

# O desafio do plutônio

Carlos Herdeiro

Departamento de Matemática, Universidade de Aveiro

Quem aprecia cinema e física terá interesse na cinebiografia “Oppenheimer”, sobre Robert J. Oppenheimer e em particular sobre a sua direção do projeto Manhattan, que criou as bombas atômicas usadas em Hiroshima e Nagasaki, em Agosto de 1945.

Goste-se mais ou menos da cadência e ênfase narrativas do realizador Christopher Nolan, a parada de lendas da física que surgem na película - muitas, infelizmente, demasiado em passantes para os aficionados do seu trabalho - e a imersão na extraordinária história do desenvolvimento da física nuclear e da corrida a uma bomba atômica, justificam (para este cronista) as três horas do filme.

O desenvolvimento das armas nucleares e, essencialmente, a sua utilização no final da segunda guerra mundial, continuam a gerar importantes discussões éticas e morais sobre o papel da ciência e dos seus executantes. Mas focando nos aspetos técnicos e científicos, a jornada épica para transformar um conjunto de ideias teóricas sobre reações nucleares numa arma - e, no pós-guerra, em fontes utilizáveis de energia, o tema deste volume da Gazeta - é uma notável demonstração do engenho humano e do poder da ciência. Escolhi nesta crónica elaborar sobre uma das fascinantes histórias do desenvolvimento da bomba, brevemente retratada no filme: o inovador sistema de implosão da bomba de plutônio, elaborado pela equipa liderada por Seth Neddermeyer (co-descobridor do muão).

As bombas desenvolvidas no projeto Manhattan usaram como combustível nuclear os isótopos urânio-235 e plutônio-239, facilmente fissionados quando atingidos por um neutrão, fragmentando o núcleo e libertando uma enorme energia. Para uma bomba, é necessária uma reação auto-sustentada, em que os neutrões resultantes de uma fissão produzem a fissão dos núcleos vizinhos. Uma tal reação, dita “em cadeia”, é apenas possível se a massa (e concentração) de U-235 ou Pu-239 estiverem acima de certos valores críticos. Portanto o primeiro desafio é obter estes isótopos em quantidade e concentração suficientes.

No urânio natural (dióxido de urânio), apenas cerca de 0.7% do urânio é U-235, sendo o restante U-238,

que não é cindível. O urânio para uso militar tem de ser enriquecido; é obtido por separação isotópica, necessitando-se de concentrações de U-235 da ordem de 80%. A bomba lançada em Hiroshima (Little Boy), usou 64 kg deste urânio altamente enriquecido, todo aquele que havia sido produzido no complexo de Oak Ridge, no Tennessee, até à altura. Não havia excedente deste combustível nuclear para fazer outra bomba, ou testes. Mas não eram necessários testes, dado que o desenho desta bomba era fiável. Consistia num mecanismo “tipo pistola”. Uma massa sub-crítica de urânio é disparada como uma bala, por explosivos convencionais, a partir de uma extremidade da bomba para um alvo oco na outra extremidade, também ele uma massa sub-crítica do mesmo elemento, onde a bala se encaixa; a consequente compressão pelo impacto e aumento de massa leva à criticalidade, iniciando o processo nuclear.

O plutônio, por outro lado, é praticamente inexistente na natureza, mas pode ser fabricado. No projeto Manhattan, a fábrica foi o reator nuclear em Hanford, no deserto do estado de Washington (local que agora alberga um dos detetores de ondas gravitacionais do LIGO), transmutando urânio (U-238) em plutônio. O plutônio de Hanford, contudo, apresentava, para além do desejado Pu-239, traços de Pu-240, que tem uma taxa superior de fissão espontânea. Este convidado indesejado afetava o mecanismo tipo pistola do *Little Boy*, dado que causaria uma fissão espontânea antes que o mecanismo conseguisse juntar as duas massas: uma pré-detonação que tornaria a bomba ineficiente.

Esta dificuldade levou a propor um mecanismo alternativo, mas arriscado, de detonação. Em vez de juntar duas massas sub-críticas, compactar-se-ia rapidamente uma única massa sub-crítica para atingir a criticalidade, através de uma implosão. Colocar-se-ia uma massa esférica de plutônio sub-crítico no centro de um dispositivo que implodisse (por meios convencionais) de uma maneira extremamente simétrica e sincronizada; caso assim não fosse, o combustível nuclear escaparia à tentativa de compactação, como um pouco de água apertada por uma mão esguicha por entre os dedos.

O problema de conseguir que as ondas (esféricas) das várias detonações convencionais aplicassem na massa

de plutônio uma pressão isotrópica foi resolvido pelo grande matemático John Von Neumann, de uma maneira original. Inspirando-se no desenho de lentes ópticas, concatenou uma estrutura esférica, tipo “bola de futebol”, envolvendo o plutônio por combinações de explosivos rápidos e lentos, de modo a que de um ponto de explosão os caminhos mais/menos diretos para a esfera central fossem percorridos mais devagar/depressa, criando sincronia e isotropia na pressão aplicada ao combustível nuclear.



Figura 1 - Montando a bomba de plutônio - imagem do filme “Oppenheimer”.

Implementar o desenho de Von Neumann foi, no entanto, um enorme desafio de engenharia. Mesmo a teoria tinha lacunas, porque o entendimento teórico da (hidro) dinâmica das ondas de detonação era limitado pela natureza não-linear da equação que as governa, e pela ausência de soluções analíticas. Von Neumann propôs uma resolução numérica iterativa do problema, modelando os módulos (contínuos) da bomba como conjuntos (discretos) de massas pontuais, ligadas por molas. O procedimento numérico, contudo, requeria imenso tempo. Foi inicialmente levado a cabo em Los Alamos (o quartel general do projeto Manhattan) por um grupo de “computadores” humanos, usando calculadoras mecânicas de secretária, liderado por Richard Feynman. Mais tarde, usou-se um computador IBM de cartões perfurados. Seguiu-se um penoso processo de tentativa-erro para melhorar o desenho dos módulos explosivos de modo a garantir uma implosão suficientemente simétrica e sincronizada para que a bomba de plutônio funcionasse. Mas apesar de todo o progresso e testes, havia dúvidas. Foi decidido, por isso, fazer um teste da bomba de plutônio completa.

O teste foi agendado para a madrugada de 16 de Julho de 1945, no deserto do Novo México, a tempo da conferência de Potsdam, onde o presidente dos EUA (Harry Truman), o primeiro ministro britânico (Winston Churchill) e o secretário-geral da URSS (Joseph Stalin), planeavam a ordem mundial do pós-guerra. Um teste bem sucedido daria ao Presidente Truman um trunfo político para a conferência. Este teste, com nome de código Trinity, foi um sucesso. A equipa do projeto Manhattan, militares e políticos, observaram e sentiram a mais poderosa explosão alguma vez produzida pela humanidade, equivalente a cerca de 20000 toneladas de TNT. A reconstitu-

ição desta explosão é um momento alto da película de Nolan.

A arriscada aposta de Oppenheimer no sistema de implosão tinha resultado. A bomba de plutônio foi lançada em Nagasaki (Fat Man) em 9 de Agosto de 1945, usando cerca de 6,2 kg de plutônio.

Como curiosidade final, no filme de Nolan é brevemente mencionado o trabalho de Oppenheimer com um seu aluno, Hartland Snyder, sobre a implosão de uma estrela (uma razão para Oppenheimer gostar da ideia do sistema de implosão?). Esse artigo, considerado o início da compreensão moderna de buracos negros, foi publicado no dia em que a 2.<sup>a</sup> Guerra Mundial iniciou (1 de Setembro de 1939). No filme, a publicação do artigo é mencionada (juntamente com a invasão da Polónia pela Alemanha nazi) como o “black hole paper”. Mas isto não poderia ter acontecido. A terminologia “black hole” para as estrelas colapsadas é bem posterior, como documentado na Gazeta de Física [Vol. 41, Fascículo 2, 2018]. Christopher Nolan poderia ter evitado esta incorreção histórica. Bastaria que lesse a Gazeta de Física.