

Considerações sobre o impacto de experimentos e simulações computacionais com ondas gravitacionais no avanço da física: o contexto do LIGO

Pamella Aline de Almeida e Nadja Simão Magalhães

Universidade Federal de São Paulo

Resumo

A detecção direta das ondas gravitacionais representa uma das mais importantes conquistas da física contemporânea, abrindo uma nova janela de observação do Universo. Este trabalho apresenta um relato de experiência sobre o impacto científico dos experimentos com ondas gravitacionais no que tange à prática experimental adquirida em atividades relacionadas ao Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) durante intercâmbio científico na Universidade da Califórnia, Riverside (UCR), bem como à prática de simulações computacionais associadas ao projeto de mestrado de uma das autoras. São apresentadas atividades experimentais envolvendo protocolos de limpeza padrão LIGO, montagem e selamento de câmara de vácuo para testes preliminares, estudos em configurações de espelhos esféricos e análise de materiais. As autoras corroboram, com a vivência experimentada, que a integração entre prática experimental e simulação computacional é essencial para a compreensão de limitações instrumentais, mitigação de fontes de ruído e aprimoramento de dispositivos aplicados à detecção de ondas gravitacionais.

Abstract

The direct detection of gravitational waves represents one of the most important achievements of contemporary physics, opening a new window for observing the Universe. This work presents a report of a personal experience related to the scientific impact of gravitational-wave experiments regarding the experimental practice acquired through activities related to the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) during a scientific exchange at the University of California, Riverside (UCR). As well, the computational simulation practice associated with the master's research project of one of the authors is presented. Various experimental activities are described, like those involving standard LIGO cleaning protocols, the assembly and sealing of a vacuum chamber for preliminary tests, studies on heat absorption using spherical mirror configurations, and materials analysis. Based on the experience acquired, the authors reflect that matching experimental practice and computational simulation is valuable to help understand instrumental limitations, mitigating noise sources, and improving devices applied to gravitational-wave detection.

Palavras-chave: Relato de experiência, Ondas gravitacionais, LIGO.

Keywords: Experience report, Gravitational Waves, LIGO.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v7nEspecial.53385](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v7nEspecial.53385)

1 Introdução

As ondas gravitacionais foram previstas teoricamente por Albert Einstein em 1915, no contexto da Teoria da Relatividade Geral, como perturbações do espaço-tempo geradas por sistemas astrofísicos acelerados [1]. Devido às amplitudes extremamente pequenas desses sinais ao atingirem a Terra, sua detecção direta permaneceu um desafio experimental por décadas, exigindo avanços significativos em ciência dos materiais, inter-

ferometria a laser, controle ambiental, engenharia de precisão e técnicas de análise de dados.

Esse cenário foi alterado em 2015, quando houve o anúncio da primeira detecção direta realizada pelo *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (LIGO), associada ao evento GW150914 [2], confirmando uma previsão fundamental da Relatividade Geral. Esse resultado marcou o início da astronomia de ondas gravitacionais e de uma nova forma de investigação

de fenômenos astrofísicos extremos, como a fusão de sistemas binários compactos. Desde então, a colaboração internacional LIGO–Virgo–KAGRA (LVK) tem promovido melhorias contínuas nos detectores, ampliando a sensibilidade e a confiabilidade das observações [3] [4]. A Fig. 1 apresenta a rede de observatórios que compõem a colaboração LVK, e a operação conjunta desses detectores contribui para a melhor localização das fontes astrofísicas e para a validação dos sinais de ondas gravitacionais observados.



Figura 1: Representação esquemática das instalações da colaboração internacional envolvendo os detectores LIGO e Virgo e KAGRA. Na parte superior, da esquerda para a direita, estão os detectores LIGO Hanford e KAGRA; na parte inferior, da esquerda para a direita, Virgo e LIGO Livingston. A operação coordenada desses observatórios amplia a sensibilidade e a capacidade de localização de eventos de ondas gravitacionais.

Fonte: Adaptado de LIGO/Caltech. [4]

Nesse contexto, a formação de pesquisadores com experiência prática em ambientes experimentais e domínio de ferramentas computacionais torna-se fundamental. Este trabalho apresenta uma abordagem, associada ao detector LIGO, que integra atividades experimentais e simulações computacionais no contexto de um projeto de mestrado focado em otimização de espelhos.

2 Metodologia

O detector LIGO é complexo, consistindo de conjuntos de equipamentos que desempenham funções essenciais para o sucesso do experimento. É normal que cada conjunto seja desenvolvido e testado em laboratórios ao redor do mundo antes

de serem montados em definitivo no ambiente do LIGO.

Um desses laboratórios se localiza na Universidade da Califórnia, campus de Riverside (UCR), sob responsabilidade do Dr. Jonathan Richardson. [5]

Atividades experimentais foram desenvolvidas durante intercâmbio científico da autora Pamella A. de Almeida (PAA) no laboratório do Dr. Richardson. Entre as principais tarefas realizadas destaca-se o desenvolvimento e a aplicação de protocolos de limpeza alinhados aos padrões do LIGO, fundamentais para a minimização de contaminações em componentes ópticos e mecânicos utilizados em experimentos interferométricos de alta precisão.

Entre os protocolos de limpeza adotados durante as atividades no laboratório, realizava-se a higienização de componentes e ferramentas utilizando *IPA Wipes* (lenços com álcool isopropílico), com o objetivo de minimizar a presença de partículas e contaminantes. Antes do ingresso nas áreas de trabalho, era obrigatório o uso de jaleco descartável, touca, máscara, luvas e protetores para os calçados, reduzindo-se o risco de introdução de fibras, cabelos e outros resíduos no ambiente experimental. Os componentes destinados aos experimentos também passavam por procedimentos específicos de limpeza. Cabos, conectores e outras peças compatíveis eram higienizados com *IPA Wipes*, enquanto determinados componentes eram submetidos à limpeza por radiação ultravioleta em equipamentos dedicados. Após a limpeza, as peças eram acondicionadas em embalagens seladas, devidamente identificadas e armazenadas em áreas limpas até a etapa final de montagem. A participação nesses procedimentos permitiu à autora compreender a importância do controle de contaminação em experimentos de alta precisão, nos quais pequenas partículas ou resíduos podem afetar o desempenho e a confiabilidade dos sistemas experimentais.

Além disso, foi realizada a montagem e o selamento de uma câmara de vácuo destinada a testes preliminares. Sistemas de vácuo são componentes críticos em detectores de ondas gravitacionais, uma vez que gases residuais e perturbações ambientais podem comprometer a estabilidade e a sensibilidade das medições. A execução inicial da parte experimental utilizada durante essas ati-

vidades é apresentada na Fig. 2, na qual PAA, limpa e sela peças que foram usadas na montagem da câmara. Na Fig. 3 observa-se a câmara de vácuo em preparação para instalação completa no laboratório.

Também foi conduzido um projeto em termologia, com foco no estudo da absorção de calor em configurações de corpo negro utilizando espelhos esféricos. Efeitos térmicos são particularmente relevantes em detectores interferométricos, pois podem induzir deformações mecânicas e alterações nas propriedades ópticas dos componentes. A análise dos materiais envolvidos contribuiu para a identificação de limitações operacionais e para o aprimoramento dos modelos numéricos utilizados.

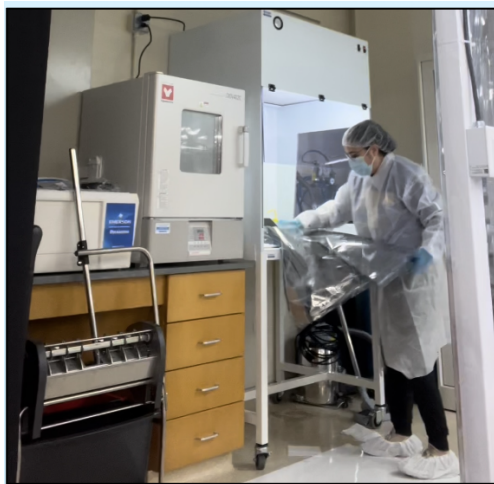


Figura 2: Infraestrutura experimental utilizada durante as atividades laboratoriais da autora PAA na Universidade da Califórnia, Riverside (UCR). A imagem apresenta a autora executando trabalho para limpeza e isolamento de componentes importantes da construção do experimento sendo realizado por ela.

Fonte: A autora.

3 Simulação computacional

Tendo em mãos os resultados obtidos na UCR, o projeto de mestrado de PAA concentra-se no desenvolvimento de simulações computacionais, baseadas no método de elementos finitos, para prever o comportamento físico de dispositivos experimentais. Os modelos numéricos são utilizados para avaliar respostas mecânicas e térmicas, auxiliando na otimização de componentes antes de sua implementação experimental. [6]

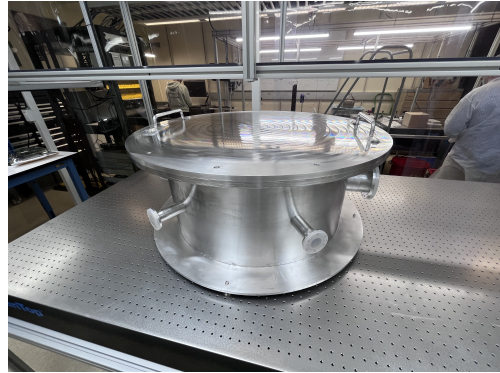


Figura 3: Câmara de vácuo utilizada na infraestrutura experimental da Universidade da Califórnia, Riverside (UCR), registrada durante a fase inicial de instalação e preparação do sistema. A imagem ilustra parte da estrutura desenvolvida para a realização dos experimentos acompanhados e executados pela autora durante sua permanência no laboratório.

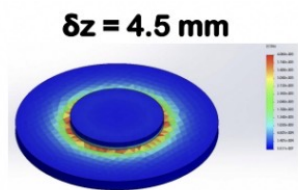
Fonte: A autora.

A validação dos modelos é realizada por meio da comparação com dados experimentais sempre que disponíveis, reforçando a confiabilidade das simulações. A integração entre experimento e simulação reduz custos de desenvolvimento, acelera ciclos de projeto e contribui para uma compreensão mais profunda dos mecanismos físicos que limitam o desempenho dos detectores.

Parte dessas simulações foi realizada por meio de softwares CAD. Na Fig. 4, observa-se um recorte dos resultados obtidos pelas autoras, no qual a região destacada em vermelho indica as áreas submetidas aos maiores níveis de tensão mecânica. A configuração experimental adotada foi baseada na montagem do espelho utilizando um suporte anelar de alumínio, componente essencial dos experimentos do LIGO. Mais detalhes sobre essa análise, bem como sobre o desenvolvimento parcial da pesquisa, podem ser encontrados no artigo das autoras [7] intitulado “Theoretical Analysis of Physical Properties of a Mirror for Interferometric Gravitational Wave Detection”.

4 Resultados e discussão

As atividades experimentais evidenciaram a importância de procedimentos laboratoriais rigorosos na preparação de componentes destinados a detectores de ondas gravitacionais [8]. A aplicação dos protocolos de limpeza padrão LIGO



(a) Strain.

Figura 4: A imagem ilustra parte dos resultados obtidos na realização da simulação computacional de estresse mecânico em ambiente CAD.

Fonte: Almeida et al. (2026) [7].

mostrou-se essencial para o controle de contaminações e para a mitigação de fontes de ruído associadas a superfícies ópticas. [8,9]

Os estudos em termologia destacaram que efeitos de absorção térmica devem ser cuidadosamente considerados no projeto de componentes ópticos, uma vez que podem resultar em deformações mecânicas e distorções ópticas. Esses resultados experimentais forneceram parâmetros relevantes para a calibração dos modelos computacionais. [10,11]

A pesquisa com simulação computacional das autoras também se beneficiou com os conhecimentos experimentais adquiridos. Da simulação na Figura 4,

observa-se o estresse mecânico gerado na junção entre o espelho de sílica e o anel de alumínio. Os resultados obtidos correspondem a uma etapa preliminar do projeto em desenvolvimento, visto que a caracterização do estresse mecânico constitui o ponto de partida para o estudo do estresse térmico e de outras fontes de ruído observadas nos detectores interferométricos de ondas gravitacionais do LIGO. [12]

A realização das atividades em um laboratório internacional possibilitou à autora o contato com um ambiente experimental de elevada complexidade e rigor protocolar. Essa experiência contribuiu para a aquisição de conhecimentos técnicos e científicos relacionados à pesquisa experimental, à coleta de dados e à simulação computacional, ampliando sua formação acadêmica e fornecendo subsídios para o desenvolvimento das pesquisas atualmente realizadas.

5 Conclusões e perspectivas

Este trabalho apresentou uma dinâmica integrada entre atividades experimentais e computacionais relacionadas à detecção de ondas gravitacionais no contexto do LIGO. A experiência adquirida em ambiente laboratorial com metas de alta complexidade, aliada ao uso de simulações por elementos finitos em andamento no mestrado [7], contribuiu de forma significativa para a formação técnica e científica da pesquisadora PAA.

Como perspectiva futura, pretende-se aprofundar a modelagem computacional, incorporando efeitos termo-mecânicos acoplados e estratégias de otimização alinhadas às restrições experimentais, visando contribuir para o aprimoramento tecnológico de detectores de ondas gravitacionais.

Sobre as autoras

Pamella Aline de Almeida (pamella.almeida@unifesp.br) é licenciada em Ciências com habilitação em Física e mestrande em Física pela Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP). Desenvolve pesquisas na área de detectores interferométricos de ondas gravitacionais, com ênfase em simulações computacionais e otimização de componentes óptico-mecânicos. Atua como professora de Física e participou de atividades de pesquisa na University of California, Riverside (UCR), relacionadas ao Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO). Nadja Simão Magalhães defendeu sua tese de doutoramento sobre detecção de ondas gravitacionais e foi a primeira mulher com doutorado no país nesse tema. Visitou e interagiu com grupos de pesquisa em detecção de ondas gravitacionais ao longo dos anos e continua até hoje. Tem também pesquisas em astrofísica, gravitação fundamental e bioacústica. É docente do Departamento de Física da Universidade Federal de São Paulo em Diadema. (nadja.magalhaes@unifesp.br)

Referências

- [1] C. W. Misner, K. S. Thorne e J. A. Wheeler, *Gravitation* (W. H. Freeman, 1973).
- [2] B. P. Abbott et al., *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, *Physical Review Letters* **116**(6), 061102 (2016).
- [3] LIGO Scientific Collaboration, *Our Collaboration*, <https://www.ligo.org/about.php> (2024). Accessed: Mar. 8, 2025.
- [4] LIGO Scientific Collaboration, *LIGO and Virgo Resume Observing Run After Upgrades*, <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20240403> (2024). Accessed: Mar. 23, 2025.
- [5] Richardson Lab, *Experimental Gravitational and Cosmological Physics*, <https://experimentalgravity.ucr.edu/> (2026). Accessed: 2026-02-27.
- [6] O. C. Zienkiewicz e R. L. Taylor, *The Finite Element Method* (Butterworth-Heinemann, 2005).
- [7] P. A. Almeida et al., *Theoretical analysis of physical properties of a mirror for interferometric gravitational wave detection*, *J. Phys. Conf. Ser.* **3177**(1), 012090 (2026).
- [8] M. H. Phelps et al., *Optical contamination control in the Advanced LIGO ultra-high vacuum system* (2013). Disponível em <https://dcc.ligo.org/public/0109/P1300192/002/Optical%20contamination%20control%20in%20aLIGO%20%28published%20version%29.pdf>.
- [9] P. Nguyen et al., *Environmental Noise in Advanced LIGO Detectors*, *Classical and Quantum Gravity* **38**(14) (2021). Disponível em https://dcc.ligo.org/public/0170/P2000343/007/PEM_03_paper_210118.pdf.
- [10] H. Cao et al., *High dynamic range thermally actuated bimorph mirror for gravitational wave detectors*, *Applied Optics* **59**(9), 2784 (2020).
- [11] H. Cao et al., *Enhancing the dynamic range of deformable mirrors with compression bias*, *Optics Express* **28**(26), 38480 (2020).
- [12] P. A. d. Almeida, *Um estudo sobre a detecção de ondas gravitacionais: interferometria*, <https://repositorio.unifesp.br/11600/66071> (2025). Accessed: Mar. 12, 2025.