

Desenvolvimento de um novo método para o estudo de comportamentos dinâmicos do ar utilizando técnicas de imagiologia médica

Diego André Szklarczyk¹, Alberto Yoshihiro Nakano¹, Felipe Walter Dafico Pfrimer¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo-PR, Brasil (diegoszklarczyk@pm.me)

Resumo: O estudo dos efeitos dinâmicos do ar, principalmente sobre objetos sólidos, é dificultado pela transparência do meio. Os autores propõem um novo método que possa aprimorar a visualização de fenômenos aerodinâmicos, realizando a reconstrução digital do volume estudado. O objetivo desse trabalho consiste na realização de um ensaio para demonstrar a viabilidade do método proposto. Os resultados demonstraram que o método foi capaz de realizar a reconstrução do volume, facilitando o seu estudo.

Palavras-chave: Reconstrução volumétrica; Aerodinâmica; Imagiologia médica; Dinâmica dos fluidos; Processamento digital de imagens.

INTRODUÇÃO

O estudo dos comportamentos dinâmicos dos fluidos é um campo de grande relevância social, pois uma vasta gama de aplicações tecnológicas é diretamente dependente da previsibilidade e do controle decorrentes dos seus resultados. O setor de transportes, em especial, é diretamente afetado pelo progresso desses estudos. Embarcações navais, veículos terrestres e aeronaves, possuem um coeficiente de eficiência energética que depende diretamente de uma interação eficiente do veículo com o ambiente em que ele se desloca. Portanto, é inevitável, que uma parte da energia útil seja dissipada no ambiente. Um claro entendimento de como isso acontece é crucial para a aplicação de formas eficazes para mitigar os impactos negativos sobre a eficiência energética (JAHANMIRI, 2011).

Dentro do campo de estudo da dinâmica dos fluidos, a aerodinâmica corresponde ao estudo dos movimentos do ar, e particularmente das suas interações com objetos sólidos (DAVID, 1974). O deslocamento de um corpo rígido pelo ar pode dar origem a vários fenômenos, como empuxo, arrasto, vórtices, entre outros. Em alguns contextos alguns podem ser desejados, como o empuxo nas asas de um avião, enquanto outros devem ser mitigados, como o arrasto aerodinâmico. Porém, pelo ar ser um meio transparente, a visualização direta do fluido não é possível. A modelagem e o cálculo de como esses fenômenos atuam sobre um corpo irregular pode tornar-se limitados ao se considerar um sistema muito complexo, como o caso de vorticidades e turbulências causados em asas de aeronaves (NGUYEN; NGUYEN; PHAM, 2015).

Algumas técnicas foram desenvolvidas para facilitar a visualização e o estudo dos movimentos do ar. Uma delas é a utilização de túneis de vento, onde

um fluxo controlado de ar pode gerar condições análogas às reais. A introdução de materiais particulados em suspensão no fluxo permite a visibilidade das interações do ar com o modelo (LERNER; BOLDES, 2011). Porém, a liberação do material é normalmente restrita a regiões estreitas, não permitindo observar o volume todo simultaneamente. Alternativamente, a dispersão em excesso do material pode obstruir a visão do interior do volume, como observado na Figura 1.



Figura 1: Dispersão de fumaça vermelha por um vórtice. (Adaptado de: NASA, 1990).

Um método alternativo utiliza algoritmos computacionais para simular com grande fidelidade a maior parte dos sistemas aerodinâmicos, permitindo a visualização de todo o volume. Porém, esses algoritmos demandam recursos computacionais intensos, limitando a resolução e precisão dos resultados (ABBAS-BAYOUMI; BECKER, 2011).



Uma possível solução para esse problema pode ser encontrada na medicina moderna, onde é de grande importância visualizar e estudar o interior do corpo humano de formas pouco invasivas. A área que estuda esses métodos é conhecida como imagiologia médica (GRANGEAT, 2013). Uma das técnicas bem desenvolvidas é utilizada por máquinas de tomografia computadorizada. Nela, várias imagens são periodicamente capturadas de várias fatias do corpo humano, utilizando feixes de raios-x como contraste. As informações das imagens são posteriormente utilizadas para reconstruir digitalmente o corpo humano, permitindo uma visão interna, ou a geração de imagens a partir de ângulos que não eram disponíveis na aquisição original com técnicas clássicas de raios-x.

Um diagrama simplificado da técnica pode ser observado na Figura 2. Nesse exemplo, o objeto de estudo é uma pirâmide. Os planos coloridos observados representam as fatias transversais capturadas nas imagens, que são mostradas na direita. Como a distância entre cada fatia é conhecida, um algoritmo realiza uma interpolação entre os dados conhecidos para reconstruir o volume digitalmente. Como neste exemplo as fatias são deslocadas no sentido axial, a resolução do sólido gerado depende do número de imagens capturadas neste eixo. As unidades discretas de volume que são criadas pelo algoritmo são conhecidas como *voxels*.

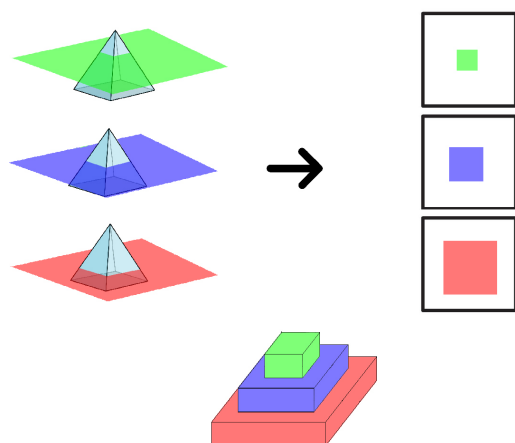


Figura 2: Reconstrução de um sólido a partir de fatias bidimensionais.

Este trabalho realiza um ensaio em ambiente controlado buscando demonstrar um novo método para a visualização e estudo de fenômenos aerodinâmicos em um volume de fluido. O método aplica as técnicas desenvolvidas pela imagiologia médica para a reconstrução do volume. Uma fonte de luz colimada disposta em linha é usada para iluminar seletivamente várias fatias bidimensionais do volume. O feixe de luz é refletido em material sólido em suspensão no

fluxo de ar, criando o contraste necessário para captura as imagens de cada fatia. As imagens são posteriormente processadas em algoritmos e *softwares* de código aberto para reconstruir digitalmente o volume observado.

Nesse cenário, o objetivo central deste trabalho consiste em realizar um ensaio capaz de demonstrar o funcionamento do método proposto.

MATERIAL E MÉTODOS

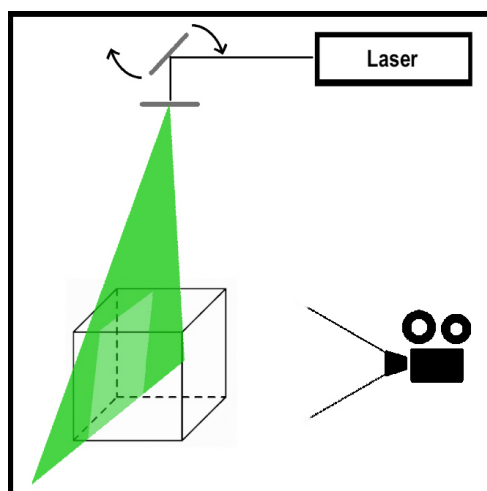
Para a reconstrução digital do volume de ar estudado, uma sequência periódica de imagens monocromáticas e equidistantes é necessária. O contraste observado em cada imagem representa as posições e o deslocamento do sólido em suspensão presente na respectiva fatia bidimensional do volume.

O ensaio realizado utiliza um laser verde, uma lente, um espelho móvel, uma câmera e um umidificador, dispostos em um ambiente com luminosidade controlada. Um computador, executando o *software* de código aberto, é conectado na câmera fora do ambiente controlado. O laser verde empregado como fonte luminosa incide em um espelho, e é refletido para a um tipo especial de lente, conhecida como lente de Powell. Com isso, a projeção pontual do laser se transforma em uma linha. Esse tipo de lente foi escolhido pois mantém uma boa uniformidade na intensidade do feixe ao longo do eixo de deslocamento. O espelho móvel se desloca juntamente com a lente, refletindo o feixe de luz ao longo do volume. A câmera é disposta ortogonalmente ao plano de iluminação capturando as imagens sequencialmente.

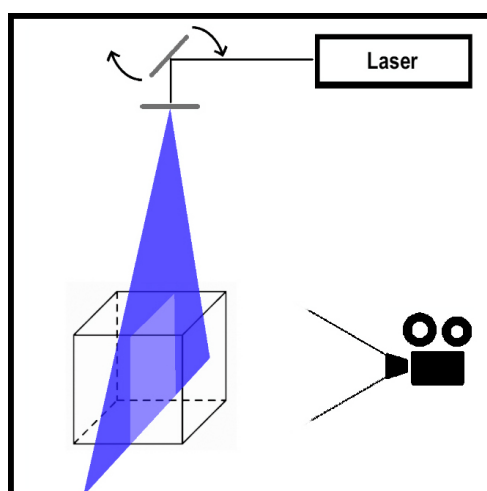
A Figura 3 ilustra um procedimento de captura do ensaio. Neste exemplo, são realizadas 3 capturas do volume de ar representado pelo cubo. A captura da fatia 1 é realizada com o espelho inclinado para a esquerda, de forma que o plano de corte passe pela região esquerda do cubo. Posteriormente o espelho é novamente movido, para que a fatia 2 seja capturada com o feixe de luz passando pelo meio do volume. Finalmente, a fatia 3 é capturada quando o espelho está totalmente deslocado para a direita. Idealmente as capturas são orientadas de forma paralela entre si, porém, é possível observar um ângulo entre cada plano de captura. Um ângulo expressivo entre as capturas pode introduzir distorções indesejáveis no resultado. Nesse ensaio, como a origem do feixe está posicionada a uma distância considerável do volume observado, o ângulo entre as fatias é desprezível.

A resolução final de reconstrução do volume depende da quantidade de *pixels* em cada imagem, e do número de fatias coletadas. Porém, caso o tempo de captura seja demasiadamente elevado, o fluido estudado se deslocará entre as primeiras e últimas imagens, introduzindo distorções no sentido de deslocamento das partículas. Para essas distorções sejam mi-

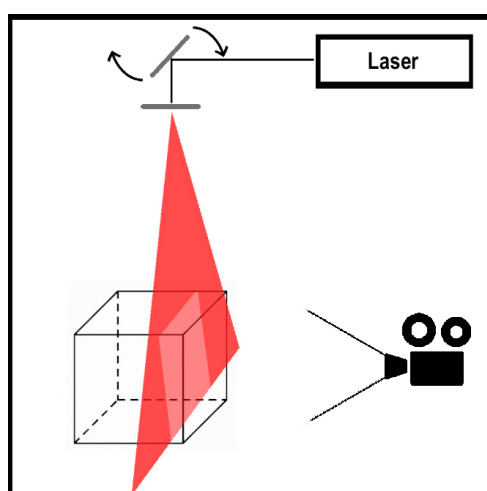
nimizadas, uma câmera de alta velocidade deve ser empregada.



(a) Fatia 1



(b) Fatia 2



(c) Fatia 3

Figura 3: Diagrama simplificado do ensaio proposto.

Para permitir a visualização do fluxo transparente de ar é necessário que um material particulado refletivo esteja em suspensão. Também é importante que o ambiente tenha a iluminação reduzida, com uma superfície escura como plano de fundo. Para o primeiro ensaio realizado um vaporizador ultrassônico de água foi utilizado. O evaporador gera uma corrente de ar ascendente, permitindo observar fenômenos de vorticidade e turbulência.

Um suporte foi projetado para que o feixe de luz proveniente do laser seja alinhado com os demais elementos ópticos. Um haste móvel, preso no suporte por um eixo, mantém o espelho e a lente em alinhamento com a câmera e o plano de fatiamento. O suporte (Figura 4) foi projetado utilizando o *software Inventor* (AUTODESK, 2026), em uma licença fornecida pela UTFPR, e posteriormente criado utilizando uma impressora 3D.

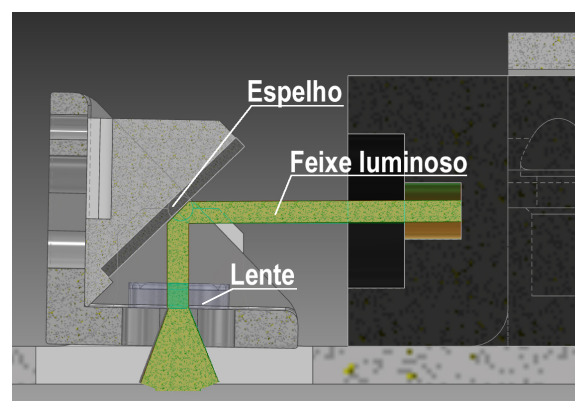


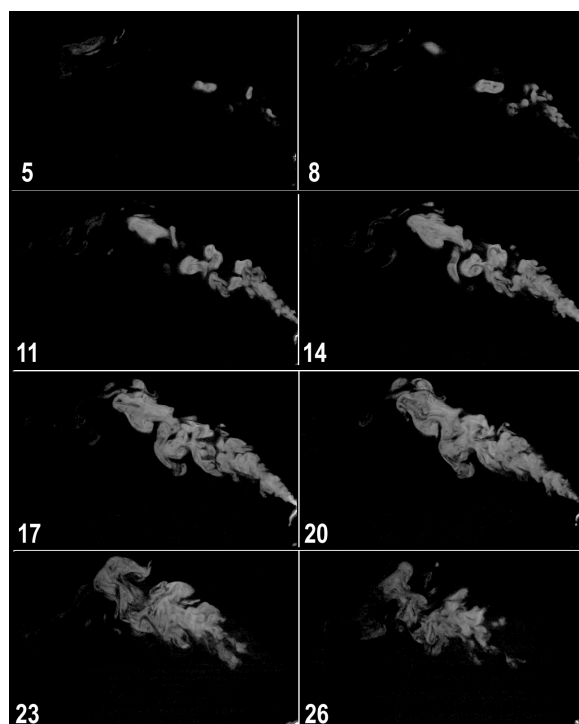
Figura 4: Corte lateral do suporte dos elementos ópticos: espelho; feixe luminoso; e lente de Powell.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após realizar a construção e a disposição de todos os elementos no ambiente controlado, as capturas foram iniciadas. A câmera foi configurada para uma aquisição em 1280x800 *pixels*, com uma taxa de captura de 120 quadros por segundo.

Para reduzir a complexidade inicial do primeiro ensaio, que visa apenas demonstrar a viabilidade do método, a atuação do espelho foi manual, e várias sequências de capturas foram realizadas em forma de vídeo. Como o deslocamento manual do espelho não possui uma velocidade angular estável, algumas das sequências foram descartadas pois não eram suficientemente estáveis e equidistantes.

Um total de 45 imagens foram selecionadas para construir o digitalmente o volume estudado. Na Figura 5 podem ser observados 8 fatias, extraídos com um intervalo de 3 quadros entre si. O número posicionado na região inferior esquerda de cada quadro representa o número da fatia relativa a primeira.



largura, obteve-se uma resolução aproximada de 3,5 milímetros, correspondente ao espaçamento entre cada captura.

As imagens obtidas foram importadas no *software 3D Slicer* para serem processadas (SLICER, 2026). O *software* disponibiliza um conjunto de ferramentas para tratamento preliminar das imagens. Para remover alguns dos artefatos visuais indesejados durante a captura, como reflexos de objetos externos e possíveis ruídos que possam ter sido introduzidos pela câmera, foi aplicado um filtro do tipo passa-baixa. Posteriormente, os *pixels* mais isolados foram removidos pelo isolamento de uma seção das imagens. O resultado pode ser observado na Figura 7.

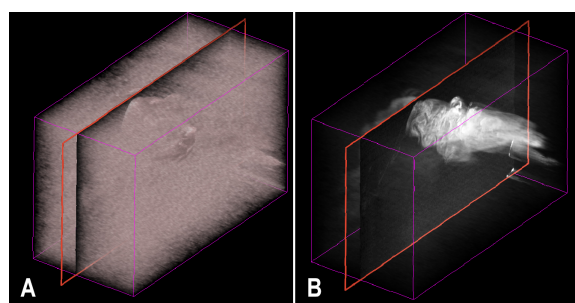


Figura 7: Diferença dos resultados: A - antes; e B - após o tratamento das imagens.

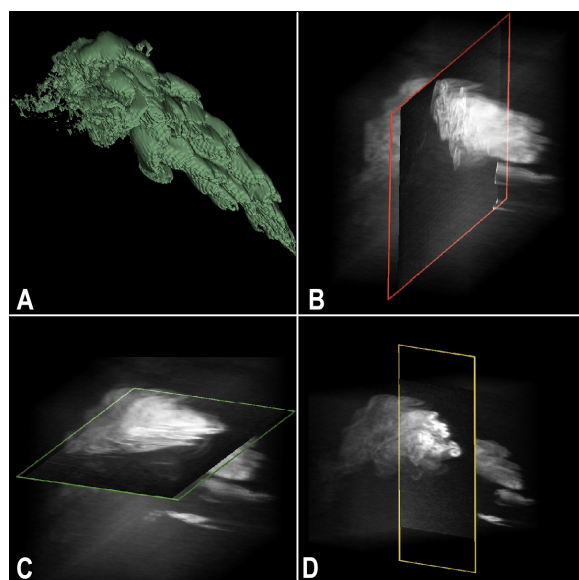


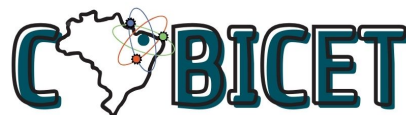
Figura 6: Resultados obtidos a partir da reconstrução volumétrica: A - reconstrução 3D; B - corte sagital; C - corte transversal; e D - corte coronal.

As arestas que limitam o volume de captura no ambiente controlado foram aferidas em, aproximadamente, 30 centímetros de comprimento, 15 centímetros de largura, e 20 centímetros de altura. Ao considerar que 45 amostras foram extraídas ao longo da

Após ajustar os parâmetros para encontrar um contraste e qualidade ideais para o ensaio, o volume foi gerado. A Figura 6 contém, no quadro A, o volume renderizado a partir dos *voxels* obtidos. Nos quadros B, C e D, respectivamente, podem ser observadas as fatias correspondentes ao plano sagital, transversal, e coronal. As fatias capturadas estão dispostas no plano sagital, enquanto as demais foram obtidas pela interpolação dos dados a partir do algoritmo usado.

A Figura 8 demonstra a possibilidade de se obter informações importantes, que até então não podiam ser observadas, sobre o comportamento do fluido. Nota-se que as imagens do plano coronal não foram obtidas por fotografias, mas foram geradas a partir dos dados obtidos pela varredura executada unicamente no plano sagital. Ao lado esquerdo, observa-se, interior ao quadrado amarelo, uma ROI (Região de interesse - do inglês *Region of interest*) contendo um pequeno vórtice sendo formado.

A Figura 9 demonstra o deslocamento do plano transversal. No lado esquerdo da figura, pode-se observar o comportamento do ar conforme se afasta no vaporizador de água. A redução de velocidade do vapor causada pela interação com o ar pode ser notada pelo maior volume da extremidade superior, assim como uma opacidade menor do contraste devido a diluição do jato.



CONCLUSÃO

Os resultados desse estudo demonstraram a viabilidade do método para a aquisição de informações relevantes sobre o comportamento dinâmico do ar no volume de estudo. A captura das imagens, utilizando as técnicas descritas, possibilitou uma reconstrução digital do volume. A aplicação dos algoritmos possibilitou a geração de imagens em planos que anteriormente não podiam ser observados diretamente. A reconstrução digital permitiu, também, a observação de fenômenos relevantes nos estudos da aerodinâmica, como os vórtices. Considerando os resultados positivos obtidos no ensaio, pode-se afirmar que o método pode contribuir em estudos realizados em túneis de vento, ou experimentos semelhantes. O método também demonstra potencial para ser utilizado de forma educacional, permitindo a visualização dos comportamentos dinâmicos por estudantes, facilitando a abstração e entendimento do conteúdo.

Apesar do foco do trabalho ser voltado para os estudos da aerodinâmica, o método pode ser aplicado em diversos fluidos que sejam transparentes e que possam gerar contraste para a captura das imagens. Alguns exemplos são estudos nas áreas de hidrodinâmica e tempo de difusão de fluidos (ANDERSSON et al., 2022).

No momento em que o ensaio foi executado, devido a limitações técnicas, pode-se observar fatores que limitaram a resolução dos resultados e a capacidade de se extrair informações métricas de forma precisa. A necessidade de uma câmera com melhor desempenho, além da implementação de um sistema de controle preciso para o posicionamento do feixe de luz, serão desenvolvidos em trabalhos posteriores.

REFERÊNCIAS

ABBAS-BAYOUMI, A.; BECKER, K. An industrial view on numerical simulation for aircraft aerodynamic design. **Journal of Mathematics in Industry**, Springer, v. 1, n. 1, p. 10, 2011.

ANDERSSON, S. B. et al. Effect of fluid velocity and particle size on the hydrodynamic diffusion layer thickness. **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics**, v. 180, p. 1–10, 2022. ISSN 0939-6411. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0939641122002119>>.

AUTODESK. **Software inventor**. 2026. Acesso em: 14 de julho de 2026. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>>.

DAVID, W. **A Dictionary of Aviation**. New York: Fell, 1974.

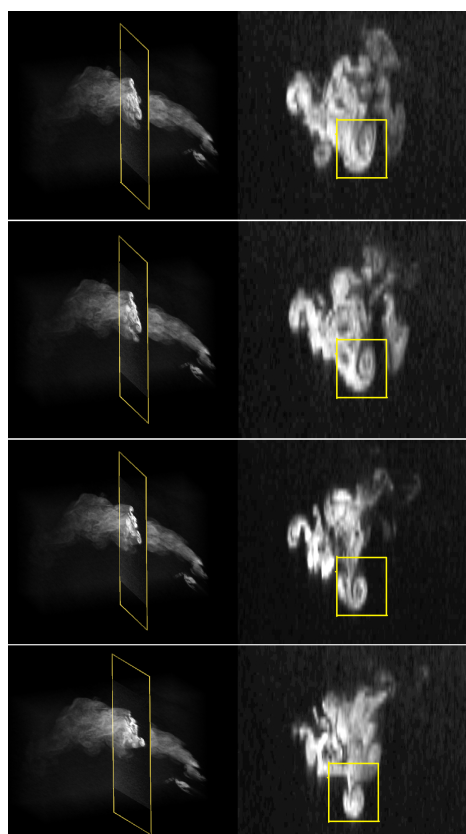


Figura 8: Na esquerda, 4 fatias ligeiramente deslocadas paralelas ao plano coronal. Na direita, as imagens geradas a partir dos *voxels* digitalizados.

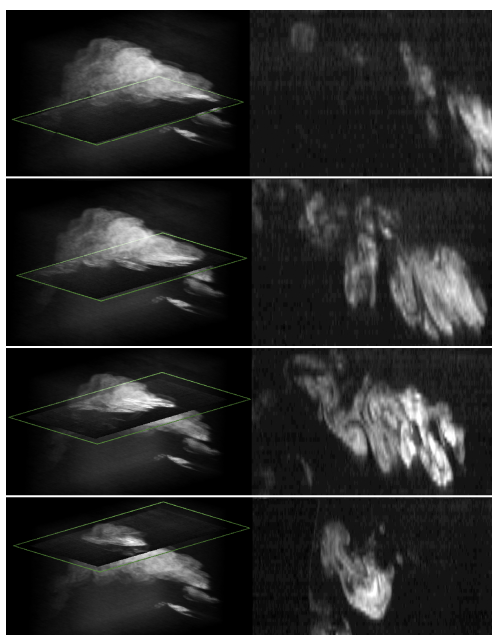


Figura 9: Na esquerda, 4 fatias deslocadas paralelas ao plano transversal. Na direita, as imagens geradas a partir dos *voxels* digitalizados.



GRANGEAT, P. **Tomography**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

JAHANMIRI, M. Aircraft drag reduction: an overview. **Research report**, Chalmers University of Technology, 2011.

LERNER, J. C.; BOLDES, U. **Wind tunnels and experimental fluid dynamics research**. [S.l.]: BoD–

Books on Demand, 2011.

NGUYEN, M. T.; NGUYEN, N. V.; PHAM, M. T. Aerodynamic analysis of aircraft wing. **VNU Journal of Science: Mathematics-Physics**, v. 31, n. 2, 2015.

SLICER, D. **3D Slicer**. 2026. Acesso em: 14 de julho de 2026. Disponível em: <<https://www.slicer.org/>>.