase-like nanozymes towards pollutant remediation. *Results in Engineering*, p. 104656, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104656>.
10. IARK, Daiane et al. Enzymatic degradation and detoxification of azo dye Congo red by a new laccase from *Oudemansiella canarii*. *Bioresource Technology*, v. 289, p. 121655, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121655>.
11. KYOMUHIMBO, Hilda Dinah; BRINK, Hendrik G. Applications and immobilization strategies of the copper-centred laccase enzyme: a review. *Heliyon*, v. 9, n. 2, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13156>.
12. LI, Yangyang et al. A CRISPR/Cas9-based visual toolkit enabling multiplex integration at specific genomic loci in *Aspergillus niger*. *Synthetic and Systems Biotechnology*, v. 9, n. 2, p. 209–216, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2024.01.014>.
13. ORLANDELLI, R. C.; SPECIAN, V.; FELBER, A. C.; PAMPHILE, J. A. Enzimas de interesse industrial: produção por fungos e aplicações. *SaBios – Revista de Saúde e Biologia*, v. 7, n. 3, 2012. Disponível em: <https://revista2.grupointegrado.br/revista/index.php/sabios/article/view/1346>. Acesso em: 8 jan. 2026.
14. PAIVA, Cindy Kurovski de Castro. *Produção de lacase por fungo isolado de sedimento marinho*. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal, Brasil, 2016.
15. PANIGRAHY, Namita et al. A comprehensive review on eco-toxicity and biodegradation of phenolics: Recent progress and future outlook. *Environmental Technology & Innovation*, v. 27, p. 102423, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102423>.
16. PATEL, Sanjay K. S. et al. Immobilization of laccase on SiO₂ nanocarriers improves its stability and reusability. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 24, n. 5, p. 639–647, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4014/jmb.1401.01025>.
17. SINGH, Anil Kumar et al. Laccase-based biocatalytic systems application in sustainable degradation of pharmaceutically active contaminants. *Journal of Hazardous Materials*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136803>.
18. SODHI, A. S.; BHATIA, S.; BATRA, N. Laccase: sustainable production strategies, heterologous expression and potential biotechnological

- applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135745>.
19. TAVARES, Ana P. M. et al. Laccase immobilization over multi-walled carbon nanotubes: kinetic, thermodynamic and stability studies. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 454, p. 52–60, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.04.054>.
 20. THEERACHAT, Monnat et al. Engineering and production of laccase from *Trametes versicolor* in the yeast *Yarrowia lipolytica*. *Bioresource Technology*, v. 125, p. 267–274, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.117>.
 21. UBER, Thaís Marques et al. Comparative detoxification of Remazol Brilliant Blue R by free and immobilized laccase of *Oudemansiella canarii*. *Biocatalysis and Biotransformation*, v. 40, n. 1, p. 17–28, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/10242422.2020.1835873>.
 22. UBER, Thaís Marques et al. Enzymes from basidiomycetes—Peculiar and efficient tools for biotechnology. In: *Biotechnology of Microbial Enzymes*. Academic Press, 2023. p. 129–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19059-9.00023-2>.
 23. UR RAHMAN, Mujeeb et al. Harnessing the power of bacterial laccases for xenobiotic degradation in water: A 10-year overview. *Science of the Total Environment*, v. 918, p. 170498, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170498>.
 24. ZAINITH, Surabhi et al. Microbial ligninolytic enzymes and their role in bioremediation. In: *Microorganisms for Sustainable Environment and Health*. Elsevier, 2020. p. 179–203. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819001-2.00009-7>.
 25. ZENG, Jun et al. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbon structure on PAH mineralization and toxicity to soil microorganisms after oxidative bioremediation by laccase. *Environmental Pollution*, v. 287, p.

Autores

Danielly Maria Paixão Novi

Programa de Pós graduação em Bioquímica, Universidade Estadual de Maringá