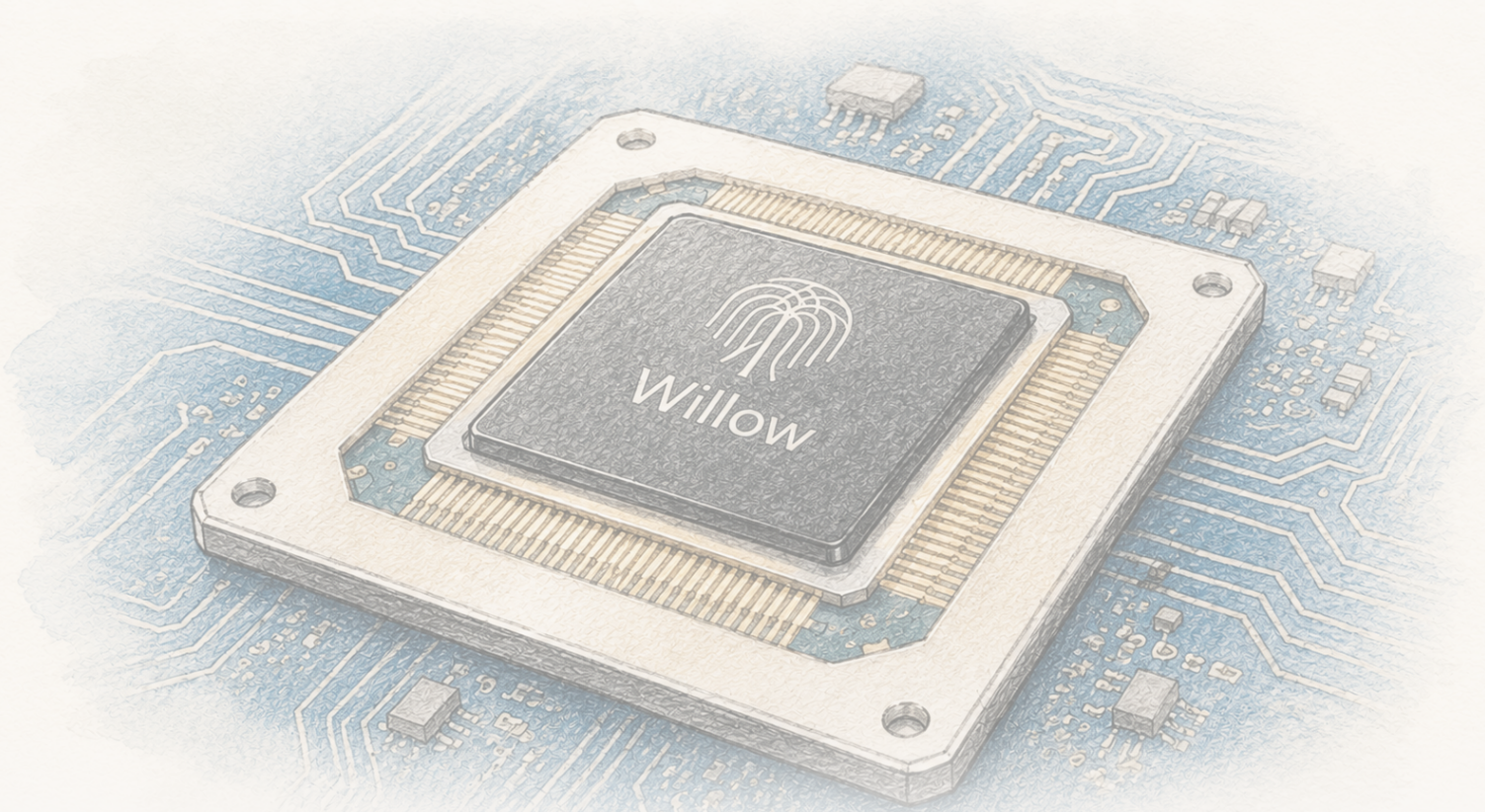


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Uma memória quântica finalmente melhorou à medida que cresceu — o verdadeiro marco e a máquina que ainda não é

A Google Quantum AI mostrou, pela primeira vez de forma clara, que uma memória quântica de código de superfície consegue operar abaixo do limiar: ao aumentar o código de distância 3 para 5 e 7, a taxa de erro lógico caiu exponencialmente (cerca de 2,14× por cada dois passos), e a maior, uma memória de distância 7 com 101 qubits, viveu mais tempo do que o melhor qubit físico — para além do breakeven — com correção de erros em tempo real. É um marco de engenharia há muito procurado. É também um único qubit lógico a funcionar como memória, com uma taxa de erro ainda muito acima do que algoritmos reais exigem, sem operações lógicas executadas, com um piso de erro inexplicado assinalado pelos autores e ordens de grandeza de escala ainda pela frente. Um limiar atravessado, não um computador entregue.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Quantum error correction below the surface code threshold*, Google Quantum AI and Collaborators, Nature 638, 920 (2025) · DOI: 10.1038/s41586-024-08449-y

O momento em que a curva se dobrou na direção certa

Durante trinta anos, a correção de erros quânticos assentou numa promessa que nunca tinha sido cumprida de forma limpa. A teoria diz que, se distribuirmos uma unidade de informação quântica — um qubit *lógico* — por muitos qubits físicos ruidosos e se esses qubits físicos forem suficientemente bons, então acrescentar *mais* deveria tornar o qubit lógico *melhor*, fazendo os erros cair exponencialmente à medida que o código cresce. A armadilha está no «se»: abaixo de um limiar crítico de ruído, mais qubits ajudam; acima dele, acrescentam apenas mais ruído. Todas as experiências anteriores tinham vivido do lado errado dessa linha ou falhado em mostrar claramente a tendência. Aumentar o código tornava as coisas piores, não melhores.

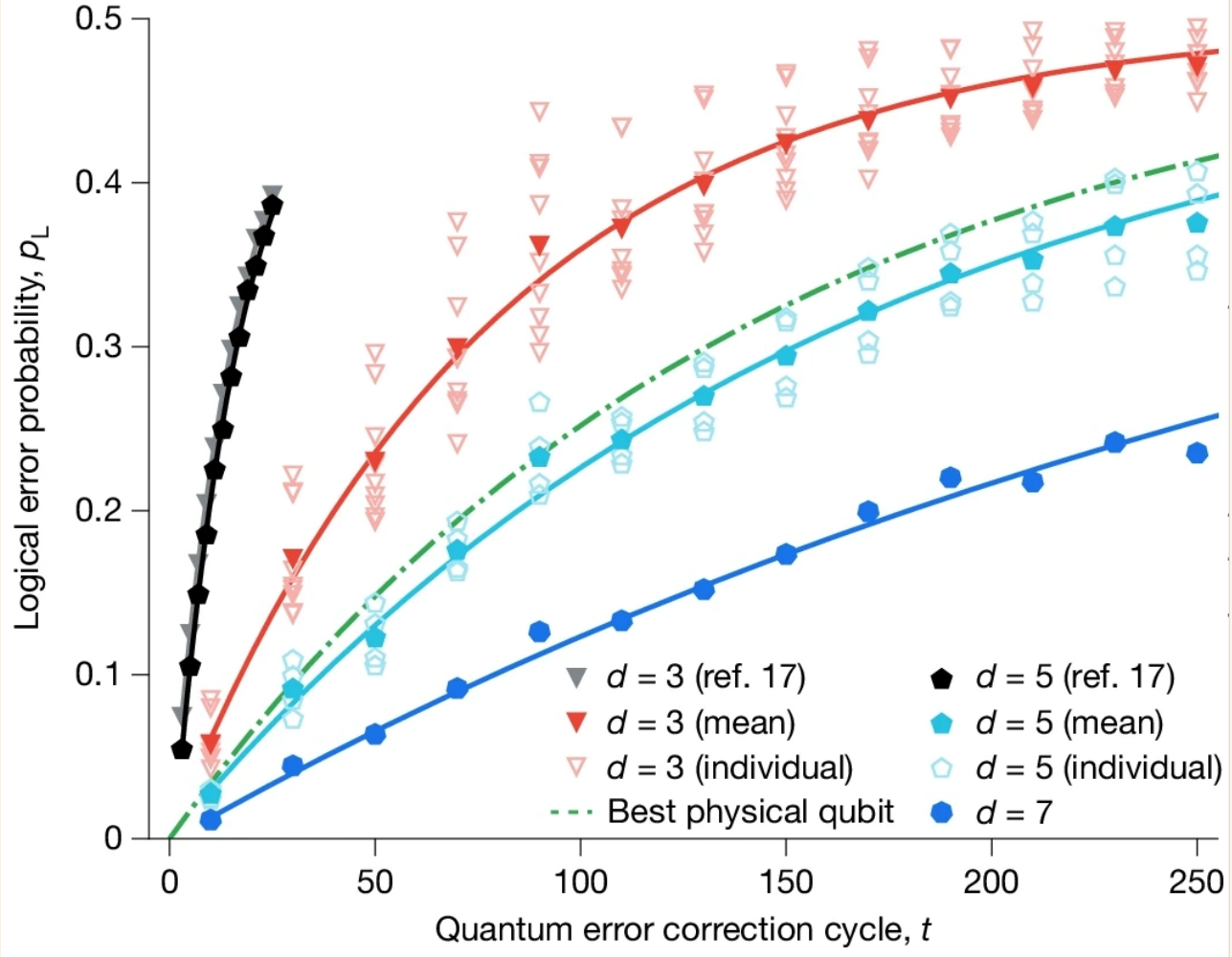
Em dezembro de 2024, a Google Quantum AI relatou a primeira demonstração clara do regime oposto. No Willow, a geração mais recente dos seus processadores supercondutores, construiu memórias de código de superfície com distâncias de código 3, 5 e 7 e observou a taxa de erro lógico *diminuir* sempre que o código aumentava — por um fator de $\Lambda = 2{,}14 \pm 0{,}02$ por cada aumento de duas unidades na distância. A maior, uma memória de distância 7 com 101 qubits, manteve um qubit lógico com erro de $0{,}143\% \pm 0{,}003\%$ por ciclo de correção e — a manchete dentro da manchete — sobreviveu *mais tempo do que o melhor qubit físico individual* do próprio chip, por um fator de $2{,}4 \pm 0{,}3$. Chama-se estar «para além do breakeven» e é a primeira vez que todo o aparato de correção de erros se paga a si próprio neste hardware.

É um marco genuíno, e vale a pena ser preciso sobre que tipo de marco. É uma demonstração de que a escala finalmente progride na direção certa. Não é um computador quântico funcional, e o artigo não afirma que seja.

O que significam «código de superfície», «distância» e «abaixo do limiar»

Um **qubit lógico** é uma unidade protegida de informação quântica codificada em muitos qubits físicos. O **código de superfície** é uma forma específica de fazer essa codificação numa grelha 2D, em que qubits adicionais de «medição» verificam continuamente a existência de erros sem perturbar a informação armazenada. A **distância** d do código não é uma distância física: é o menor número de erros bem colocados que consegue corromper o qubit lógico sem ser detetado pelo código. Um d maior corresponde a uma região maior e mais robusta — gasta mais qubits físicos (aproximadamente $2d^2 - 1$) e corrige mais erros simultâneos, até $(d-1)/2$. Assim, os três tamanhos testados aqui, distâncias 3, 5 e 7, corrigem 1, 2 e 3 erros simultâneos e consomem aproximadamente 17, 49 e 97 qubits físicos — a memória de distância 7 construída pela Google utilizou 101, um pouco acima deste mínimo teórico.

«**Abaixo do limiar**» é a expressão crucial. A correção de erros só ajuda se a taxa de erro físico estiver abaixo de um valor crítico; nesse regime, cada aumento da distância suprime exponencialmente a taxa de erro lógico. O fator de supressão Λ mede isso — $\Lambda > 1$ significa que aumentar o código ajuda, e quanto maior Λ, melhor. A Google relata $\Lambda \approx 2{,}14$, o que significa que cada aumento de duas unidades na distância reduziu a taxa de erro lógico aproximadamente para metade. O facto de Λ estar confortavelmente acima de 1 é todo o resultado.



Como o erro lógico se acumula ao longo dos ciclos de correção nas memórias de distância 3, 5 e 7 (de cima para baixo). A linha a observar é a verde tracejada — o *melhor qubit físico individual* no chip. A memória de distância 7 (azul, em baixo) acumula erro mais lentamente do que essa linha, pelo que o qubit codificado dura mais do que o melhor qubit físico de que é construído — «para além do breakeven», por um fator de 2,4×. Este é o resultado sobre o tempo de vida; a supressão abaixo do limiar (Λ = 2,14, à medida que o código cresce de distância 3 para 5 e 7) está nos números do texto.

O que fizeram os autores

- Construíram memórias de código de superfície em dois chips Willow: um processador de 105 qubits que executou os códigos de distância 3, 5 e 7 do teste de escala (o maior era a memória de distância 7 com 101 qubits, 49 deles de dados) e um processador de 72 qubits que executou uma memória de distância 5 com descodificador em tempo real, além dos códigos de repetição de grande distância.
- Mediram como o erro lógico *por ciclo* mudava à medida que aumentavam a distância do código de 3 para 5 e 7, extraindo o fator de supressão Λ.
- Compararam o tempo de vida do qubit lógico com o melhor qubit físico individual no mesmo

chip, para testar o «breakeven».
- Executaram o código de distância 5 com um **descodificador em tempo real** — hardware clássico que interpreta as verificações de erro à medida que são produzidas — durante até um milhão de ciclos, para mostrar que a correção de erros consegue acompanhar a máquina.
- Levaram códigos de **repetição**, mais simples, até distância 29 para procurar fontes raras e profundas de erro que definem um piso para o desempenho.

O que encontraram

- **O código está abaixo do limiar.** O erro lógico por ciclo caiu por um fator $\Lambda = 2{,}14 \pm 0{,}02$ por cada aumento de duas unidades na distância — uma supressão exponencial limpa, o comportamento prometido pela teoria que nenhum processador tinha mostrado de forma definitiva.
- **A memória de distância 7 atingiu 0,143% ± 0,003% de erro por ciclo** e viveu **2,4 ± 0,3 vezes mais tempo** do que o seu melhor qubit físico — para além do breakeven.
- **A descodificação em tempo real acompanhou o sistema.** O descodificador teve uma latência média de 63 microssegundos na distância 5, face a um tempo de ciclo de 1,1 microssegundos, sustentado ao longo de um milhão de ciclos — a correção de erros foi executada em funcionamento, não apenas numa análise posterior.
- **Continua a existir uma fonte de erro rara e profunda.** Nos testes com códigos de repetição, o desempenho acabou por ficar limitado por rajadas de erros correlacionados que ocorriam aproximadamente **uma vez por hora** (cerca de uma em cada 3×10^9 ciclos), estabelecendo um piso de erro próximo de 10^{-10} cuja origem, dizem os autores, **ainda não é compreendida**.

O que isto não demonstra

- **Não** é um computador quântico a executar computação. Trata-se de uma *memória* quântica: armazena e protege um qubit lógico. Não executa operações lógicas (portas) entre qubits lógicos nem corre qualquer algoritmo.
- **Não** está a um qubit de distância de máquinas úteis. Um qubit lógico de distância 7 consome cerca de 101 qubits físicos; uma taxa de erro de 0,1% por ciclo continua muito acima dos aproximadamente 10^{-6} a 10^{-10} necessários para algoritmos reais. Fechar essa distância significa avançar para distâncias muito maiores — muito mais qubits físicos por qubit lógico — e algoritmos úteis precisam de *milhares* de qubits lógicos em simultâneo. O orçamento de qubits físicos sobe para milhões.
- O **«se for escalado» está a fazer trabalho real.** A conclusão do próprio artigo é que o desempenho do dispositivo, *se escalado*, poderá cumprir os requisitos de grandes algoritmos. Mostrar que a tendência está correta num qubit lógico não é o mesmo que ter construído a máquina escalada, e nada aqui garante que a tendência se mantenha em tamanhos muito maiores.
- O **piso de erro inexplicado continua a ser um problema real.** As rajadas correlacionadas que limitam o desempenho dos códigos de repetição são, nas palavras dos autores, ordens de grandeza maiores do que o esperado e impediriam aplicações tolerantes a falhas maiores até serem com-

preendidas — uma falha em aberto, explicitamente declarada, não um detalhe resolvido.
- Nada aqui diz respeito a **quebrar encriptação ou «supremacia quântica» em tarefas úteis**. Isso exige a máquina tolerante a falhas completa para a qual este resultado é uma pedra de fundação, não esta demonstração.

Quão forte é a evidência

- **A afirmação central é sólida e importante.** Operação abaixo do limiar com supressão exponencial limpa ao longo de três distâncias de código, somada a um tempo de vida para além do breakeven e a um descodificador em tempo real funcional, é exatamente a combinação que a área tentava alcançar e é demonstrada diretamente, não inferida. Não é um artefacto de hype; é um resultado real de engenharia de um grupo de referência.
- **Os autores são cuidadosos quanto ao âmbito.** Apresentam-no como *memória* abaixo do limiar, assinalam eles próprios o piso de erros correlacionados inexplicado e condicionam o futuro à expressão bem visível «se for escalado». O exagero, quando aparece, está na cobertura circundante que arredonda «um qubit de memória com correção de erros melhorou à medida que cresceu» para «a computação quântica chegou».
- **O estado honesto é um passo fundacional, dado de forma limpa.** Um qubit lógico, suficientemente protegido para que acrescentar redundância finalmente ajude — com um caminho longo, difícil e ainda não garantido de escala, portas lógicas e erros inexplicados pela frente.

Porque importa

A computação quântica tolerante a falhas sempre teve um sabor de problema do ovo e da galinha: as máquinas úteis precisam de taxas de erro que nenhum qubit físico consegue atingir, e a solução — correção de erros — só funciona se o hardware já for suficientemente bom para ficar abaixo do limiar. Atravessar essa linha, mesmo uma vez e mesmo com um único qubit lógico, muda a pergunta de «isto é sequer possível?» para «até onde pode ser escalado, e quão depressa?». É uma mudança real e significativa, e é por isso que o resultado merece atenção.

Mas o mesmo cuidado que torna o resultado credível deve temperar a história à sua volta. Este é o primeiro tijolo de uma fundação, bem assentado. Não é o edifício, e as pessoas que o colocaram são as primeiras a dizê-lo. A forma correta de acompanhar a computação quântica nos próximos anos é precisamente esta curva pouco glamorosa: se o fator de supressão se mantém à medida que os códigos crescem, se as portas lógicas podem ser executadas tão limpidamente quanto a memória lógica e se aquele misterioso erro de uma vez por hora chega a ser explicado.

Resumo claro

A Google Quantum AI mostrou, pela primeira vez de forma clara, que uma memória quântica de código de superfície consegue operar *abaixo do limiar*: ao aumentar o código de distância 3 para 5 e 7, a taxa de erro lógico caiu exponencialmente (cerca de 2,14× por cada dois passos), e a maior, uma memória de distância 7 com 101 qubits, viveu mais tempo do que o melhor qubit físico — para além do breakeven — enquanto a correção de erros corria em tempo real. É um marco genuíno e há muito procurado na engenharia de computadores quânticos. É também um único qubit lógico a funcionar como memória, com uma taxa de erro ainda muito distante daquilo que algoritmos reais exigem, sem operações lógicas executadas, com um piso de erro inexplicado que os próprios autores assinalam e com muitas ordens de grandeza de escala pela frente. Um limiar realmente atravessado — não um computador quântico entregue.

Fontes

Google Quantum AI and Collaborators, Quantum error correction below the surface code threshold, Nature 638, 920 (2025)
https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y

Author Correction: Quantum error correction below the surface code threshold, Nature 653, E5 (2026) — corrects a Fig. 3a axis label and legend keys; does not affect the below-threshold (Fig. 1) results
https://www.nature.com/articles/s41586-026-10559-8