PINNeAPPle

RELATÓRIO DE ESTUDO · EXEMPLO PÚBLICO

Erosão em curva de 90° ar com areia a 15 m/s

Onde a parede erode, a que taxa, em quanto tempo — e por que este número pode ser usado numa decisão.

1,05–1,49×

do ensaio publicado, dentro do fator 2 que a prática aceita

50,6°

de pico calculado, contra 45° medido

32 casos

do CAD ao modelo treinado, em 22,6 min



Documento ERC-04 · versão 1.0 · 2026
Caso de demonstração (geometria e condições públicas, sem dado de cliente)
Ensaio de referência: Vieira et al. (2016), dados abertos
PINNeAPPle · LAIS & YAN LTDA · pinneapple-labs.github.io

Uma curva de 90° de 50 mm transporta ar com areia. A pergunta não era “quanto erode”: era **quando a parede chega na espessura mínima** e **se trocar o raio da curva muda a resposta o suficiente para justificar a obra**.

Escopo contratado

ENTREGÁVEL	O QUE CONTÉM
Mapa de erosão	Taxa na parede (mm/ano) em toda a geometria, com a posição do pico
Vida útil	Anos até a espessura mínima, para o ponto crítico
Verificação	Comparação com ensaio publicado e escolha do modelo de erosão justificada
Modelo substituto	Resposta em segundos para novas vazões e raios de curva
Limites	O que não está provado e o que precisa de ensaio

Fora do escopo

Projeto mecânico do tubo, seleção de material, inspeção em campo, ensaio experimental. O estudo entrega o número e a prova; a decisão de engenharia e a compra continuam do lado de quem contrata.

> **Como ler este documento.** Cada número aparece com a referência contra a qual foi conferido — ensaio publicado, solver independente ou estudo de malha. Números sem referência não entram no relatório: ficam na seção de limites, como pergunta aberta.

Premissas que mudam a resposta

- A taxa de areia é a do cenário informado; um pico de partículas muda o resultado mais que a malha.
- A parede é aço-carbono; outro material muda o coeficiente de erosão, não a distribuição de impactos.
- O escoamento é permanente no ponto de operação avaliado; regime transitório (partidas, golpe) não está coberto.

Este é o formulário do caso de demonstração — no estudo de um cliente, estes campos vêm do CAD, da ficha de processo e do histórico de operação.

ITEM	VALOR	ORIGEM
Geometria	curva 90°, D = 50 mm	10·D a montante e 20·D a jusante
Fluido	ar a 20 °C · ρ = 1,204 kg/m³ · μ = 1,825·10⁻⁵ Pa·s	catálogo de fluidos
Partículas	quartzo · ρp = 2.650 kg/m³ · dp = 150 μm	Fs = 0,53 · ṁp = 10⁻⁴ kg/s
Parede	aço-carbono · 7.800 kg/m³ · HB 150	espessura 5 → 2 mm · 8.760 h/ano
Ponto de referência	U = 20 m/s · R/D = 1,5	caso base do mapa e do estudo de malha
Campanha	32 pontos · Sobol	U de 10 a 30 m/s · R/D de 1,5 a 5

Regra do estudo: a faixa de validade é declarada antes de rodar. Fora de U = 10–30 m/s ou de R/D = 1,5–5, o modelo substituto avisa que está extrapolando — e o número perde a garantia.

Como o método foi montado

ETAPA	ESCOLHA
Malha	Hexaédrica gerada por script (classy_blocks), 10.400 células, y⁺ alvo 50, checkMesh aprovado
Escoamento	simpleFoam, k-ω SST, 109 iterações até convergir, balanço de massa 3,5·10⁻⁶
Partículas	icoUncoupledKinematicParcelFoam, 2.000 parcelas (4.000 no teste estatístico)
Erosão	Modelo de impacto DNV-RP-O501 aplicado aos impactos na parede; E/CRC e Finnie como checagem
Convergência do caso	26 s de parede em 4 núcleos · 14 a 17 mil impactos na parede

Antes de reportar uma taxa de erosão, o modelo foi obrigado a reproduzir um ensaio que ele nunca viu: a curva de Vieira et al. (2016), D = 76,2 mm, R/D = 1,5, areia de 150 µm, em três velocidades.

ENSAIO	U (M/S)	MEDIDO (MM/ANO)	CALCULADO (MM/ANO)	RAZÃO	FATOR 2
T1	11	6,5	6,8	1,05×	aprovado
T3	15	13,2	16,9	1,28×	aprovado
T5	23	36,2	53,8	1,49×	aprovado
posição do pico	—	45°	50,6°	+5,6°	aprovado

Areia de 150 µm nos três ensaios. Razões e posições calculadas com o modelo de impacto da DNV-RP-O501, na malha do estudo. Medidos: Khan et al. (2023); posição do pico: Khan et al. (2022).

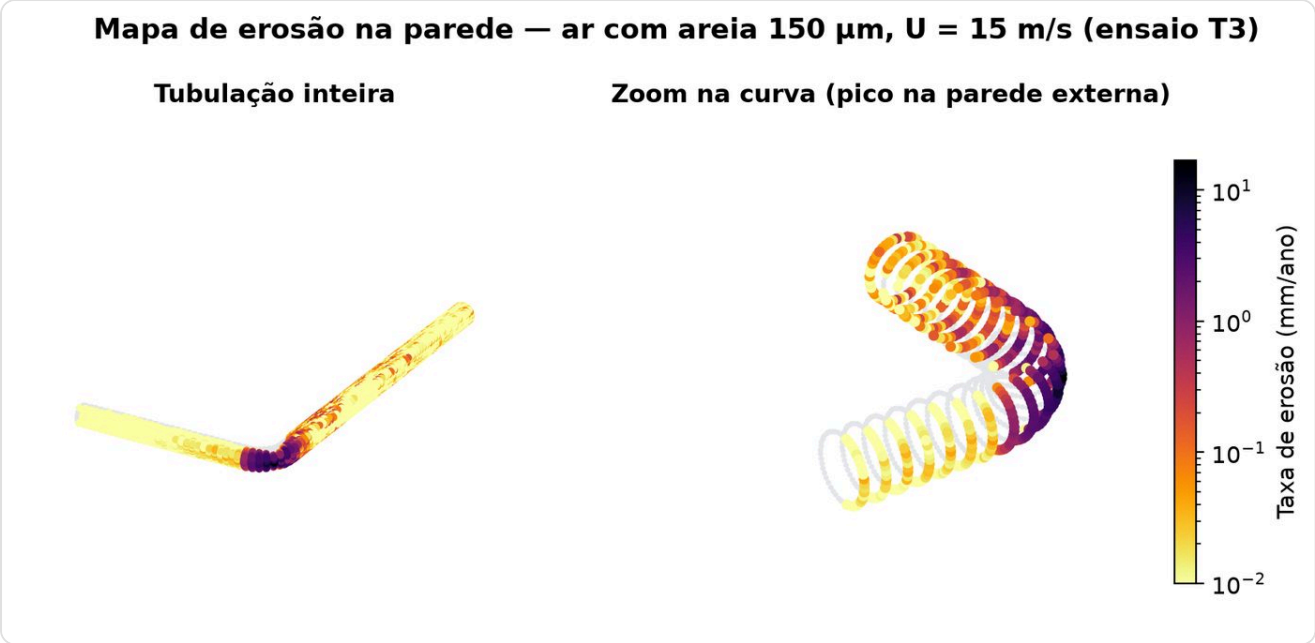
Por que isto importa. Erosão não é fenômeno para precisão de 1%: depende da distribuição de partículas, do material e do histórico. A prática de projeto aceita um fator 2. O compromisso é ficar dentro da faixa **e dizer em que ponto dela**.

Os outros modelos foram testados e reprovados

MODELO DE EROSÃO	CONTRA OS TRÊS ENSAIOS	LEITURA
DNV-RP-O501 (impacto)	1,05–1,49×	adotado dentro do fator 2 nos três
E/CRC	1,98–2,5× acima	reprovado sai da faixa nos três
Finnie	~28× acima	reprovado ordem de grandeza errada
Fórmula fechada DNV §8.4 (sem CFD)	97–100× abaixo em 2 de 3	reprovado depende do fator G, que varia de 0,02 a 1

O que ainda não está provado. As constantes de erosão dos três modelos vêm de fonte secundária (o ensaio original é pago). A verificação acima é a melhor evidência disponível hoje, declarada como tal — não como validação definitiva.

Primeiro o ensaio, resolvido: T3, 15 m/s



Mapa de erosão na parede no ensaio T3: tubulação inteira e zoom na curva, com o pico na parede externa logo após a entrada da curva. Escala em mm/ano.

O máximo não está no meio da curva: está na parede externa, 50,6° depois da entrada (o ensaio mede 45°). É esse ponto que a inspeção precisa medir primeiro — e é ele que define a vida útil do resto da linha.

Depois o caso de projeto: U = 20 m/s, R/D = 1,5

MODELO DE EROSÃO	TAXA MÁXIMA (MM/ANO)	VIDA ÚTIL 5 → 2 MM
DNV-RP-O501 (adotado)	1,47	2,0 anos
E/CRC	2,83	1,1 anos
Finnie (checagem cruzada)	23,8	0,13 ano
Fórmula fechada DNV §8.4 (sem CFD)	0,037	81 anos

O que a decisão precisa saber: com o modelo verificado, a vida útil projetada é de **2 anos** no ponto crítico. A fórmula fechada sem CFD diria 81 anos para a mesma geometria. A diferença não é precisão: é a decisão entre “troca programada” e “nenhuma ação”.

Trinta e dois casos cobrindo U de 10 a 30 m/s e R/D de 1,5 a 5 foram resolvidos em CFD e usados para treinar um modelo que responde em segundos. Os 32 terminaram sem rejeição, em 22,6 min de parede (1,94 h de CPU).

INDICADOR	REFERÊNCIA SEM IA	VALIDAÇÃO	TESTE	FORA DA FAIXA
Perda de carga (ΔP)	Darcy + Colebrook	0,7%	1,0%	0,4%
Taxa máxima de erosão	DNV §8.4	15,7%	10,6%	19,7%

Erro relativo médio. O intervalo de confiança por bootstrap não foi calculado: há 9 pontos de teste e fora da faixa, e o critério exige no mínimo 10.

Para que serve, na prática

- Variar diâmetro, raio de curva e vazão deixa de custar um dia por ponto.
- A vida útil deixa de ser um número único e passa a ser uma curva contra a vazão.
- Fora da faixa de treino, o modelo avisa que está extrapolando, com o erro medido de 19,7%.

> **O que o substituto não faz:** substituir o ensaio. Ele reproduz o CFD dentro da faixa treinada — se o CFD estiver errado para o seu caso, o substituto erra junto, mais rápido.

Esta seção existe porque um número sem os seus limites é uma opinião com casas decimais. Tudo o que não passou por referência externa está aqui.

ITEM	ESTADO	CONSEQUÊNCIA PRÁTICA
Malha da campanha	`grossa`	10.400 células: ~30% acima no ΔP e ~40% abaixo na erosão, contra o valor extrapolado da malha fina
Convergência de malha (GCI)	`fora da meta`	ΔP com GCI de 6,8–12,6% na malha fina (meta 5%); a erosão só converge no ponto de referência (2,9%)
Constantes de erosão	`fonte secundária`	DNV, E/CRC e Finnie vêm de literatura secundária; o ensaio original é pago
Campos enviados à verificação	`6 provas não rodaram`	11 a favor, 0 contra, 65% de cobertura
Interpolação do substituto	`medida`	1,0% no ΔP e 10,6% na erosão, em pontos fora do treino
Extrapolação do substituto	`avisada, não garantida`	fora de U 10–30 m/s ou R/D 1,5–5, o erro sobe (19,7%)

> **Regra da casa.** Resultado com malha grossa vale como demonstração do pipeline, não como número de cliente. Este documento é público justamente por isso.

O que faria este número subir de patamar

- Campanha na malha fina, com GCI dentro de 5% também para a erosão.
- Ensaio próprio, ou a compra do ensaio original, para trocar as constantes secundárias.
- Envio dos campos completos para a verificação, fechando as seis provas que não rodaram.

1,47	2,0	50,6°	1,0%
mm/ano no ponto crítico	anos até 5 → 2 mm	posição do pico na curva	erro do substituto no ΔP

Recomendação

Inspecionar a parede externa logo após a entrada da curva, não o meio dela. Com a taxa verificada e a espessura mínima adotada, a janela de troca programada é de dois anos — e o substituto permite testar, em segundos, se aumentar o raio compra mais tempo que trocar o material.

O que este estudo não decide

Qual material comprar, qual fornecedor escolher, quando parar a planta. Ele entrega a taxa, a posição e o erro; a decisão econômica usa esses números junto com custo de parada e preço do tubo.

Proveniência

O QUE	ONDE
Ensaio de referência	Vieira et al. (2016), E/CRC Tulsa · tabela aberta em Khan et al. (2023), *Eng. Proc.* 45:28
Posição do pico medida	Khan et al. (2022), *Materials* 15:3721
Artigo público do estudo	`pinneapple-labs.github.io/artigos/erosao-curva-90/`
Código e caso	`github.com/PINNeAPPle-Labs/PINNeAPPle-CFD · casos/cfd04-curva-areia`

> **Este é um relatório de exemplo,** montado sobre um caso de demonstração com geometria e condições públicas. Um estudo para a sua planta segue a mesma estrutura, com a mesma seção de limites.