The Clean Paper

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

Uma memória quântica finalmente melhorou ao crescer — o marco real, e a máquina que ela não é

A Google Quantum AI mostrou, claramente pela primeira vez, que uma memória quântica de código de superfície pode operar abaixo do limiar: ao aumentar o código de distância 3 para 5 e 7, a taxa de erro lógico caiu exponencialmente (cerca de 2,14x a cada dois passos), e a maior, uma memória de distância 7 com 101 qubits, durou mais que seu melhor qubit físico — além do breakeven — com correção de erro rodando em tempo real. É um marco de engenharia há muito buscado. Também é um único qubit lógico funcionando como memória, com taxa de erro ainda longe do que algoritmos reais exigem, sem operações lógicas executadas, com um piso de erro não explicado que os autores sinalizam e ordens de magnitude de escala pela frente. Um limiar cruzado, não um computador entregue.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · 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 dobrou para o lado certo

Por trinta anos, a correção de erros quânticos repousou sobre uma promessa que nunca havia sido cumprida de modo limpo. A teoria diz que, se você espalha uma unidade de informação quântica — um *qubit lógico* — por muitos qubits físicos ruidosos, e se esses qubits físicos forem bons o bastante, então acrescentar *mais* deles deve tornar o qubit lógico *melhor*, com erros caindo exponencialmente à medida que o código cresce. O porém está no "se": abaixo de um limiar crítico de ruído, mais qubits ajudam; acima dele, mais qubits só acrescentam mais ruído. Todo experimento anterior havia vivido do lado errado dessa linha, ou não mostrara a tendência de modo limpo. Aumentar o código piorava as coisas, não melhorava.

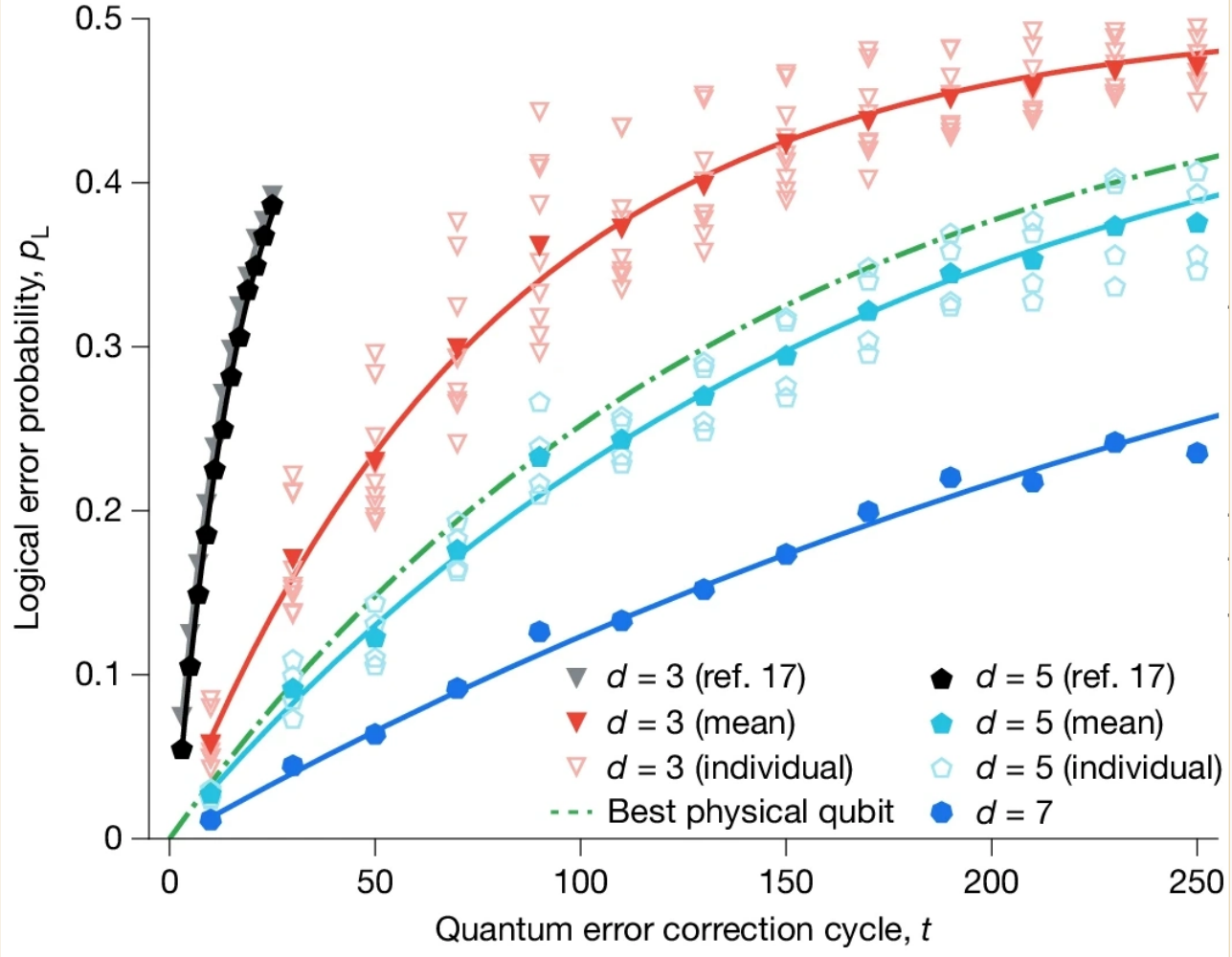
Em dezembro de 2024, a Google Quantum AI relatou a primeira demonstração clara do outro regime. No Willow, sua geração mais nova de processadores supercondutores, construiu memórias de código de superfície com distâncias 3, 5 e 7, e viu a taxa de erro lógico *cair* cada vez que o código ficava maior — por um fator de $\Lambda = 2{,}14 \pm 0{,}02$ a cada dois passos de 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 que seu próprio melhor qubit físico,* por um fator de $2{,}4 \pm 0{,}3$. Isso é chamado de estar "além do breakeven", e é a primeira vez que todo o aparato de correção de erros se pagou nesse hardware.

É um marco genuíno, e vale ser preciso sobre que tipo de marco. É uma prova de que a escala agora vai 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 um modo específico de fazer essa codificação em uma grade 2D, onde qubits extras de "medida" checam erros constantemente sem perturbar a informação armazenada. A **distância** do código d não é uma distância física: é o menor número de erros bem posicionados que pode corromper o qubit lógico sem o código perceber. Um d maior é um patch maior e mais robusto — 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 gastam cerca de 17, 49 e 97 qubits físicos — a memória de distância 7 do Google usou 101, um pouco acima desse mínimo de livro-texto.

"**Abaixo do limiar**" é a expressão crucial. Correção de erro só ajuda se sua taxa de erro físico está abaixo de um valor crítico; ali, cada aumento de 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. O Google relata $\Lambda \approx 2{,}14$, ou seja, cada aumento de dois passos na distância cortou a taxa de erro lógico aproximadamente pela metade. O fato de Λ estar confortavelmente acima de 1 é o resultado inteiro.



Como o erro lógico se acumula ao longo dos ciclos de correção, para as memórias de distância 3, 5 e 7 (de cima para baixo). A linha a observar é a verde tracejada — o *melhor qubit físico individual* do chip. A memória de distância 7 (azul, a mais baixa) acumula erro mais devagar que essa linha, então o qubit codificado vive mais que o melhor qubit físico do qual é construído — "além do breakeven", por um fator de 2,4×. Este é o resultado de tempo de vida; a supressão abaixo do limiar em si (Λ = 2,14, à medida que o código cresce de distância 3 para 5 e 7) está nos números do texto.

O que os autores fizeram

- Construíram memórias de código de superfície em dois chips Willow: um processador de 105 qubits que rodou os códigos de distância 3, 5 e 7 por trás do teste de escala (o maior sendo a memória de distância 7 com 101 qubits e 49 qubits de dados), e um processador de 72 qubits que rodou uma memória de distância 5 com decodificador em tempo real mais códigos de repetição de alta distância.
- Mediram como o erro lógico *por ciclo* mudava ao aumentar 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".
- Rodaram o código de distância 5 com um **decodificador em tempo real** — hardware clássico que interpreta as checagens de erro tão rápido quanto elas são produzidas — por até um milhão de ciclos, para mostrar que a correção de erro consegue acompanhar a máquina.
- Empurraram **códigos de repetição** mais simples até distância 29 para procurar fontes raras e profundas de erro que impõem um piso de desempenho.

O que eles encontraram

- **O código está abaixo do limiar.** O erro lógico por ciclo caiu por $\Lambda = 2{,}14 \pm 0{,}02$ a cada aumento de dois na distância — supressão exponencial limpa, o comportamento que a teoria prometia e que nenhum processador havia mostrado de modo definitivo.
- **A memória de distância 7 chegou a 0,143% ± 0,003% de erro por ciclo**, e viveu **2,4 ± 0,3 vezes mais** que seu melhor qubit físico — além do breakeven.
- **A decodificação em tempo real acompanhou.** O decodificador teve latência média de 63 microssegundos a distância 5 contra um tempo de ciclo de 1,1 microssegundo, sustentado por um milhão de ciclos — a correção de erro rodou ao vivo, não só em análise posterior.
- **Uma fonte rara e profunda de erro permanece.** Nos testes de código de repetição, o desempenho acabou limitado por rajadas de erro correlacionadas que aconteciam cerca de **uma vez por hora** (aproximadamente uma em cada 3×10^9 ciclos), estabelecendo um piso de erro perto de 10^{-10} cuja origem, dizem os autores, **ainda não é entendida**.

O que isso não prova

- **Não** é um computador quântico fazendo computação. É uma *memória* quântica: armazena e protege um qubit lógico. Não executa operações lógicas (gates) entre qubits lógicos e não roda algoritmo.
- **Não** está a um qubit de máquinas úteis. Um qubit lógico de distância 7 gasta cerca de 101 qubits físicos; uma taxa de erro por ciclo de 0,1% ainda está muito acima dos cerca de 10^{-6} a 10^{-10} de que algoritmos reais precisam. Fechar essa lacuna significa ir a distâncias muito maiores — muito mais qubits físicos por qubit lógico — e algoritmos úteis precisam de *milhares* de qubits lógicos ao mesmo tempo. O orçamento de qubits físicos para isso vai aos milhões.
- O **"se escalado" faz trabalho real.** A própria conclusão do artigo é que o desempenho do dispositivo, *se escalado*, poderia atender aos requisitos de grandes algoritmos. Mostrar que a tendência está certa em um qubit lógico não é o mesmo que ter construído a máquina escalada, e nada aqui garante que a tendência sobreviva a tamanhos muito maiores.
- O **piso de erro inexplicado é um problema vivo.** As rajadas correlacionadas que limitam o desempenho do código de repetição são, nas palavras dos autores, ordens de magnitude maiores que o esperado e impediriam aplicações tolerantes a falhas maiores até serem entendidas — uma falha aberta, dita claramente, não um detalhe resolvido.
- Não diz nada sobre **quebrar criptografia ou "supremacia quântica" em tarefas úteis.** Isso exige

a máquina tolerante a falhas completa, não esta demonstração.

Quão forte é a evidência

- **A afirmação central é sólida e importante.** Operação abaixo do limiar com supressão exponencial limpa em três distâncias de código, mais tempo de vida além do breakeven e decodificador em tempo real funcionando, é exatamente a combinação que a área tentava alcançar, e é demonstrada diretamente, não inferida. Não é artefato de hype; é um resultado real de engenharia de um grupo líder.
- **Os autores são cuidadosos sobre o escopo.** Enquadram como *memória* abaixo do limiar, sinalizam eles mesmos o piso de erro correlacionado não explicado e condicionam o futuro ao conspícuo "se escalado". O exagero, quando aparece, está na cobertura ao redor que arredonda "um qubit de memória corrigido melhorou ao crescer" para "a computação quântica chegou".
- **O status honesto é um passo fundamental, dado de modo limpo.** Um qubit lógico, protegido bem o bastante para que acrescentar redundância finalmente ajude — com uma estrada longa, difícil e ainda não garantida de escala, gates lógicos e erros inexplicados pela frente.

Por que importa

A computação quântica tolerante a falhas sempre teve um ar de ovo e galinha: as máquinas que seriam úteis precisam de taxas de erro que nenhum qubit físico alcança, e a correção — correção de erros — só funciona se o hardware já for bom o bastante para estar abaixo do limiar. Cruzar essa linha, uma vez que seja, mesmo em um único qubit lógico, muda a pergunta de "isso é possível?" para "até onde pode escalar, e com que rapidez?" É uma mudança real e significativa, e por isso o resultado merece atenção.

Mas o mesmo cuidado que torna o resultado confiável deve moderar a história em torno dele. Este é o primeiro tijolo de uma fundação, bem colocado. Não é o prédio, e as pessoas que o colocaram são as primeiras a dizer isso. A forma certa de acompanhar a computação quântica nos próximos anos é exatamente esta curva sem glamour: se o fator de supressão se mantém quando os códigos crescem, se gates lógicos podem ser feitos tão limpos quanto memória lógica e se aquele erro misterioso de uma vez por hora será explicado.

Resumo limpo

A Google Quantum AI mostrou, pela primeira vez de modo limpo, que uma memória quântica de código de superfície pode operar *abaixo do limiar*: ao crescer o código de distância 3 para 5 e 7, a taxa de erro lógico caiu exponencialmente (cerca de 2,14× a cada dois passos), e a maior, uma memória de distância 7 com 101 qubits, viveu mais que seu melhor qubit físico — além do breakeven — enquanto

sua correção de erro rodava em tempo real. É um marco genuíno e há muito buscado na engenharia de computadores quânticos. Também é um único qubit lógico atuando como memória, com taxa de erro ainda distante do que algoritmos reais exigem, sem operações lógicas executadas, com um piso de erro não explicado que os autores sinalizam e uma estrada de escala de muitas ordens de magnitude à frente. Um limiar cruzado — 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