PINNeAPPle

RELATÓRIO DE ESTUDO · EXEMPLO PÚBLICO

Corpo de Ahmed
arrasto, malha e o que o RANS não vê

Um benchmark de 1984, quatro malhas, 48 simulações e um substituto — com o erro de modelo separado do erro de malha.

1,1%

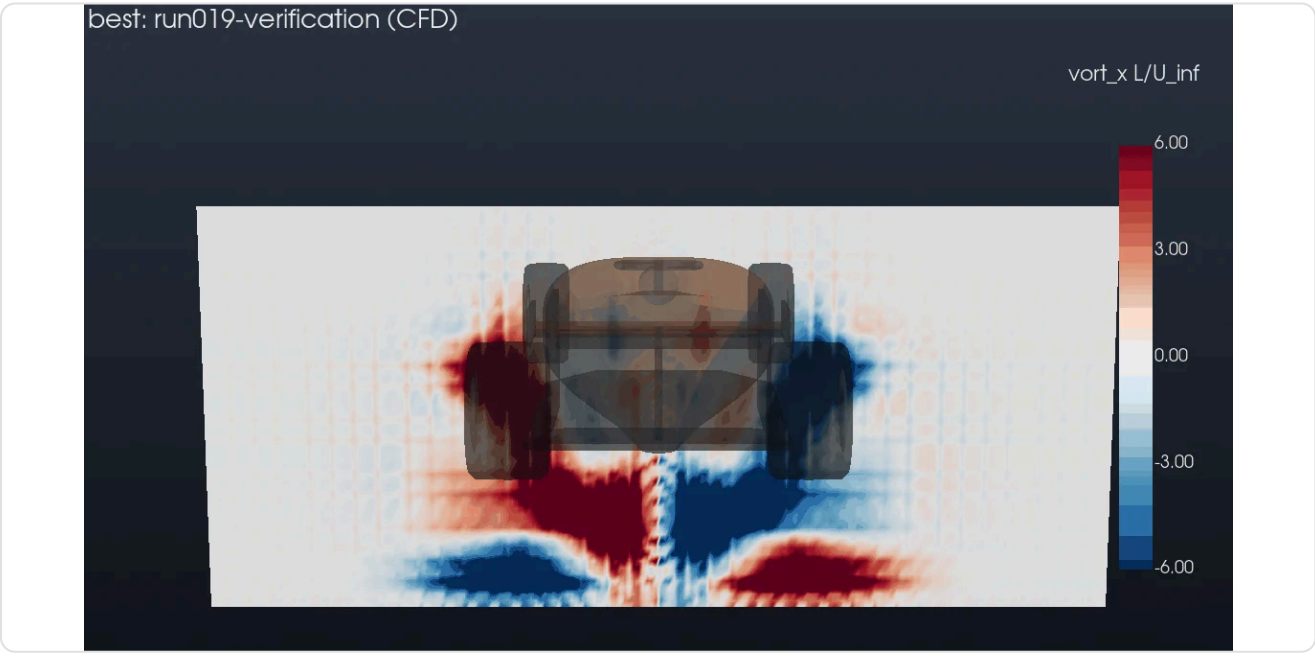
de GCI na malha fina, com ordem observada 4,26

+4,3% · −4,7%

de CD a 25°, nas malhas L1 e L2

48 de 48

casos de DOE rodados no OpenFOAM



Documento AER-01 · versão 1.0 · 2026
Caso aberto: Ahmed, Ramm & Faltin (1984)
OpenFOAM v1912 · gmsh 4.12 · meio modelo, estrada móvel, RANS k-ω SST
PINNeAPPle · LAIS & YAN LTDA · pinneapple-labs.github.io

O corpo de Ahmed é o benchmark mais usado de aerodinâmica automotiva: uma geometria simples, com uma traseira inclinada cujo ângulo decide o arrasto. Ele foi adotado porque publicado, medido e difícil — o escoamento separa, e é aí que os modelos erram.

ITEM	VALOR
Geometria	1,044 × 0,389 × 0,288 m · raios frontais de 0,1 m · rampa traseira de 0,222 m, sem estais
Modelo	meio modelo, estrada móvel, RANS estacionário k-ω SST com funções de parede, 5 camadas de prisma
Variáveis	slant de 0 a 40° · altura livre de 30 a 80 mm · velocidade de 20 a 60 m/s
CAD	B-rep OpenCASCADE via gmsh, reimportado do STL: fechado, simétrico a 1,0 mm, volume 0,10993 m^3 contra 0,10959 paramétrico

O CFD no corpo do CAD, na condição de referência (25°, 50 mm, 60 m/s), deu **CD 0,3004** contra 0,2966 do corpo paramétrico — 1,3% de diferença só por passar pelo CAD e de volta. É a primeira incerteza do estudo, e ela aparece antes da primeira simulação.

> **A pergunta do estudo.** Não era “qual é o CD”: era **quanto do erro é malha e quanto é modelo** — porque as duas coisas pedem decisões opostas. Malha se refina; modelo se troca.

Quatro malhas, razão de refino constante de $\sqrt{2}$, mesma condição de referência e 1.000 iterações.

MALHA	CÉLULAS	CD	CHECAGEM DA EXECUÇÃO
L0	84.223	0,2890	`rejeitada (balanço de massa)`
L1 (campanha)	207.080	0,2966	`revisão (resíduos)`
L2	534.472	0,2707	`revisão (resíduos)`
L3	1.398.073	0,2640	`revisão (resíduos)`

L0–L1–L2 converge de forma oscilatória; L1–L2–L3 converge monotonicamente, com ordem observada **4,26** e valor de Richardson **0,2617**. O GCI na L3 é de **1,1%**.

> **Leia a ordem com desconfiança.** 4,26 está acima da ordem formal do esquema (2), o que faz do GCI um **limite inferior** da incerteza numérica — não uma estimativa exata. Dizer isso é parte do resultado.

A malha da campanha (L1) ficou **13,3% acima** do valor de Richardson. Ela foi mantida por custo: 7,5 min contra 19 min na L2 e 107 min na L3, em 4 núcleos. Esse 13% é a incerteza numérica de todo substituto treinado na campanha.

O ensaio de Ahmed, Ramm e Faltin (1984) a 60 m/s, nas duas malhas medidas.

SLANT	MEDIDO	L1	L2
0°	0,250	0,2693 (+7,7%)	0,2547 (+1,9%)
12,5°	0,230	0,2557 (+11,2%)	0,2399 (+4,3%)
25°	0,285	0,2973 (+4,3%)	0,2715 (−4,7%)
30°	0,378	0,3378 (−10,6%)	0,3184 (−15,8%)
35°	0,260	0,3835 (+47,5%)	0,4079 (+56,9%)
40°	0,250	0,3005 (+20,2%)	0,3958 (+58,3%)

Abaixo do ângulo crítico, refinar a malha aproxima o CFD da medição — o comportamento que se espera de um erro numérico. É esse trecho que sustenta o resto do estudo.

> **Onde a validação para de valer.** De 30° para cima, refinar piora: o erro cresce de 10,6% para 15,8% e de 47,5% para 56,9%. Isso não é ruído de malha — é o modelo.

O RANS estacionário com k-ω SST mantém o escoamento da rampa colado além de 30°, quando o ensaio mostra separação. O resultado é o pico de arrasto deslocado de 30° para 35–40°.

É um erro de **física do modelo**, e a consequência prática é direta: nenhuma quantidade de malha conserta, e nenhum substituto treinado nesses casos aprende o comportamento real — ele aprende o viés do solver, com fidelidade.

> **O que isso custa ao projeto.** A escolha de geometria de traseira vive justamente na região de 25° a 35°. Um estudo que só reporta “CD = 0,32” nessa faixa está dando um número com erro de modelo de até 57% — e sem dizer.

Quarenta e oito geometrias por amostragem latina hipercúbica maximin (discrepância centrada de 0,0039 contra 0,0141 de desenhos aleatórios do mesmo tamanho); 48 de 48 rodaram. O conjunto final tem 54 casos: 28 de treino, 6 de validação, 10 de teste e 10 de extrapolação (todo caso com slant acima de 34°).

ALVO	FAMÍLIA ESCOLHIDA	ERRO NO TESTE	COBERTURA NO TESTE	ERRO NA EXTRAPOLAÇÃO
CD	GP	0,42%	1,0	5,2%
CL	GP	2,0%	0,9	18,4%
Cp (campo)	POD-GP	9,9%	0,89	20,0%

Erro relativo para CD e CL; L2 relativo médio para o campo de Cp. O split de teste e o de extrapolação são medidos uma vez, depois da escolha do modelo.

Índices de Sobol na região de treino: em CD, o slant explica **0,96** da variância, a altura livre 0,05 e a velocidade 0,01. Para o arrasto de atrito a ordem se inverte (0,09 / 0,04 / 0,93): são dois fenômenos, com duas dependências.

> **A extrapolação avisa.** Acima de 34° de slant, a cobertura dos intervalos cai para 0,6–0,8: o modelo não é para ser usado ali, e o gêmeo diz isso na tela em vez de responder.

1,1%
de GCI na malha L3

13,3%
de incerteza da malha da campanha

57%
de erro de modelo a 35°

0,42%
de erro do substituto de CD no teste

O que este estudo não resolve

- RANS estacionário não captura a separação instável da rampa acima de 30°; para isso é preciso URANS ou LES.
- A incerteza da malha da campanha (13,3%) está embutida em todo substituto treinado nela.
- O modelo de atrito falha a checagem física “cai com Re” e foi descartado — não por erro, por física.
- y^+ dentro da faixa das funções de parede foi exigido em toda execução; fora dela, o resultado não é comparável.

Proveniência

O QUE	ONDE
Ensaio de referência	Ahmed, Ramm & Faltin (1984)
Caso completo	`PINNeAPPle/examples/end_to_end/ahmed_body`
Dados e evidências	`results/dataset` · `results/evidence.zip` (com SHA-256 de cada fonte)
Artigo público	`pinneapple-labs.github.io/artigos/aerodinamica-autonoma/`

Este é um relatório de exemplo, sobre um benchmark público. Um estudo para o seu corpo segue a mesma estrutura: malha com GCI, validação contra ensaio, o erro de modelo separado do numérico — e a página do que não está provado.