ENGENHARIA DE MINAS / USP

Caminhões autônomos

A engenharia por trás da operação

Complexo Serra Norte · Vale

COI – Centro de Operações Integradas Serra Norte

Apresentador: Paulo Damasceno

45 minutos de conceitos e casos + 15 minutos de perguntas

Serra Norte: o contexto da operação

Parauapebas, sudeste do Pará



12

cavas em operação

≈100

caminhões fora de estrada

>200 Mt/ano

movimentação total

65–75 Mt/ano

produção de minério de ferro

Mt = milhões de toneladas.Carajás iniciou a operação em 1984.

45 caminhões, dois sistemas autônomos

22

Komatsu - FrontRunner

N4E

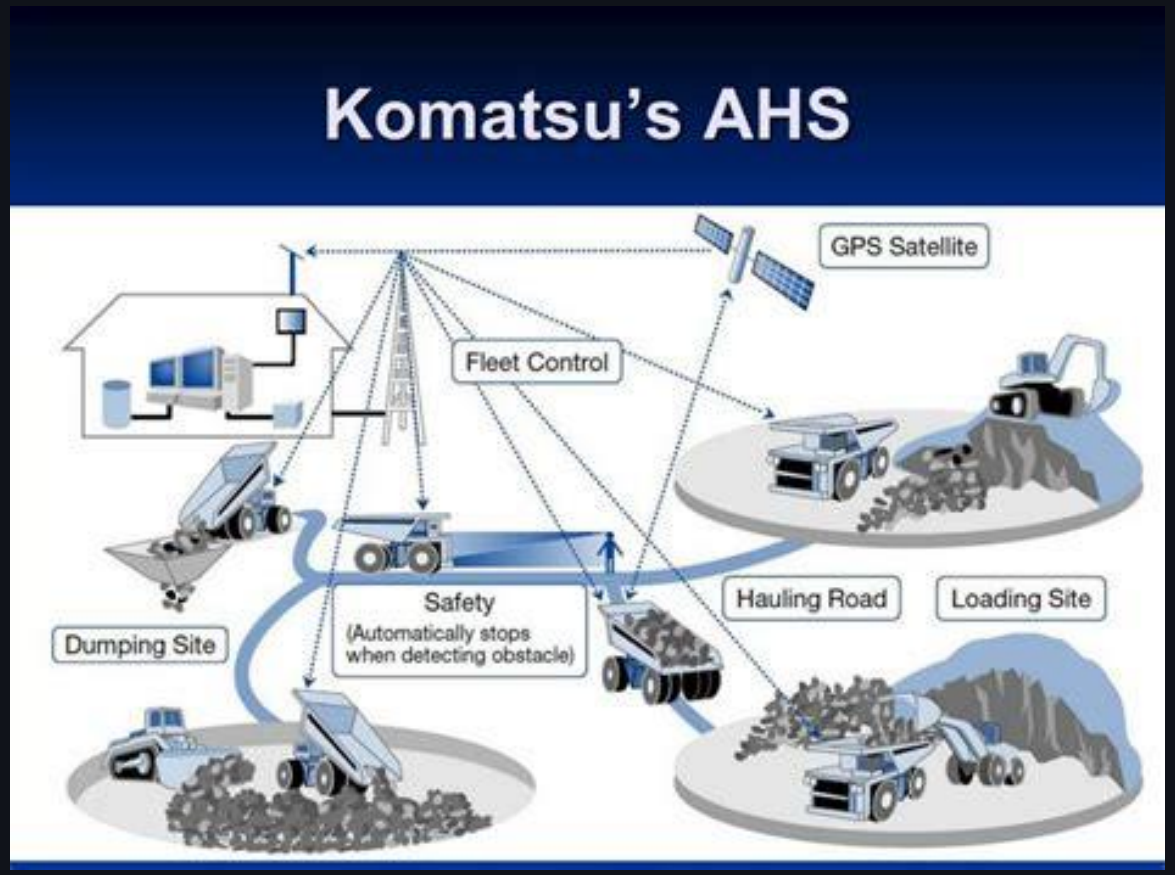
23

Cat MineStar Command

N4W Sul



Como o sistema percebe, decide e executa



CONTROLE E DESPACHO

Distribuem missões e acompanham a frota.

COMUNICAÇÃO

Conecta equipamentos e centro de controle.

LOCALIZAÇÃO E PERCEPÇÃO

GNSS e sensores apoiam posição e detecção.

CONTROLE EMBARCADO

Executa direção, tração e frenagem.

GNSS: navegação por satélites.

O ciclo continua sendo o ciclo da mina

01

Missão

Despacho define origem, destino e prioridade.

02

Carregamento

Aproximação, posicionamento e liberação da carga.

03

Transporte

Rota autorizada, velocidade e interação com o tráfego.

04

Descarga e retorno

Posicionamento no destino e nova missão.

A autonomia exige regras claras em cada interface.

N4E: operação com Komatsu

22

caminhões Komatsu 930E

37 Mt/ano

movimentação total da frota

Equipamentos de carga

2 PC 8000 · 1 Cat 7495

3 Komatsu L2350



O caminhão impõe limites à infraestrutura

Komatsu 930E-5



290 t

carga útil nominal

Dados do caminhão

Comprimento total	**13,21 m**
Largura total	**9,15 m**
Altura total (ROPS)	**6,35 m**
Diâmetro de giro (SAE)	**32,0 m**
Peso operacional vazio	**231.331 kg**

Praça e frente de lavra

Largura livre total: 65 m
Comprimento livre: 70 m
Raio operacional: ≥ 32 m
Distância de espera: ≥ 20 m
Entre entrada e saída: 20 m
Área livre para carregadeira: até 45 m
Manobra a entrada/saída: ≥ 35 m
Posicionamento final: 70° da face
Ataque da escavadeira: 90°
Velocidade de manobra: < 5 km/h
Piso nivelado, firme e drenado

FrontRunner: consistência do transporte

Até 15%

de economia de custos divulgada pela Komatsu

Despacho integrado

O FMS DISPATCH apoia a alocação dos caminhões.

Operação previsível

Condução consistente e dados operacionais apoiam o controle da frota.

1.000º caminhão autônomo comissionado em abril de 2026

Referências globais do fabricante. Não representam resultados medidos em Serra Norte nem garantia de desempenho.

N4W Sul: operação com Caterpillar

23 caminhões

12 Cat 794 AC

11 Cat 797F

36 Mt/ano

Eixo N4W Sul - Cavas 1, 2, 3 e 4

Equipamentos de carga

1 XCMG 5600 · 2 Cat 7495

3 Komatsu L2350



Frotas diferentes, interfaces específicas

Dimensões que condicionam a operação

	Cat 794 AC	Cat 797F
		
Carga útil de referência	**297 t**	**363 t**
Largura	**8,74 m**	**9,76 m**
Comprimento	**15,46 m**	**15,08 m**
Diâmetro de giro	**32,4 m**	**42,0 m**
Ângulo de direção	**39°**	**40°**

MineStar Command: coordenação da frota

Até 30%

de ganho de produtividade divulgado pela Caterpillar

SEGURANÇA

Menor exposição de pessoas e controles de interação.

CONTINUIDADE

Maior regularidade do ciclo, sujeita a paradas e manutenção.

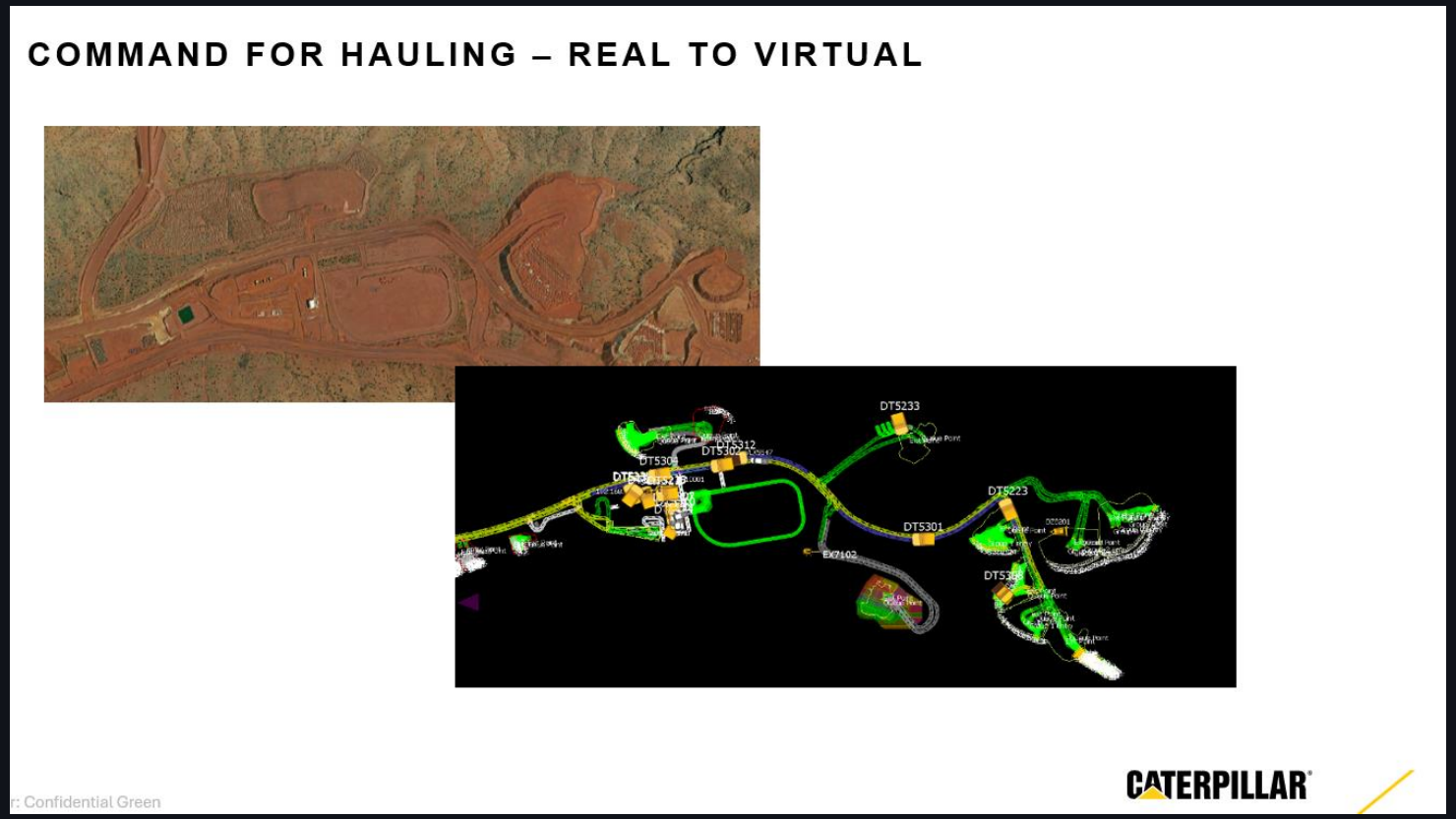
INTEGRAÇÃO

Equipamentos tripulados e autônomos sob regras definidas.

O ganho real depende da operação completa.

Referência global do fabricante. “Até 30%” não é resultado de Serra Norte e não é diretamente comparável à economia Komatsu.

O mapa digital precisa refletir a mina real



Regra Azul

Uma mudança em campo exige atualização e validação no ambiente digital.

Vias, limites e pontos operacionais precisam permanecer coerentes.

Princípio apresentado no material-base. Alterações e liberações seguem procedimentos autorizados da unidade.

Segurança depende de barreiras complementares

01 Acesso e interação

Área autônoma com autorização, regras de circulação e interfaces controladas.

02 Percepção e posição

Sensores, LiDAR, radar e GNSS apoiam o conhecimento do entorno.

03 Parada e retomada

A-Stop e respostas do sistema seguem treinamento e procedimentos locais.

04 Pessoas e disciplina

Equipe qualificada, comunicação clara e gestão de mudanças.

Conteúdo conceitual. Não substitui treinamento, autorização de acesso ou procedimentos de emergência e retomada da unidade.

Como medir o desempenho da autonomia

Produção por hora ≈

carga média × ciclos por hora

EXEMPLO DIDÁTICO

290 t × 2 ciclos/h
= 580 t/h por caminhão

Antes de atribuir um ganho:

Comparar rotas e cargas equivalentes.

Separar disponibilidade, utilização e tempo de ciclo.

Exemplo hipotético, sem representar resultado de Serra Norte. Não inclui paradas, filas ou variação da carga.

Sala de controle: engenharia da autonomia

Engenheiros apoiam as decisões do turno e a melhoria contínua

N4E: Komatsu FrontRunner + DISPATCH

Desempenho da frota

Analisam filas, ciclos e utilização para priorizar as perdas do transporte.

Mina real e mapa digital

Revisam projetos, restrições e pontos de fila em sintonia com as equipes de campo.

N4W Sul: Cat MineStar Command

Confiabilidade dos sistemas

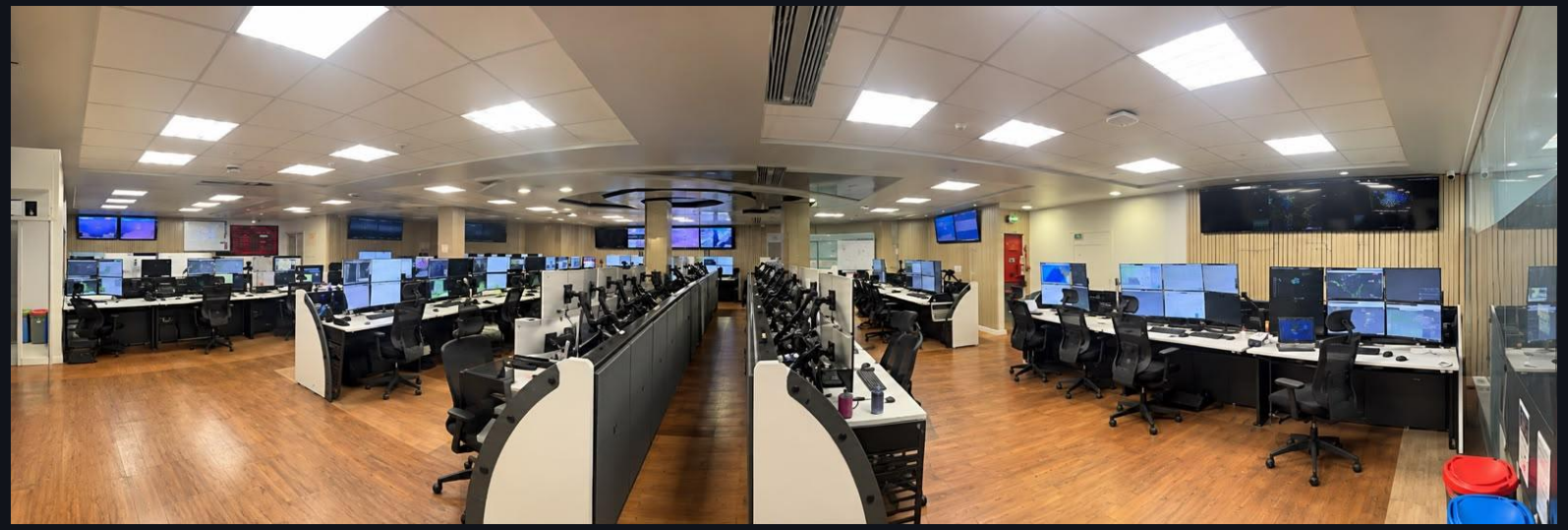
Investigam eventos de comunicação e posição com manutenção e fabricantes.

Segurança e gestão de mudanças

Apoiam o tratamento de desvios e a validação das condições de operação.

Atuação integrada com operação e despacho. Liberações e retomadas seguem as responsabilidades e os procedimentos da unidade.

Sala de Controle: Centro de Operações Integradas - Carajás





GER PROG PROC E CONTR OPER SN

04 Coordenações Turno 3x3 – 01 Coordenação Administrativa de Engenharia

Efetivo Operacional p/ Turno:

Cat: 01 Controlador / 01 Projetista / 01 Analista
Kom: 01 Controlados / 01 analista



O que o engenheiro precisa garantir?

Uma mina que o sistema consiga compreender e operar com segurança.

CASO PARA DISCUSSÃO

Uma via mudou de traçado durante o turno.

Que dados precisam mudar?

Quem valida a condição de operação?

Quais evidências sustentam a liberação?