

CAPÍTULO 3

SCAFFOLDS ROTOFIADOS DE POLICAPROLACTONA COM ÓLEOS DA AMAZÔNIA: OBTENÇÃO E ANÁLISE DE VIABILIDADE CELULAR



<https://doi.org/10.22533/at.ed.630112526023>

Data de aceite: 07/03/2025

Caio Augusto de Almeida Canelas

Universidade Federal do Pará –
Programa de Pós-graduação em
Ciências Farmacêuticas – Grupo de
Desenvolvimento Tecnológico em
Biomateriais e Bioprodutos da Amazônia
Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/9601042341734349>

Atos Tavares Matos

Universidade Federal do Pará –
Faculdade de Biotecnologia – Grupo
de Desenvolvimento Tecnológico em
Biomateriais e Bioprodutos da Amazônia
Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/6226444469082807>

Débora Freitas Silva

Universidade Federal do Pará –
Programa de Pós-graduação em Ciência
e Engenharia de Materiais – Grupo
de Desenvolvimento Tecnológico em
Biomateriais e Bioprodutos da Amazônia
Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/9270044320239122>

Daniela Carolina Almeida dos Santos

Universidade Federal do Pará –
Faculdade de Biomedicina / Instituto
Evandro Chagas – Laboratório de
Microscopia Eletrônica, Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/0719632875563208>

Ana Paula Drummond Rodrigues

Instituto Evandro Chagas, Ministério
da Saúde – Laboratório de Microscopia
Eletrônica, Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/3251051891960297>

Marcele Fonseca Passos

Universidade Federal do Pará – Programa
de Pós-graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais / Faculdade de
Biotecnologia - Grupo de Desenvolvimento
Tecnológico em Biomateriais e
Bioprodutos da Amazônia, Belém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/0588450144351187>

RESUMO: As fraturas ósseas representam um problema crescente, e o uso de enxertos autógenos é uma alternativa limitada, o que motiva o desenvolvimento de arcabouços (*scaffolds*) sintéticos, visando promover a regeneração do osso. Nesse contexto, a adição de óleos vegetais nos materiais pode auxiliar na modulação da inflamação, estimular a proliferação celular e lhes conferir propriedades antioxidantes e antimicrobianas. Assim, este capítulo aborda o desenvolvimento de *scaffolds* rotofiados de policaprolactona (PCL) e polihidroxibutirato-co-valerato (PHBv), incorporados com óleos amazônicos de açai (*Euterpe oleracea*) e jupati (*Raphia taedigera*), visando potencial uso na regeneração tecidual óssea. O objetivo foi

avaliar a morfologia e a viabilidade celular dos *scaffolds* desenvolvidos, utilizando microscopia eletrônica de varredura e a análise de citotoxicidade, pela técnica MTT((3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-brometo de difeniltetrazólio). Ademais, a composição dos óleos foi analisada por cromatografia gasosa, revelando concentrações superiores a 68% de ácidos graxos insaturados. As blendas de PCL/PHBv com óleo de jupati apresentaram viabilidade celular superior a 98%, demonstrando excelente biocompatibilidade, enquanto os *scaffolds* apenas com PCL apresentaram viabilidade celular reduzida. As análises morfológicas revelaram uma estrutura porosa adequada para a regeneração tecidual. E, de forma geral, os resultados indicaram que os *scaffolds* contendo óleo de jupati e açaí têm potencial para aplicações em engenharia tecidual, sugerindo demais ensaios químicos, mecânicos e biológicos.

PALAVRAS-CHAVE: açaí, biomateriais, jupati, PCL, PHBv, rotação, regeneração óssea

ROTARY JET-SPUN POLYCAPROLACTONE SCAFFOLDS WITH AMAZONIAN OILS: PRODUCTION AND CELL VIABILITY ANALYSIS

ABSTRACT: Bone fractures represent a growing problem, and using autogenous grafts is a limited alternative, which motivates the development of synthetic scaffolds to promote bone regeneration. In this context, adding vegetable oils to materials can aid in modulating inflammation, stimulating cell proliferation, and providing antioxidant and antimicrobial properties. Thus, this chapter addresses the development of electrospun scaffolds made of polycaprolactone (PCL) and polyhydroxybutyrate-co-valerate (PHBv) incorporated with Amazonian oils from açaí (*Euterpe oleracea*) and jupati (*Raphia taedigera*), for potential use in bone tissue regeneration. The objective was to evaluate the morphology and cellular viability of the developed scaffolds using scanning electron microscopy and cytotoxicity analysis through the MTT (3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide) assay. Additionally, the composition of the oils was analyzed by gas chromatography, revealing concentrations of over 68% of unsaturated fatty acids. PCL/PHBv blends with jupati oil exhibited cell viability greater than 98%, demonstrating excellent biocompatibility, whereas scaffolds composed solely of PCL showed reduced cell viability. Morphological analyses revealed a porous structure suitable for tissue regeneration. Overall, the results indicated that scaffolds containing jupati and açaí oil hold potential for tissue engineering applications, suggesting further chemical, mechanical, and biological assessments.

KEYWORDS: açaí, biomateriais, jupati, PCL, PHBV, rotary-spinning, bone regeneration

INTRODUÇÃO

A ocorrência de fraturas e anomalias ósseas afeta milhares de pessoas anualmente, resultantes de acidentes, doenças ou do envelhecimento populacional (Fang et al., 2021). A ABRASSO (Associação Brasileira de Avaliação Óssea e Osteometabolismo) informa que, em casos de fraturas no quadril, de uma a quatro pessoas falecem nos primeiros meses após a cirurgia. Em relação ao Brasil, a expectativa é que o número de fraturas dessa natureza dobre até 2040, alcançando cerca de 200 mil casos por ano, de acordo com os dados de uma pesquisa da Fundação Internacional de Osteoporose (Stolnicki et al., 2022). Esses desafios clínicos têm impulsionado o desenvolvimento de novos materiais para enxertos que promovam a regeneração óssea e melhorem a recuperação pós-operatória (Sagadevan et al., 2023).

Enxertos autógenos, que utilizam tecidos do próprio paciente, continuam sendo a referência nos tratamentos regenerativos (Fang et al., 2022). Contudo, sua aplicabilidade é limitada pela quantidade restrita de material disponível, além de riscos associados ao procedimento de retirada. Em resposta a essas limitações, pesquisadores têm avançado no desenvolvimento de enxertos sintéticos, como scaffolds, que replicam aspectos estruturais e funcionais da matriz extracelular natural (Ravoor et al., 2021). Scaffolds não apenas proporcionam suporte para a adesão celular e proliferação, mas também promovem o reparo de defeitos ósseos com baixa toxicidade celular (Meesuk et al., 2022).

Entre os métodos utilizados para fabricar scaffolds, a técnica de rotofiação tem se destacado devido à sua capacidade de produzir fibras em escala micro, organizadas de maneira alinhada ou aleatória (Wang et al., 2022). Esse método utiliza a força centrífuga para projetar soluções poliméricas através de pequenos orifícios, formando estruturas fibrosas complexas (Giorno et al., 2022). Polímeros naturais e sintéticos, como quitosana (CS), ácido poli-L-lático (PLLA), policaprolactona (PCL) e polihidroxibutirato-co-valerato (PHBV), têm sido amplamente estudados na produção de scaffolds para regeneração tecidual (Li et al., 2022; Bahú et al., 2022; Marjuban et al., 2023). A PCL é valorizada por sua capacidade de formar blendas poliméricas versáteis e pela sua biocompatibilidade, enquanto o PHBV se destaca por suas propriedades piezoelétricas, que estimulam a atividade celular durante a regeneração óssea (Asl et al., 2022; Modolo et al., 2023). Juntas, essas características tornam esses polímeros soluções promissoras para aplicações na engenharia tecidual e no tratamento de fraturas ósseas.

Além dos polímeros, estudos recentes apontam que o uso de adjuvantes em *scaffolds*, como extratos amazônicos e óleos vegetais fixos, podem agregar diversos benefícios, em virtude da composição química e das propriedades bioativas dos constituintes, tal como: propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias, antimicrobianas e cicatrizantes (Mazzocchi et al., 2021; Ribeiro; Silva; Reis, 2022). Entre as oleaginosas, o óleo da semente de Açáí (*Euterpe oleracea*) se destaca por seu alto conteúdo de antocianinas, que possui caráter anti-inflamatório e reduz o nível de colesterol LDL (*Low Density Lipoprotein*), além da presença de ácido oleico, terpenos, entre outros (de Oliveira; Schwartz, 2018; de Souza et al., 2020). Outra fruta amazônica também de grande interesse e ainda pouco estudada é o Jupati (*Raphia taedigera*), encontrada em ecossistemas tropicais e subtropicais. Seu óleo é rico em lupenona, um composto com atividade antimicrobiana e antitumoral, além de outras substâncias com propriedades bioativas (Awonyemi; Abegunde; Olabiran, 2020).

O uso de óleos vegetais fixos na regeneração tecidual oferece múltiplas vantagens, devido à sua composição rica em ácidos graxos, antioxidantes e outros compostos bioativos. Isso pois, além da modulação da inflamação durante o processo de cicatrização, alguns componentes podem estimular a proliferação de fibroblastos e queratinócitos – células essenciais para regeneração (McClements; Weiss, 2005). Componentes como a vitamina E, presentes em muitos óleos vegetais, protegem as células contra o estresse oxidativo e ajudam a prevenir o envelhecimento celular precoce através da neutralização

dos radicais livres (Castelo-Branco; Torres, 2011). No trabalho de Mondal et al. (2021), *scaffolds* nanocompósitos baseados em óleo de soja e nanopartículas de hidroxiapatita (nHA) apresentaram morfologia controlada e diferenciação osteogênica aprimorada, para potencial em engenharia tecidual óssea.

Em contrapartida, no desenvolvimento dos *scaffolds*, são necessários diversos estudos para avaliar as respostas biológicas dos tecidos em contato com esses materiais. Estudos *in vitro* nos permitem simular essas respostas, muitas vezes, diminuindo a necessidade de testes em animais (Paretsis et al., 2021). Um dos estudos mais importantes é a avaliação da biocompatibilidade (Fang et al., 2022), via testes de citotoxicidade, por exemplo, que determinam se o material pode causar morte das células ou inibir o crescimento. O teste utilizando o composto MTT ((3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-brometo de difeniltetrazólio), de cor amarela e solúvel em água, é um dos mais realizados, baseando-se no princípio da sua redução, pelo metabolismo celular, em formazan (de cor azul e insolúvel) e a medição da intensidade da cor formada, proporcional ao número de células viáveis (ISO 10993/1-5, 2018).

Assim, com base nos expostos acima, o objetivo deste estudo foi desenvolver *scaffolds* de PCL, PHBv e blendas de PCL / PHBv acrescidos dos óleos vegetais amazônicos de açai e jupati, pela técnica de rotofiação, e avaliar a morfologia e a viabilidade celular dos mesmos via microscopia eletrônica de varredura e o ensaio de citotoxicidade, respectivamente, para potencial uso em engenharia tecidual óssea.

METODOLOGIA

Materiais

Policaprolactona comercial (PCL) (CAS: 24980-41-4), de peso molecular médio 80.000, e polihidroxibutirato-co-valerato (PHBV) (CAS: 29435-48-1), foram obtidos da Sigma-Aldrich (Brasil). O óleo de Açai (OA) (*Euterpe oleracea*) e o óleo de Jupati (OJ) (*Raphia taedigera*) foram doados pela CitroBio Brazilian Biodiversity (Torrinha - SP). As especificações técnicas dos óleos estão descritas na Tabela 1.

Características	Açai	Jupati
Aparência (25°C)	Líquido viscoso	Líquido Viscoso
Cor	Esverdeado	Vermelho a marrom
Odor	Característico	Característico
Densidade	0,913 (25°C g/mL)	0,912 (25°C g/mL)
Índice de refração (20°C)	1,46911	1,46857
Índice de acidez	5,05%	9,57%
Índice de peróxido	3,97 (meq O ₂ /kg)	5,92 (meq O ₂ /kg)
Índice de iodo	68,65 (cg I ₂ /100g)	80,39 (cg I ₂ /100g)
Índice de saponificação	207,00 (mg KOH/g)	191,00 (mg KOH/g)
Matéria insaponificável (bioativos)	1,20%	3,67%

Tabela 1. Especificações técnicas dos óleos de Açai e Jupati, segundo o fornecedor (CitroBio)

MÉTODO

Obtenção dos *scaffolds* pela técnica de rotofiação

Soluções de PCL e PHBv, à temperatura ambiente, foram preparadas a 20% m / v, utilizando diclorometano como solvente. Blendas de PCL / PHBv a 75:25 (v / v) foram obtidas a partir da mistura das suas soluções originais. Todas as soluções foram rotofiadadas à pressão atmosférica e com velocidade de 12.000 rpm. Em seguida, as amostras foram secas a 45° C, durante 48 hrs, a fim de eliminar o solvente residual. Para a adição dos óleos vegetais amazônicos e seus blends (açai / jupati a 75:25 v / v), utilizou-se agitador magnético por 30 min, a fim de favorecer a homogeneização. Em seguida, os óleos foram adicionados nos *scaffolds* poliméricos pela técnica de imersão. O excesso de oleaginosa dos *scaffolds* foi retirado em papel toalha. A composição e identificação dos materiais pode ser vista na Tabela 2.

IDENTIFICAÇÃO	COMPONENTES (%)			
	PCL	PHBv	Açaí	Jupati
PCL-0	100	-	-	-
PCLA	100	-	100	-
PCLJ	100	-	-	100
PCLA75	100	-	75	25
PCLPH	50	50	-	-
PCLPHA	50	50	100	-
PCLPHJ	50	50	-	100
PCLPHA75	50	50	75	25

Tabela 2. Composição e identificação das amostras

Composição em ácidos graxos dos óleos de açai e jupati

A composição em ácidos graxos dos óleos fixos foi realizada através de um sistema de cromatografia gasosa (Varian CP 3800), equipado com uma coluna capilar (Agilent, 30 m x 0,32 mm CP WAX 52 CB) e um detector de ionização de chama de hidrogênio, conforme descrito por Silva et al., (2021). Para tanto, foram utilizados os métodos oficiais da American Oil Chemists' Society's - AOCS (American Oil Chemists' Society, 1995).

Análise de Viabilidade Celular

Células de fibroblastos murinos da linhagem BALB/c 3T3, clone A31, obtidos do Banco de Células do Rio de Janeiro (BCRJ: 0047) foram cultivadas em meio DMEM (Dulbecco's Modified Eagle Medium), suplementado com 10% de soro bovino fetal (SBF). Para tanto, as células foram mantidas em estufa a 37°C, com uma atmosfera contendo 5% de CO₂, até que a cultura alcançasse uma confluência de 80% ou mais.

Quando a confluência desejada foi atingida, os fibroblastos foram submetidos ao processo de desprendimento do frasco, utilizando tripsina a 0,05%, por um período de 1 minuto a 37°C. A tripsina foi posteriormente neutralizada com soro bovino fetal (SBF). O conteúdo da garrafa de cultura foi transferido para um tubo de 15 mL e centrifugado a 2500 rpm por 5 minutos. Após a centrifugação, o sobrenadante foi desprezado e as células sedimentadas foram ressuspensas em 5 mL de DMEM contendo 5% de SBF (NERIS, 2018). Para os ensaios subsequentes, as células foram distribuídas em uma concentração de 1×10^4 células / mL.

Para a avaliação da viabilidade celular, foram utilizadas placas de 24 poços. Cada poço recebeu os *scaffolds* esterilizados, seguidos da adição de 1×10^4 células/mL. O meio DMEM contendo 5% de SBF foi adicionado aos poços, e as placas, contendo as células e os *scaffolds*, foram mantidas em estufa a 37°C, em uma atmosfera contendo 5% de CO₂, por 48 horas.

Após o período de incubação, o sobrenadante foi retirado dos poços, que foram então lavados com PBS (*Phosphate Buffered Saline*). Após a lavagem, foi adicionado MTT ([3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyl tetrazolium bromide]) a uma concentração de 0,5 mg/mL, diluído em PBS. As placas foram incubadas novamente a 37°C, em uma atmosfera contendo 5% de CO₂, por 3 horas.

No final da incubação, o sobrenadante foi retirado, e os poços foram lavados uma vez com PBS. Em seguida, foram adicionados 200 µL de dimetilsulfóxido (DMSO) em cada poço para solubilização dos cristais de formazan, seguido de incubação com agitação por 10 minutos. A solução resultante foi então transferida para uma placa de 96 poços e a leitura foi realizada em um espectrofotômetro com comprimento de onda de 570 nm (Laroca, 2022).

Como controles, um grupo de células foi tratado com solução de 10% de formol em PBS para induzir a morte celular, e o outro grupo de células, foi cultivado sem a presença de qualquer *scaffold*.

Microscopia Eletrônica de Varredura

Microscópio eletrônico de varredura (Jeol JSM -6610LV) foi utilizado para avaliar a morfologia dos *scaffolds* (porosidade e diâmetro das fibras), além da adesão celular dos materiais mais viáveis em termos de citotoxicidade. Neste último caso, os *scaffolds* foram dispostos em placas de 24 poços, com a adição de fibroblastos murinos na concentração de 1×10^4 células/mL. Após 48 horas de incubação, nas condições já descritas, o meio de cultura foi removido, e os materiais foram processados para análise morfológica com voltagem de aceleração de 1 kV e ampliação de 500x e 1000x, conforme descrito por Rodrigues et al. (2011).

Análise estatística:

Três experimentos independentes foram realizados para cada *scaffold*, em triplicata, e a análise estatística dos dados foi conduzida utilizando o software GraphPad Prism 6™. O teste estatístico *t* de Student foi empregado para comparar os resultados. Diferenças estatisticamente significativas foram consideradas para valores de $p < 0,05$ (Menezes; Andrade, 2021).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Composição em ácidos graxos dos óleos de açaí e jupati

A Tabela 3 contém os percentuais relativos de ácidos graxos dos óleos de açaí e jupati. A análise por cromatografia gasosa do óleo de açaí revelou a presença de dez ácidos graxos. Este óleo é principalmente composto por ácidos graxos insaturados (75,49%), com valores similares aos encontrados na literatura (Bezerra et al., 2017; Borges et al., 2024; Rosa et al., 2019a, 2019b). Os principais constituintes identificados foram o ácido oleico (62,32%), ácido palmítico (21,83%) e ácido linoleico (9,25%). O ácido oleico (ômega 9) e o ácido linoleico (ômega 6) são ácidos graxos essenciais que regulam o metabolismo hormonal e promovem a cicatrização do organismo, aumentando a permeabilidade celular (Bezerra et al., 2017). Por outro lado, o ácido palmítico possui propriedades emolientes úteis em formulações de cremes oclusivos e hidratantes (Loureiro Contente et al., 2020). Também foram identificados, em proporções menores, os seguintes compostos: ácido láurico (0,1%), ácido mirístico (0,14%), ácido palmitoleico (2,8%), ácido esteárico (2,17%), ácido linolênico (0,59%), ácido araquídico (0,14%) e ácido erúcido (0,53%), que são comuns na composição geral do óleo de açaí (BORGES et al., 2024; Loureiro Contente et al., 2020; Nascimento et al., 2008; Rosa et al., 2019b). A composição do óleo de jupati também revelou percentuais de ácido bêhenico (0,32%) e ácido lignocérico (0,38%), além dos mencionados anteriormente. O óleo de jupati é principalmente composto por ácidos graxos insaturados (68,42%), especialmente ácido oleico (49,8%) e ácido linoleico (16,67%) (Canelas et al., 2022). Esses resultados apontam constituintes químicos interessantes para os óleos de açaí e jupati, que podem favorecer em termos de propriedades antibacterianas e da neovascularização (Canelas et al., 2023).

Ácidos Graxos (%)	Cadeia	Açaí	Jupati
Ác. Laurico	C12:0	0,1	0,45
Ác. Mirístico	C14:0	0,14	0,3
Ác. Palmítico	C16:0	21,83	28
Ác. Palmitoleico	C16:1	2,8	0,48
Ác. Esteárico	C18:0	2,17	1,45
Ác. Oleico	C18:1	62,32	49,8
Ác. Linoleico	C18:2	9,25	16,67
Ác. Linolênico	C18:3	0,59	0,61
Ác. Araquídico	C20:0	0,14	0,44
Ác. Bêhenico	C22:0	*	0,32
Ác. Erúcido	C22:1	0,53	0,86
Ác. Lignocérico	C24:0	*	0,38

Tabela 3: Composição em ácidos graxos dos óleos de açaí e jupati

Análise Morfológica

Os *scaffolds* apresentaram uma morfologia microfibrilar e porosa (Figura 1), com diâmetros entre 8 e 32 μm , características que podem favorecer a ancoragem celular e acelerar a hemostasia em feridas, além de absorver o exsudato da lesão, como apontado por WANG et al. (2021). Além disso, a presença do óleo de jupati e do óleo de açaí na matriz polimérica dos *scaffolds*, tanto naqueles compostos apenas de PCL quanto nos de PCL/PHBv, foi identificada por mudanças na morfologia das fibras, observadas nas imagens do MEV. As amostras com óleos incorporados mostraram redução de poros em comparação às amostras controle, sugerindo que estes foram preenchidos pela adição dos óleos (Silva et al., 2021).

No que tange à adesão dos fibroblastos nas matrizes poliméricas (arcabouços), os dados analisados não foram conclusivos. Para melhorar essa adesão, contudo, uma abordagem proposta é a modificação da superfície dos arcabouços, ou da composição dos materiais, buscando simular a estrutura do ambiente celular natural. A adição de proteínas da matriz extracelular ou de peptídeos, por exemplo, representa uma estratégia relevante, pois regula a adesão, migração e crescimento celular ao se ligar aos receptores de integrina nas membranas celulares (Elnaggar; El-Fawal; Allam, 2021). Outras técnicas, como tratamento com plasma, tratamento químico e radiação ultravioleta, também podem ser aplicadas para modificar as propriedades químicas e biológicas, bem como aspectos físicos dos polímeros, visando melhorar a adesão celular (Ghomi et al., 2023; Solovieva et al., 2022), conforme já observado por Lama et al. (2022) em matrizes fiadas de PCL.

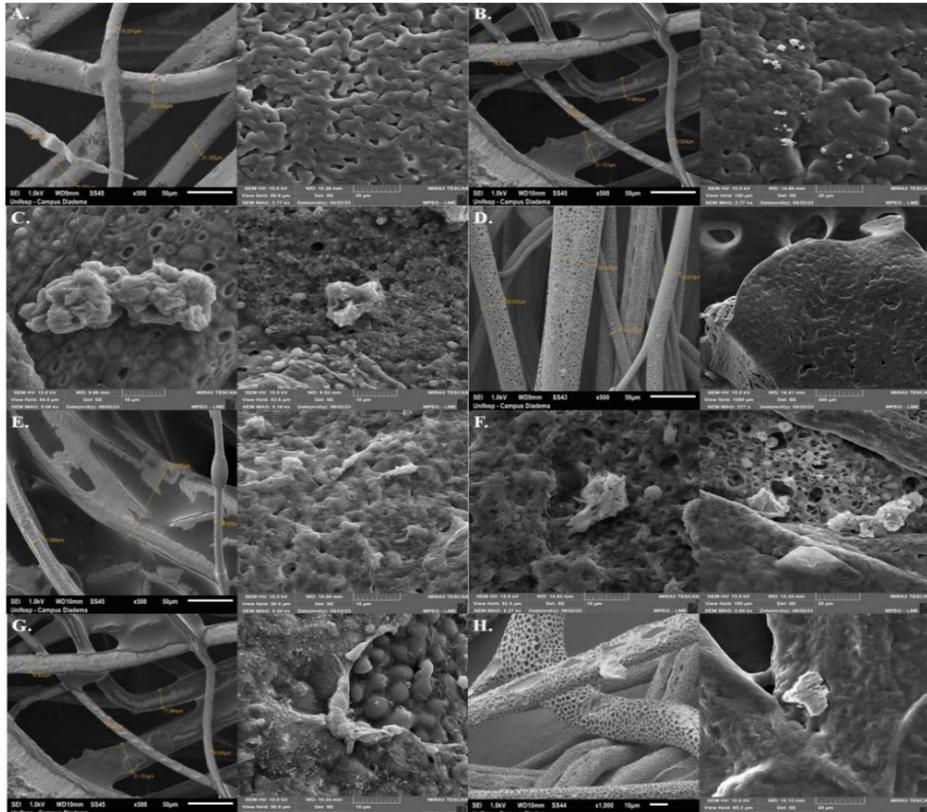


Figura 1: Análise morfológica dos *scaffolds*. A. PCLJ; B. PCLA; C. PCLA75; D. PCL-0; E. PCLPHJ; F. PCLPHA; G. PCLPHA75; H. PCLPH.

Análise de viabilidade celular

Scaffolds poliméricos, como estruturas tridimensionais, devem oferecer suporte para o crescimento e adesão celular, além de proporcionar a formação de um novo tecido. Para tanto, devem apresentar biocompatibilidade e biofuncionalidade. Ou seja, é necessário que o material desempenhe a função desejada sem provocar uma resposta adversa ao organismo. Em outras palavras, o *scaffold* precisa interagir com fluidos biológicos sem causar toxicidade. Sob este ponto de vista, o ensaio de MTT é um dos testes padrão para avaliação *in vitro* da viabilidade celular pelo método do contato direto.

A Figura 2 apresenta a análise de citotoxicidade dos *scaffolds* frente a células de fibroblastos murinos. Os resultados indicaram viabilidade celular de 82% (Figura 2a) para os *scaffolds* obtidos a partir da PCL. No entanto, quando combinados com PHBV, a viabilidade aumentou para 98% (Figura 2b). Romo-Uribe (2022) em seus estudos mostraram viabilidade celular superior a 90% para PHBV, enquanto Díaz et al. (2019) produziu compósitos de PCL e magnetita com resultados superiores a 70%. O trabalho de Raasti (2022) mostrou que a combinação de PCL e PHBV pode aumentar a tenacidade à fratura

do material original, melhorando a flexibilidade e a resistência ao impacto dos *scaffolds*. Além disso, a combinação desses dois polímeros resultou em uma maior compatibilidade biológica. Esse aumento nas propriedades mecânicas e na biocompatibilidade tornaram as blendas de PCL e PHBv mais adequadas para aplicações biomédicas (Raziyan et al., 2024; Cavalcante; de Menezes, 2024), resultados similares encontrados neste estudo, em termos de viabilidade celular. Em adição, *scaffolds* embebidos em óleos vegetais de açaí e jupati: PCLJ, PCLPHJ, PCLA75 e PCLPHA75, apresentaram viabilidades de 80%, >98%, 75%, e >90%, respectivamente.

O material contendo PCLA, em contraste, exibiu uma viabilidade reduzida, de cerca de 58%. Estudos vêm demonstrando o potencial do açaí na recuperação de lesões, otimização do tempo de cicatrização e efeito positivo na migração celular (Borges et al., 2024a). A polpa de açaí não processada tem apresentado efeito protetor contra a resposta inflamatória aguda (Xiong et al., 2020), através da supressão significativa dos níveis transcricionais de genes regulatórios inflamatórios, incluindo IL-1 β , COX-2, iNOS e IL-6 (Xiong et al., 2020). Outros estudos relatam seus efeitos antinociceptivos, anticonvulsivantes, antiangiogênicos, antileishmania, antienvhecimento e neuroprotetores (Magalhães et al., 2020). Contudo, no presente estudo, o óleo de açaí investigado, não apresentou resultados positivos para a viabilidade celular, e várias são as hipóteses que podem ter interferido nestes resultados, tais como: concentração do óleo, método de extração e tipo de linhagem celular. Por outro lado, a adição de PHBv melhorou a viabilidade em 40%. Mas, novas investigações devem ser realizadas a fim de verificar se as propriedades do óleo permaneceram inalteradas.

Os grupos que incluíram óleo de jupati, por outro lado, resultaram em *scaffolds* promissores, no que tange à ausência de toxicidade. A *Raphia taedigera* Mart., típica da região Amazônica, da família *Arecaceae*, é rica em fitoquímicos e metabólitos secundários com efeitos antimicrobianos, antioxidantes e anticancerígenos (Awonyemi; Abegunde; Olabiran, 2020).

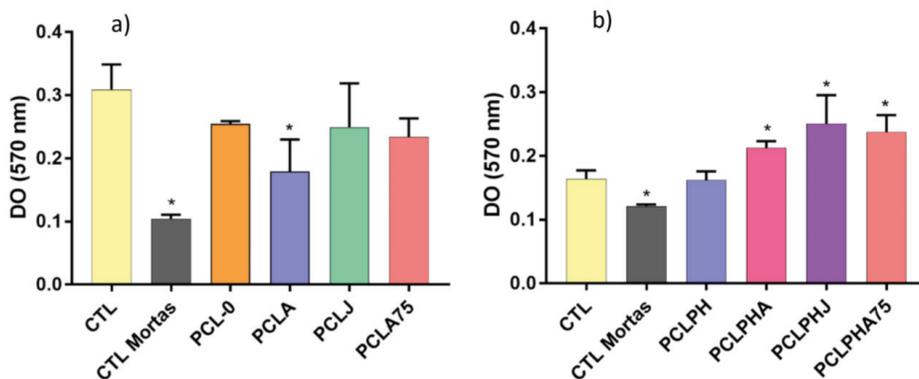


Figura 2: Viabilidade celular dos *scaffolds* avaliada pelo teste MTT. Diferenças estatísticas acima de $p < 0,05$ são indicadas com *.

DO = densidade óptica

CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstraram o potencial dos *scaffolds* rotofiados de policaprolactona (PCL) e polihidroxibutirato-co-valerato (PHBv), combinados com óleos vegetais amazônicos, como materiais promissores para aplicações em engenharia de tecidos, especialmente na regeneração óssea. A sinergia entre os biopolímeros, combinados com os bioativos dos óleos amazônicos, aponta para a viabilidade celular dos arcabouços híbridos. O óleo de jupati, particularmente, destacou-se pela sua biocompatibilidade, com ausência de toxicidade significativa, enquanto o óleo de açaí apresentou limitações que requerem estudos futuros para otimização de sua aplicação.

No entanto, os resultados obtidos não apenas reforçam a viabilidade de materiais bioativos derivados de fontes naturais, como também sugerem a possibilidade de ampliação de suas aplicações biomédicas, promovendo a sustentabilidade e valorizando a biodiversidade da Amazônia. A incorporação de insumos naturais em biomateriais representa um avanço importante, com potencial para contribuir para o desenvolvimento de dispositivos médicos mais eficientes e ecologicamente responsáveis. Trata-se, assim, de um diferencial que reforça a relevância científica, tecnológica e ecológica da abordagem estudada.

REFERÊNCIAS

American Oil Chemists' Society (AOCS). *Official Methods and Recommended Practices of the AOCS*, 4th ed.; AOCS: Urbana, IL, USA, 1995.

ASL, M. A. et al. **Polyhydroxybutyrate-starch/carbon nanotube electrospun nanocomposite: A highly potential scaffold for bone tissue engineering applications.** *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 223, p. 524–542, 31 dez. 2022.

AWONYEMI, I. O.; ABEGUNDE, M. S.; OLABIRAN, T. E. **Analysis of bioactive compounds from *Raphia taedigera* using gas chromatography–mass spectrometry.** *Eurasian Chemical Communications*, v. 2, n. 8, p. 938–944, 1 ago. 2020.

BAHÚ, J. O. et al. **Rotary Jet Spinning (RJS): A Key Process to Produce Biopolymeric Wound Dressings.** *PharmaceuticsMDPI*, , 1 nov. 2022.

BARBOSA, K. A. et al. **Rotary jet-spun curcumin-loaded poly L-lactic acid membranes for wound-healing applications.** *Journal of Materials Research and Technology*, v. 18, p. 3273–3282, 1 maio 2022.

BEZERRA, C. V. et al. **Technological properties of amazonian oils and fats and their applications in the food industry.** *Food chemistry*, v. 221, p. 1466–1473, 2017.

BORGES, K. R. A. et al. **Açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) Seed Oil and Its Nanoemulsion: Chemical Characterisation, Toxicity Evaluation, Antioxidant and Anticancer Activities.** *Current Issues in Molecular Biology*, v. 46, n. 5, p. 3763–3793, 23 abr. 2024.

CANELAS, C. A. DE A. et al. **Influência do grau de insaturação de óleos vegetais em espécies amazônicas na obtenção de biopolímeros.** Em: Engenharia química: Desenvolvimento de novos processos e produtos 3: 2. ed. [s.l.] Editora Atena, 2022. v. 1p. 1–11.

CANELAS, C. A. DE A. et al. **DESENVOLVIMENTO DE EMULSÕES FITOTERÁPICAS À BASE DE ÓLEOS VEGETAIS AMAZÔNICOS PARA POTENCIAL USO COMO BIOMATERIAL CUTÂNEO.** Em: Engenharias: Desenvolvimento de processos e produtos 2. [s.l.] Editora Atena, 2023. v. 2p. 38–50.

CASTELO-BRANCO, V. N.; TORRES, A. G. **Capacidade antioxidante total de óleos vegetais comestíveis: determinantes químicos e sua relação com a qualidade dos óleos.** Revista de Nutrição, v. 24, p. 173–187, 2011.

CAVALCANTE, M. DE P.; DE MENEZES, L. R. **Effects of polycaprolactone viscosity on morphology, mechanical properties, water uptake, and cellular viability in poly(3-hydroxybutyrate)/polycaprolactone blends for tissue engineering.** Polymers for Advanced Technologies, v. 35, n. 1, p. e6224, 1 jan. 2024.

DE OLIVEIRA, M. DO S. P.; SCHWARTZ, G. **Açaí—*Euterpe oleracea*.** Em: **Exotic Fruits Reference Guide.** [s.l.] Elsevier, 2018. p. 1–5.

DÍAZ, E. et al. **3D cytocompatible composites of PCL/magnetite.** Materials, v. 12, n. 23, 1 dez. 2019.

ELNAGGAR, M. A.; EL-FAWAL, H. A. N.; ALLAM, N. K. **Biocompatible PCL-nanofibers scaffold with immobilized fibronectin and laminin for neuronal tissue regeneration.** Materials Science and Engineering: C, v. 119, p. 111550, 2021.

FANG, H. et al. **Emerging zero-dimensional to four-dimensional biomaterials for bone regeneration.** Journal of NanobiotechnologyBioMed Central Ltd, , 1 dez. 2022.

FANG, Z. et al. **The Development Tendency of 3D-Printed Bioceramic Scaffolds for Applications Ranging From Bone Tissue Regeneration to Bone Tumor Therapy.** Frontiers in Bioengineering and BiotechnologyFrontiers Media S.A., , 20 dez. 2021.

GHOMI, E. R. et al. **Electrospun aligned PCL/gelatin scaffolds mimicking the skin ECM for effective antimicrobial wound dressings.** Advanced Fiber Materials, v. 5, n. 1, p. 235–251, 2023.

GIORNO, L. P.; RODRIGUES, L. R.; SANTOS, A. R. **Characterization and in vitro analysis of a poly(ϵ -caprolactone)–gelatin matrix produced by rotary jet spinning and applied as a skin dressing.** Polymer Bulletin, 2022.

LAMA, S. et al. **Polydatin Incorporated in Polycaprolactone Nanofibers Improves Osteogenic Differentiation.** Pharmaceuticals, v. 15, n. 6, 1 jun. 2022.

LAROCA, B. A. **Estudo da atividade biológica de inibidores de cisteíno catepsinas antineoplásicos em linhagens celulares de câncer de pâncreas (MIA PaCa-2 e BxPC-3).** Dissertação (Mestrado)—São Carlos - SP: Instituto de Química de São Carlos, 2022.

LI, Z. et al. **Oxidized Chitosan-Tobramycin (OCS-TOB) Submicro-Fibers for Biomedical Applications.** Pharmaceuticals, v. 14, n. 6, 1 jun. 2022.

- LOUREIRO CONTENTE, D. M. et al. **Nanoemulsions of Acai Oil: Physicochemical Characterization for the Topical Delivery of Antifungal Drugs.** Chemical Engineering and Technology, v. 43, n. 7, p. 1424–1432, 1 jul. 2020.
- MARJUBAN, S. M. H. et al. **Recent Advances in Centrifugal Spinning and Their Applications in Tissue Engineering.** PolymersMDPI, , 1 mar. 2023.
- MAZZOCCHI, A. et al. **Bioactive Compounds in Edible Oils and Their Role in Oxidative Stress and Inflammation.** Frontiers in PhysiologyFrontiers Media S.A., , 30 abr. 2021.
- MCCLEMENTS, D.; WEISS, J. **Bailey's industrial oil and fat products.** Lipid Emulsions, p. 457–502, 1 jan. 2005.
- MEESUK, L. et al. **Osteogenic differentiation and proliferation potentials of human bone marrow and umbilical cord-derived mesenchymal stem cells on the 3D-printed hydroxyapatite scaffolds.** Scientific Reports, v. 12, n. 1, 1 dez. 2022.
- MENEGHETTI, D. H. et al. **Electrical stimulation therapy and rotary jet-spinning scaffold to treat bone defects.** Anatomical Record, v. 306, n. 1, p. 79–91, 1 jan. 2023.
- MENEZES, B. S.; ANDRADE, E. N. DE. **Estimulação elétrica nervosa transcutânea interativa e convencional em mulheres com dismenorreia primária.** Fisioterapia Brasil, v. 22, n. 2, p. 196–204, 21 maio 2021.
- MODOLO, L. P. et al. **Dense, porous, and fibrous scaffolds composed of PHBV, PCL, and their 75:25 blend: an in vitro morphological and cytochemical characterization.** International Journal of Polymer Analysis and Characterization, v. 28, n. 1, p. 73–87, 2023.
- MONDAL, Dibakar; et al. **Acrylated epoxidized soybean oil/hydroxyapatite-based nanocomposite scaffolds prepared by additive manufacturing for bone tissue engineering.** Materials Science and Engineering C, [S. I.], v. 118, 2021.
- NASCIMENTO, R. J. S. DO et al. **Composição em ácidos graxos do óleo da polpa de açaí extraído com enzimas e com hexano.** Revista Brasileira de Fruticultura, v. 30, p. 498–502, 2008.
- NERIS, D. M. **Efeito modulador do extrato total do Paenibacillus polymyxa RNC-D em macrófagos e Leishmania (Leishmania) amazonensis in vitro.** 2018.
- PARETSIS, N. F. et al. **In vitro evaluation of hydroxyapatite, chitosan, and carbon nanotube composite biomaterial to support bone healing.** Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science, v. 58, 2021.
- RASHID, A. BIN; SHOWVA, N.-N.; HOQUE, M. E. **Gelatin-Based Scaffolds – An Intuitive Support Structure for Regenerative Therapy.** Current Opinion in Biomedical Engineering, p. 100452, jun. 2023.
- RAVOOR, J.; THANGAVEL, M.; RENOLD ELSEN, S. **Comprehensive Review on Design and Manufacturing of Bio-scaffolds for Bone Reconstruction.** ACS Applied Bio MaterialsAmerican Chemical Society, , 20 dez. 2021.
- RAZIYAN, M. S. et al. **Development and Evaluation of 3D-Printed PLA/PHA/PHB/HA Composite Scaffolds for Enhanced Tissue-Engineering Applications.** Journal of Composites Science, v. 8, n. 6, 1 jun. 2024.

- RIBEIRO, A. R.; SILVA, S. S.; REIS, R. L. **Challenges and opportunities on vegetable oils derived systems for biomedical applications.** *Biomaterials Advances* Elsevier Ltd, , 1 mar. 2022.
- RODRIGUES, Ana Paula D. et al. **Kojic acid, a secondary metabolite from *Aspergillus sp.*, acts as an inducer of macrophage activation.** *Cell Biology International*, [S. l.], v. 35, n. 4, p. 335–343, 2011.
- ROMO-URIBE, A. **Human osteoblast cells proliferation in biodegradable poly-3-hydroxybutyrate (PHB) scaffolds from a mutant *Azotobacter vinelandii* strain.** *MRS Advances*, v. 7, n. 23, p. 508–514, 2022.
- ROSA, P. et al. **Desonide nanoencapsulation with açai oil as oil core: Physicochemical characterization, photostability study and in vitro phototoxicity evaluation.** *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, v. 199, 1 out. 2019a.
- ROSA, P. et al. **Desonide nanoencapsulation with açai oil as oil core: Physicochemical characterization, photostability study and in vitro phototoxicity evaluation.** *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, v. 199, 1 out. 2019b.
- SAGADEVAN, S. et al. **Recent advancements in polymer matrix nanocomposites for bone tissue engineering applications.** *Journal of Drug Delivery Science and Technology* Editions de Sante, , 1 abr. 2023.
- SILVA, D. F. et al. **PCL/andiroba oil (*Carapa guianensis* aubl.) hybrid film for wound healing applications.** *Polymers*, v. 13, n. 10, 1 maio 2021.
- SOLOVIEVA, A. O. et al. **Plasma-coated PCL scaffolds with immobilized platelet-rich plasma enhance the wound healing in diabetics mice.** *Plasma Processes and Polymers*, v. 19, n. 7, p. 2200032, 2022.
- STOLNICKI, B. et al. **How to initiate and develop Fracture Liaison Services (FLS).** Recommendations from the IOF Capture the Fracture® FLS Mentors in Brazil. *Archives of Osteoporosis*, v. 17, n. 1, 1 dez. 2022.
- WANG, H. et al. **Antibacterial polysaccharide-based hydrogel dressing containing plant essential oil for burn wound healing.** *Burns & trauma*, v. 9, p. tkab041, 2021.
- WANG, H. et al. **Simulation and experimental study of parameters in centrifugal electrospinning: Effects of rotor form on fiber formation.** *Journal of Applied Polymer Science*, v. 139, n. 38, 10 out. 2022.
- WARNER, K.; ESKIN, M. **Methods to access quality and stability of oils and fat-containing foods.** [s.l.] Aocs Publishing, 1995.