



WEBINÁRIO IPR+

Inovações em Projetos de Infraestrutura Ferroviária

Autor: Antonio Carlos Rodrigues Guimarães, Profº D.Sc, IME

7 de maio de 2025

SUMÁRIO

- Introdução;
- Conceito de Pavimento Ferroviário
- Maturidade Tecnológica
- Inovações Por Grupos
- Inovações Desenvolvidas (2012 – 2025)
- Inovações em Desenvolvimento e Perspectivas
- Conclusões
- Agradecimentos

SUMÁRIO

- **Introdução;**
- Conceito de Pavimento Ferroviário
- Maturidade Tecnológica
- Inovações Por Grupos
- Inovações Desenvolvidas (2012 – 2025)
- Inovações em Desenvolvimento E Perspectivas
- Conclusões
- Agradecimentos

INTRODUÇÃO

- Retomada dos investimentos em ferrovias (Heavy Haul);
- Operadoras: Vale, CSN, Vli, Rumo, MRS.
- Valec (Infra): FIOL
- Cenário atual: implantações e restaurações;
- Critérios de projeto x normas técnicas
- Mecânica dos pavimentos, Mecânica dos Solos Não Saturados e Solos tropicais e Classificação MCT;



Equipe Envolvida - Créditos

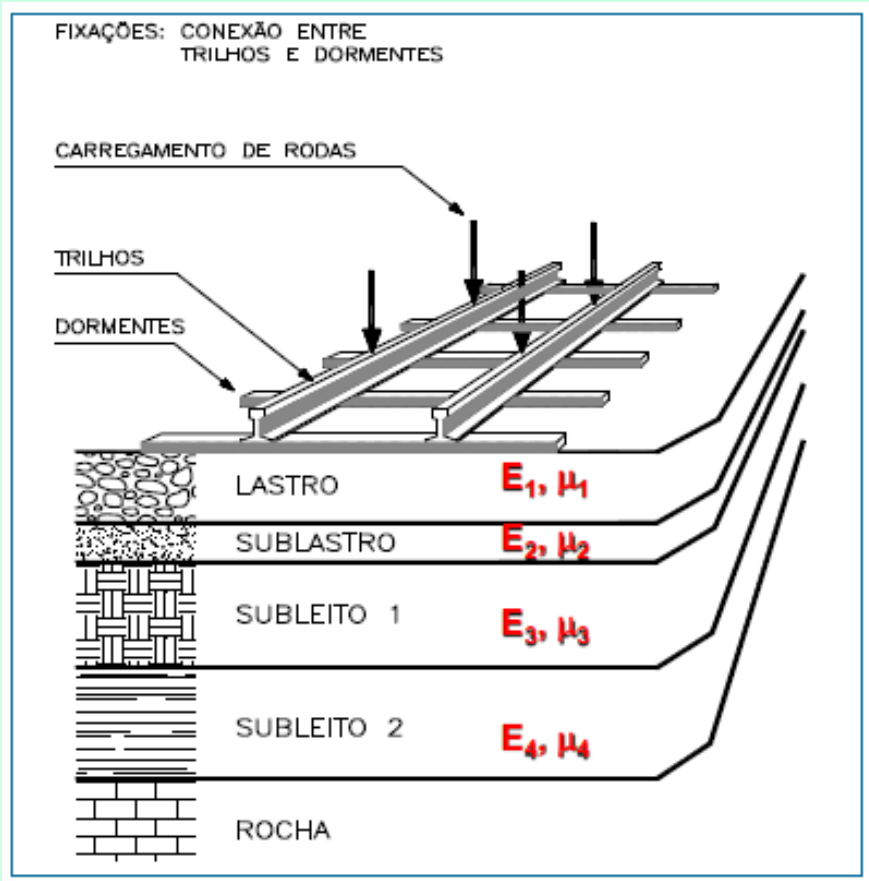
- **Gabriel Nascimento, Elgayer Engenharia, D.Sc, Profº UFF**
- **José Carlos Silva Filho, D.Sc, Vale**
- **Bruno Guimarães Delgado, D.Sc, U. Porto**
- Luiza Alencar, D.Sc IME
- Maelkson Bruno, Doutorando IME
- Juliana Tanabe, Doutoranda IME e Vale
- Willian Wilson, Doutorando IME
- Lislely Coelho, Doutoranda IME
- Ciro Azevedo, Eng IME
- Mayssa Alves da Costa, Profª D.Sc UEMA
- Fabiana Bartalini Von der Osten, M.Sc, Profª PUC-PR
- Lidiane Hellen, M.Sc IME
- Artur Rosa, Mestrando IME

SUMÁRIO

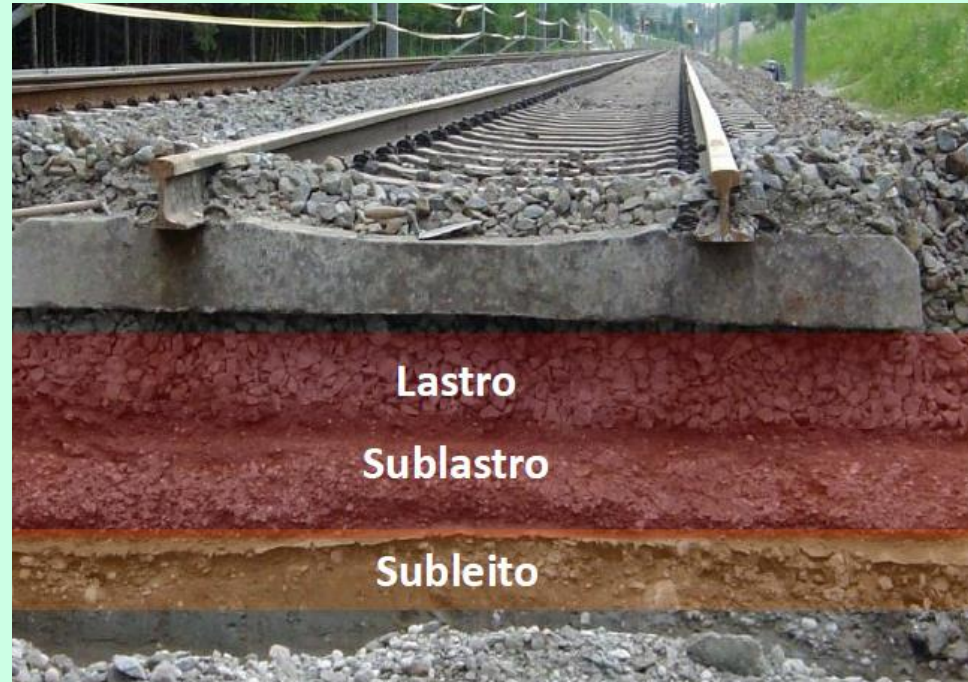
- Introdução;
- **Conceito de Pavimento Ferroviário**
- Maturidade Tecnológica
- Inovações Por Grupos
- Inovações Desenvolvidas (2012 – 2025)
- Inovações em Desenvolvimento E Perspectivas
- Conclusões
- Agradecimentos

Conceito de Pavimento Ferroviário

Sistema multicamadas composto por trilhos, dormentes e elementos de fixação (grade), lastro, sublastro, reforço e subleito.



Fonte: Selig & Waters (1994)



Fonte: Silva Filho

Pavimento Ferroviário



Estrada de Ferro Carajás (EFC)

Ferrovia Centro Atlântica (FCA) –
Corredor sul-sudeste

Lastro Novo

Lastro
Degradado -
Interlayer

Sublastro (fino)

Subleito Argiloso
LG' -



Pavimento Ferroviário

- Trilhos: em geral área de atuação de engenheiros metalúrgicos, mas é possível calcular esforços e comparar com valores adm
- Dormentes: engenheiros de civis/(estruturas ou concreto), idem
- Demais camadas: engenheiro de pavimentos

Dimensionamento tradicional de Ferrovias

Tensões na Via

- Método de Winkler

Viga contínua

$$M_{máx} = 0,1875.P.Cd.a$$

Onde:

P = carga
estática da roda
 Cd = coeficiente
dinâmico
 a = distância de
entre eixos dos
dormentes

- Método de Talbot

$$EI = \frac{d^4 y}{dx^4} + u.y = 0$$

Onde:

E = módulo de
elasticidade do
trilho;

I = momento de
inércia do trilho;

u = módulo de via;

y = deflexão da via.



As espessuras são função do CBR das camadas!

Equação de Heukelom, unidade ótima

SUMÁRIO

- Introdução;
- Conceito de Pavimento Ferroviário
- **Maturidade Tecnológica**
- Inovações Por Grupos
- Inovações Desenvolvidas (2012 – 2025)
- Inovações em Desenvolvimento e Perspectivas
- Conclusões
- Agradecimentos



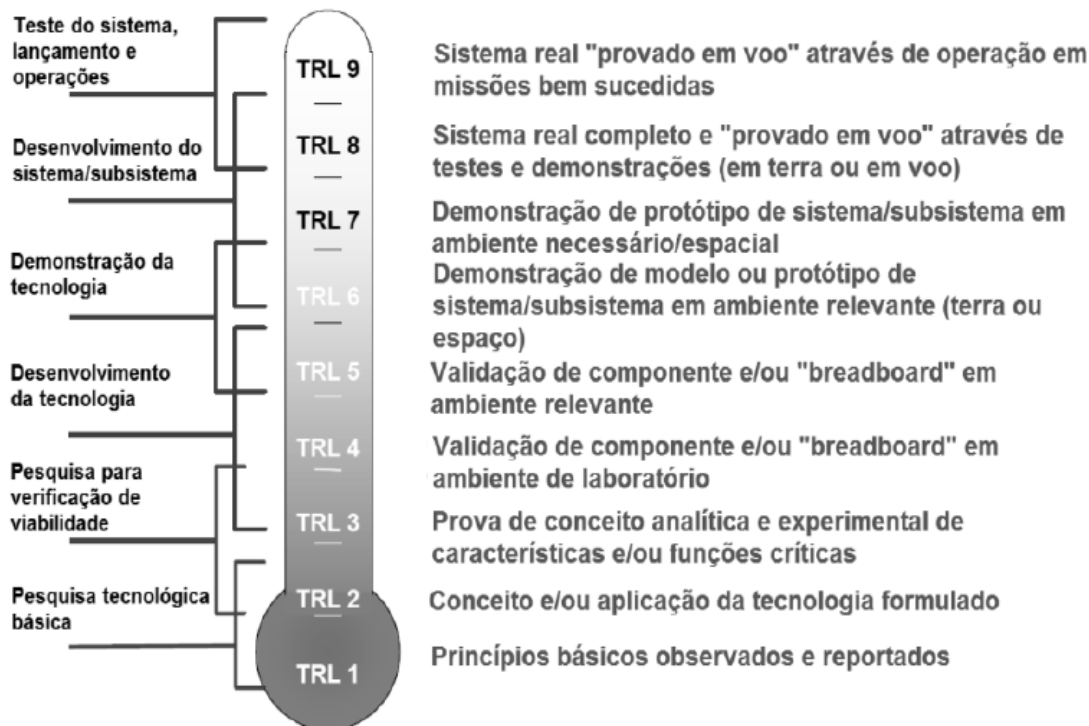
Maturidade Tecnológica

Technology Readiness Levels

Escala de Prontidão Tecnológica TRL

- Realmente criada pela NASA
- Necessita adaptação para as variadas áreas

Figura 1 – Escala de prontidão tecnológica



Fonte: Mankins (2009).

Vantagens:

- Comunicação da evolução da pesquisa
- Alinhamento para fins de implantação final da tecnologia

Adaptação para Pavimentos - Proposta

- **TRL 1:** estudos preliminares, pesquisa bibliométrica, revisão bibliográfica
- **TRL 2:** fundamentação da pesquisa ou caracterização de materiais
- **TRL 3:** Prova de conceito
- **TRL 4:** Estudos de laboratório => ampliação da prova de conceito
- **TRL 5:** Avaliação em ambiente relevante
- **TRL 6:** avaliação em ambiente operacional
- **TRL 7:** avaliação em variados ambientes operacionais (“prototipagem”)
- **TRL 8:** monitoramento de trechos experimentais => relatório ou artigo científico
- **TRL 9:** normatização => envolvimento do Estado
- **TRL 10:** produto no mercado



SUMÁRIO

- Introdução;
- Conceito de Pavimento Ferroviário
- Maturidade Tecnológica
- **Inovações Por Grupos**
- Inovações Desenvolvidas (2012 – 2025)
- Inovações em Desenvolvimento e Perspectivas
- Conclusões
- Agradecimentos



Inovações por Grupos – 3 Grupos

Critérios de Selecionamento
de Materiais

Ensaio de Laboratório – Para
Caracterização de Materiais

Modelagem Numérica – Para
Fins de Dimensionamento da
Estrutura



I. Critérios de Selecionamento de Materiais

- Utilização de materiais alternativos no sublastro: SAFL (TRL10) e Solos de Granulometria Transicional (TRL 4)
=> Utilização de solos de topo de taludes para sublastro ou reforço
- Tensões admissíveis para subleito



II. Ensaaios de Laboratório

- Ensaaios triaxiais de cargas repetidas em material de lastro incluindo o conceito de *shakedown* => aprimorar o TRL 4
- Dispositivo tipo *box test* para ensaios de lastro em escala real => atingir TRL 5



III. Modelagem Numérica – Para Fins de Dimensionamento

- Pavimento Ferroviário como um problema da mecânica dos pavimentos => **software SysTrain**, para cálculo das tensões, deformações e deslocamentos
- Pavimento Ferroviário como um problema da Mec Solos Não Saturados => **Software IVflown**, para determinação da umidade das camadas em função da água da chuva
- Procedimento para avaliação estrutural da plataforma existente

=> Todas TRL 10

SUMÁRIO

- Introdução;
- Conceito de Pavimento Ferroviário
- Maturidade Tecnológica
- Inovações Por Grupos
- **Inovações Desenvolvidas (2012 – 2025)**
- Inovações em Desenvolvimento e Perspectivas
- Conclusões
- Agradecimentos



I. Critérios de Selecionamento de Materiais

- Utilização de materiais alternativos no sublastro: SAFL e Solos de Granulometria Transicional
=> Utilização de solos de topo de taludes para sublastro ou reforço
- Tensões admissíveis para subleito

SUBLASTRO

- Para **Stopatto (1987)** algumas variações devem ser consideradas:
- LL da fração que passa pela peneira nº 40 deve ser menor que 25% e para solos lateríticos menor que 35%;
- IP da fração que passa na peneira nº 40 menor que 6%, e no caso de solos lateríticos menor que 10%;
- CBR mínimo de 20%;
- Expansão máxima de 0,5 %;
- A composição granulométrica do material de sublastro deve ser enquadrada nas faixas A, B, C ou D da AASTHO, conforme Tabela 1.

SUBLASTRO

Tabela 1: Faixas granulométricas para sublastro segundo a AASHTO. Stopatto (1987).

Peneiras	A	B	C	D
2"	100	100	x	x
1"	x	75 – 90	100	100
n° 4	25 – 55	20 – 60	35 – 65	50 – 85
n° 10	15 – 40	20 – 60	25 – 50	40 – 70
n° 40	8 – 20	15 – 30	15 – 30	25 – 45
n° 200	2 - 8	5 – 15	5 – 15	5 – 20

Observar que os solos arenosos finos lateríticos não atendem à especificação => pois 90 a 100% passante na peneira n° 10 (2 mm)

4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA MCT



Estrada de Ferro Carajás (EFC)

Laterita

Solo Fino Laterítico

Solo Fino Laterítico



04.02.2014 14:40

SOLOS FINOS LATERÍTICOS

16/09/2010 14:56

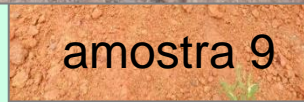
MATERIAIS E MÉTODOS



amostra 30



amostra 33



amostra 9



amostra 31



amostra 34

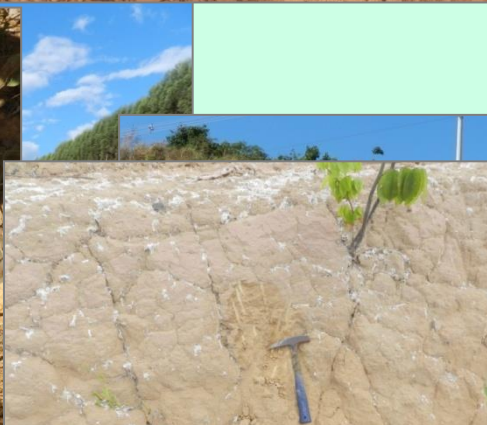
amostra 19



amostra 37



amostra 38



amostra 40



amostra 49

amostra 14/15

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

CLASSIFICAÇÃO MCT TRADICIONAL

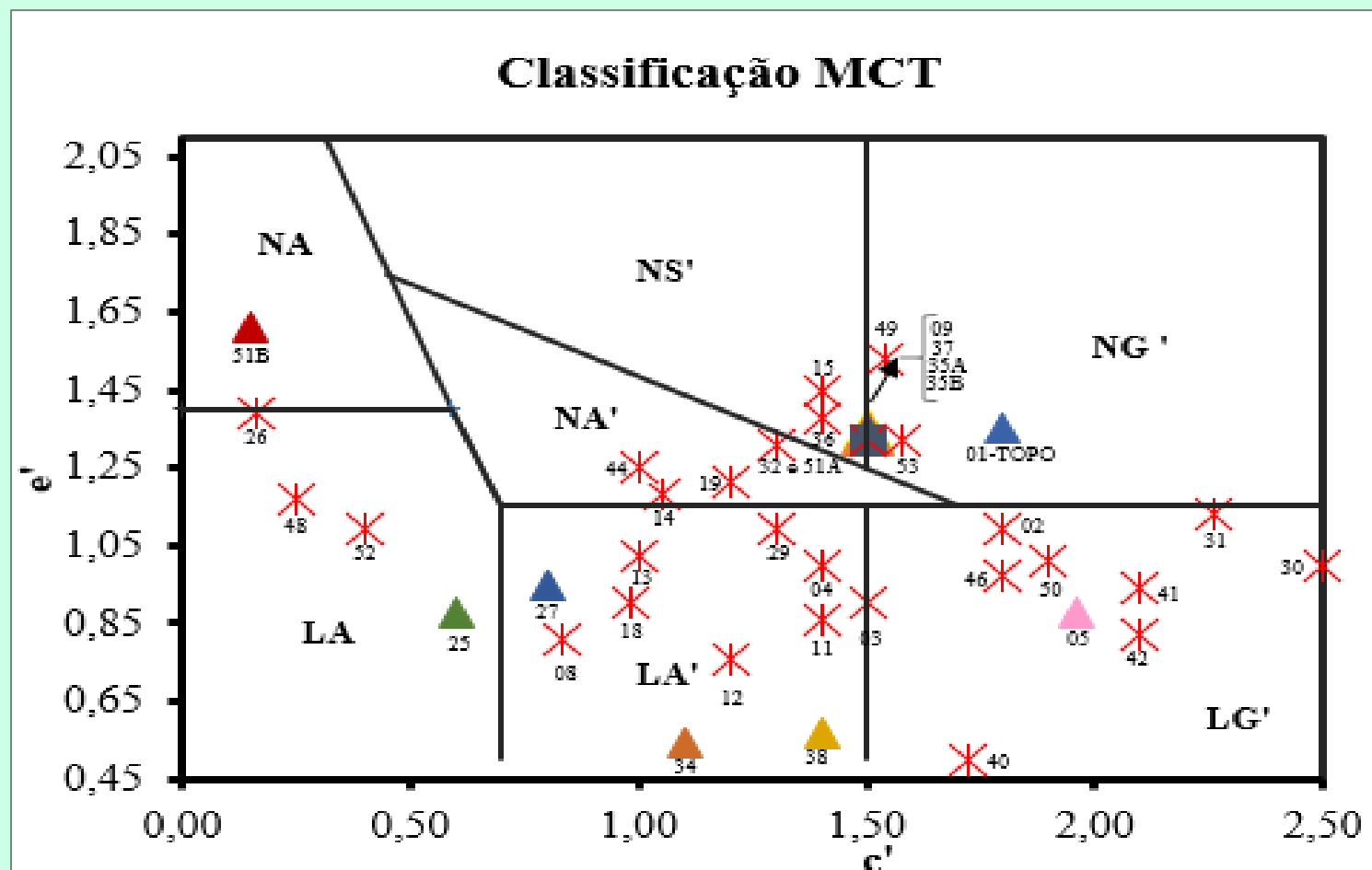


FIG. 4.10 Classificação MCT Tradicional dos solos estudados.

RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS

□ MÓDULO RESILIENTE

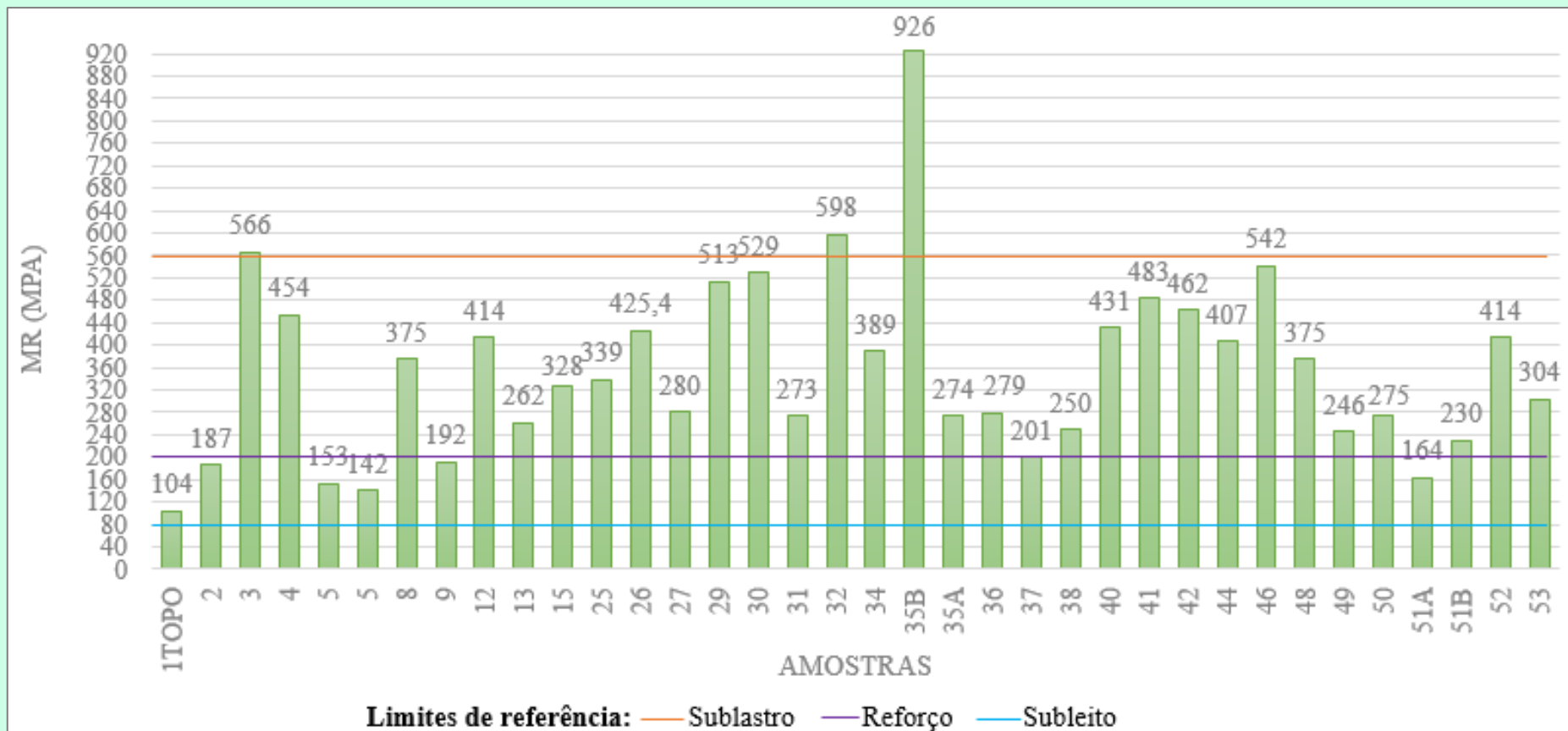


FIG. 4.12 Gráfico do MR das amostras estudadas com indicação de limites de referência para sublastro, reforço e subleito.



INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Trecho Experimental em Açailândia/MA



Plataforma acabada



Frasco de areia



Trincas de retração

Technical Paper

Contribution to the use of alternative material in heavy haul railway sub-ballast layer

Antonio Carlos Rodrigues Guimarães ^a ✉, José Carlos Silva Filho ^b 👤 ✉, Carmen Dias Castro ^b



Umectação



Plataforma selada

Trecho experimental em Açailândia/MA – SOLO LA' AMOSTRA 34 PROJETO IME/VALE - Após 3 Anos

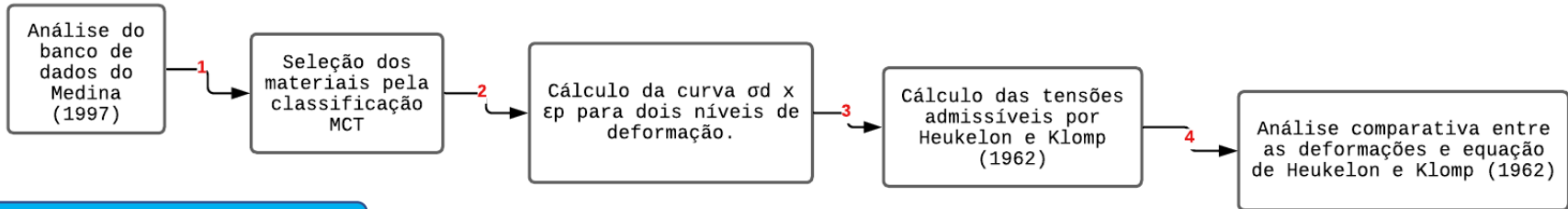


- SEM BOMBEAMENTO DE FINOS
- SEM CRAVAÇÃO DO LASTRO DO SUBLASTRO

Tensões Admissíveis no Topo do Subleito



MÉTODOS



CRITÉRIOS

Número de Ciclos

100.000

Guimarães (2009)

$$\epsilon = \varphi_1 \sigma_3^{\varphi_2} \sigma_d^{\varphi_3} N^{\varphi_4}$$

Heukelon e Klomp (1962)

$$\sigma_{v,máx} = \frac{0,006MR}{1 + 0,7\log(N)}$$

σ_d	0,4	0,8	1,2	0,7	1,4	2,1	1,2	2,4	3,6
σ_3	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,7	1,2	1,2	1,2

Tensão limite

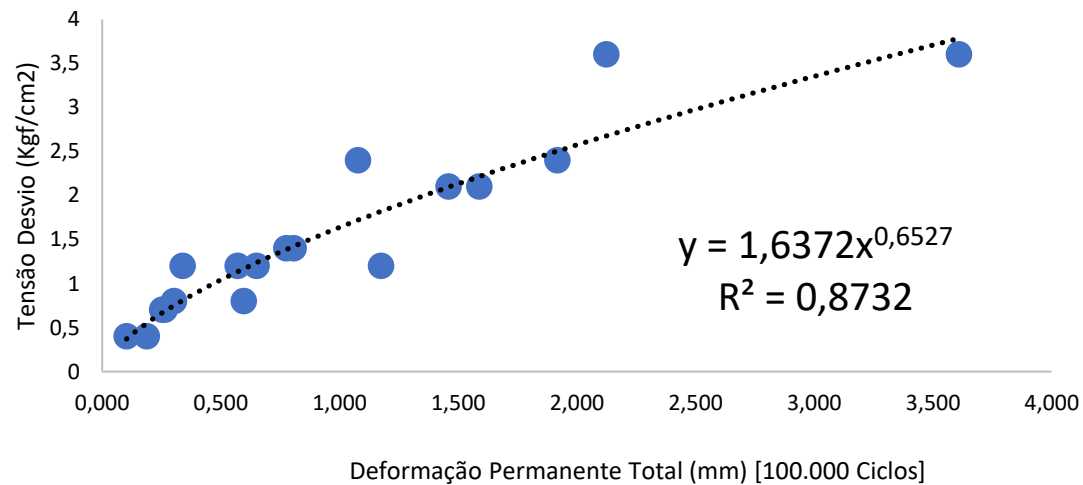
Adm 2mm

Adm 5mm

RESULTADO - LA



CONJUNTO DE SOLOS - LA



Nova Equação – Folly (2025)

Guimarães (2009)		Heukelon e Klomp (1962)
Adm (mm) 2,00	$\varepsilon = \varphi_1 \sigma_3^{\varphi_2} \sigma_d^{\varphi_3} N^{\varphi_4}$	$\sigma_{v,m\acute{a}x} = \frac{0,006MR}{1 + 0,7\log(N)}$
Adm (mm) 5,00	$y = k_1 \times x^{k_2} \longrightarrow \boxed{\frac{\sigma_d}{\rho_0} = k_1 \times \varepsilon_p^{k_2}}$	

Qtdd.	Id.	MCT	Origem	Camada	Energia	Hót (%)	MR médio	K1	K2	Adm 2mm	Adm 5mm	Heukelon e Klomp (kgf/cm²)	Média			Desvio Padrão			Conjunto de solo		
							(MPa)						Adm 2mm	Adm 5mm	Heukelon e Klomp (kgf/cm²)	Adm 2mm	Adm 5mm	Heukelon e Klomp (kgf/cm²)	K1	K2	R²
1	LA-01	LA	MA	Subleito	Modif.	8,4	344	1,656	0,7141	2,717	5,226	4,587	2,610	4,815	4,280	0,307	0,411	0,307	1,637	0,653	0,873
2	LA-02		RJ	Subleito	Normal	10,2	298	1,6321	0,6167	2,503	4,404	3,973									
3	LA'-01	LA'	RS	Subleito	Intern.	11,8	382	1,7979	0,743	3,009	5,944	5,093	2,862	5,608	5,353	0,147	0,336	0,260	1,716	0,731	0,966
4	LA'-03		RS	Subleito	Intern.	10,0	421	1,6438	0,7241	2,715	5,272	5,613									
5	LG'-03	LG'	RJ	Subleito	Intern.	21,3	351	1,3258	0,6476	2,077	3,760	4,680	1,611	3,210	4,431	0,311	0,367	0,732	1,001	0,642	0,842
6	LG'-04		RS	Subbase	Intern.	22,5	250	0,8875	0,7333	1,475	2,889	3,333									
7	LG'-06	NA	GO	Reforço	Intern.	11,0	396	0,6762	0,9216	1,281	2,980	5,280	2,111	3,433	3,827	0,361	0,858	0,187	1,425	0,480	0,784
8	NA-01		MS	Subleito	Normal	10,0	273	1,3064	0,4217	1,750	2,575	3,640									
9	NA-02	NA	MG	Subleito	Normal	8,9	301	1,6282	0,6021	2,471	4,291	4,013	2,581	5,380	3,613	0,234	0,545	0,387	1,476	0,751	0,954
10	NA'-01		MG	Subleito	Normal	16,3	281	1,5314	0,6707	2,438	4,507	3,747									
11	NA'-02	NA'	RJ	Subleito	Normal	11,2	243	1,205	0,9042	2,255	5,164	3,240	1,739	3,267	3,267	0,073	0,343	0,739	1,118	0,609	0,947
12	NA'-03		RS	Subbase	Intern.	9,8	319	1,5539	0,8526	2,806	6,129	4,253									
13	NA'-06	NG'	RJ	Subbase	Intern.	4,8	241	1,6556	0,7704	2,824	5,721	3,213	1,378	2,968	2,113	0,097	0,012	0,473	0,784	0,817	0,944
14	NG'-03		RS	Subleito	Normal	27,0	267	1,3309	0,5026	1,886	2,988	3,560									
15	NG'-06	NG'	RJ	Subleito	Normal	17,6	236	1,1313	0,5375	1,642	2,687	3,147	1,739	3,267	3,267	0,073	0,343	0,739	1,118	0,609	0,947
16	NG'-07		GO	Subleito	Normal	17,0	289	1,0261	0,722	1,693	3,280	3,853									
17	NG'-08	NG'	GO	Reforço	Normal	21,5	146	0,9962	0,8334	1,775	3,810	1,947	1,739	3,267	3,267	0,073	0,343	0,739	1,118	0,609	0,947
18	NG'-09		RJ	Subleito	Intern.	23,6	151	0,9702	0,8096	1,700	3,571	2,013									
19	NS'-03	NS'	RJ	Subleito	Normal	17,5	194	0,8708	0,7595	1,474	2,957	2,587	1,378	2,968	2,113	0,097	0,012	0,473	0,784	0,817	0,944
20	NS'-04		GO	Subleito	Normal	16,0	123	0,6762	0,9216	1,281	2,980	1,640									



II. Ensaaios de Laboratório

- Ensaaios triaxiais de cargas repetidas em material de lastro incluindo o conceito de shakedown
- Dispositivo tipo *box test* para ensaios de lastro em escala real



ENSAIOS TRIAXIAIS DE CARGAS REPETIDAS

- Ensaios Triaxiais de Cargas Repetidas para Lastro – Jenifer Cescon (2021), Bruno Gomes e William Wilson

METODOLOGIA

❑ Ensaios Triaxiais de cargas cíclicas

- Subleito e sublastro foram ensaiados em corpos de prova 10x20cm
- Lastro em corpos de prova 15x30cm

Tabela 1: Ensaios triaxiais

Camada	CP	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_1 (kPa)	Razão de Tensões (σ_1/σ_3)
Lastro	CP1	35	70	105	3
	CP2	75	150	225	3
	CP3	150	300	450	3
	CP4	200	400	600	3
	CP5	50	200	250	5
	CP6	100	300	400	4
	CP7	133	400	533	4
	CP8	37	150	187	5
	CP9	75	300	375	5
	CP10	100	400	500	5
	CP11	75	375	450	6
	CP12	62	313	375	6
Sublastro	CP1	30	150	180	6
	CP2	50	200	250	5
	CP3	150	300	450	3
	CP4	121	240	361	3
	CP5	70	350	420	6
	CP6	100	500	600	6
	CP7	180	470	650	3,6
	CP8	100	450	550	5,5
	CP9	80	360	440	5,5
	CP10	180	360	540	3
	CP11	80	160	240	3
Subleito	CP1	100	500	600	6
	CP2	70	210	280	4
	CP3	100	450	550	5,5
	CP4	30	150	180	6
	CP5	50	200	250	5
	CP6	70	350	420	6

RESULTADOS

DP LASTRO

- A tendência geral observada é que a deformação permanente se estabiliza após um certo número de ciclos, indicando a ocorrência do fenômeno de shakedown para a maioria dos corpos de prova (CPs), exceto os CPs 7, 10 e 11. A estabilização da deformação permanente em níveis variados sugere que, embora o material seja o mesmo, a resposta a diferentes níveis de tensão resulta em comportamentos de acomodamento distintos.

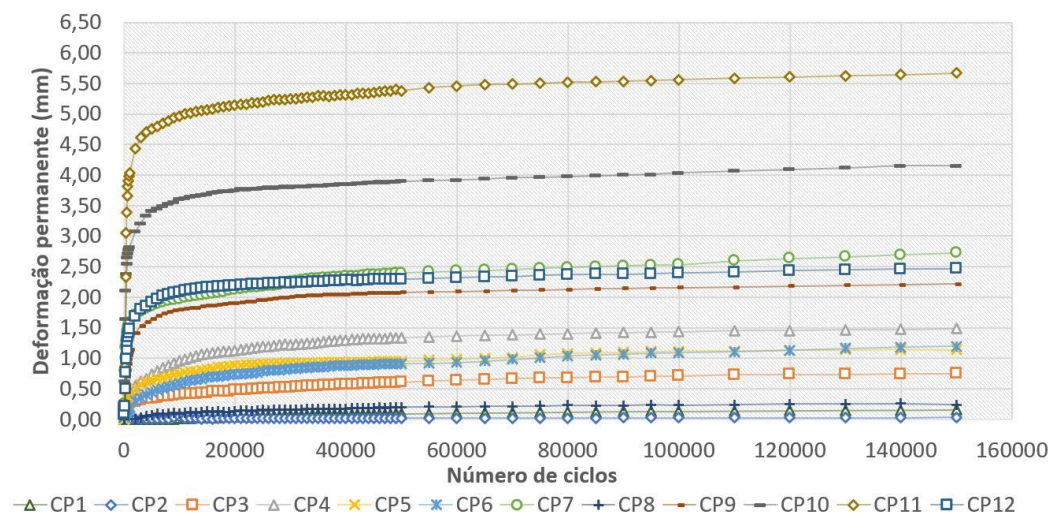


Figura 30: Gráfico de Deformação permanente - Lastro

RESULTADOS

❑ Análise de Shakedown - LASTRO

- Ao analisar a ocorrência de shakedown conforme Werkmeister, Dawson e Wellner (2001) e Guimarães (2009), observa-se que a maioria dos corpos de prova exibe um comportamento de shakedown. Os CPs 1 a 6 e 8 se enquadram no regime de comportamento A, com a taxa de deformação adicional tendendo a valores muito baixos, da ordem de 10^{-7} , após um certo número de ciclos de carga. Isso indica uma estabilização da deformação permanente, característica de um comportamento de acomodamento plástico.
- Para os CPs 9 e 12, o comportamento observado é do tipo AB. Nos primeiros ciclos de carregamento, o corpo de prova exibe um comportamento do tipo B, caracterizado por um escoamento plástico bem definido. Contudo, à medida que os ciclos aumentam, a taxa de deformação adicional tende a se estabilizar, e o comportamento se torna do tipo A, com uma diminuição significativa na taxa de deformação.

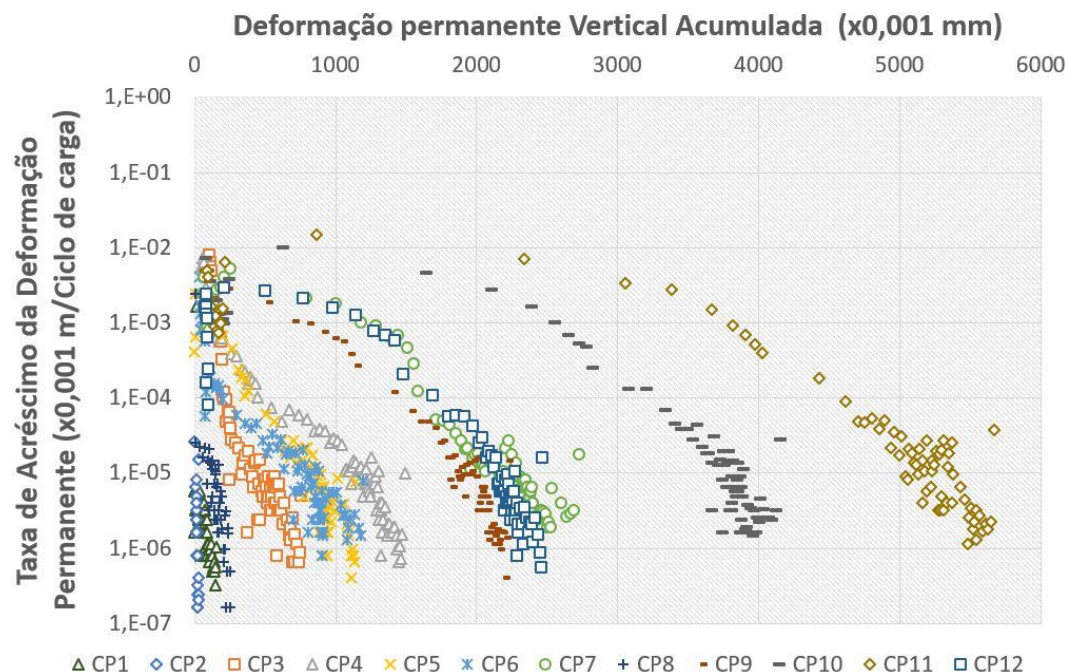


Figura 31: Pesquisa de ocorrência de shakedown no modelo de Dawson e Wellner (DAW-SON; WELLNER, 1999)

RESULTADOS

☐ Análise de limite de Shakedown - LASTRO

- Nota-se que à medida que a razão de tensões aumenta, a tensão máxima suportada pelo material antes do escoamento diminui. A linha do limite de shakedown separa claramente as regiões de comportamento estável e instável, demonstrando que, para razões de tensões mais elevadas, o material é mais suscetível ao escoamento, a menos que as tensões aplicadas sejam significativamente reduzidas.

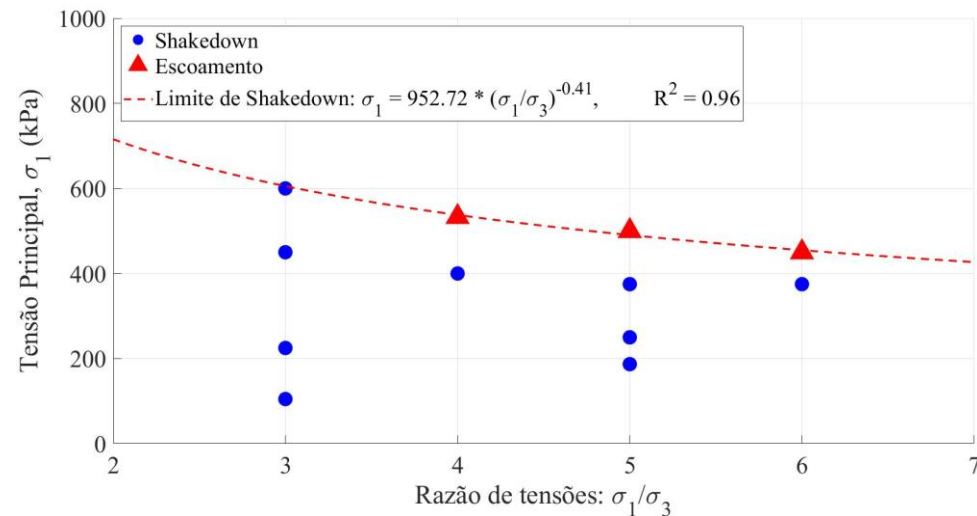


Figura 33: Limite de shakedown

capillary, simulating conditions with moisture levels above the ideal.

4.

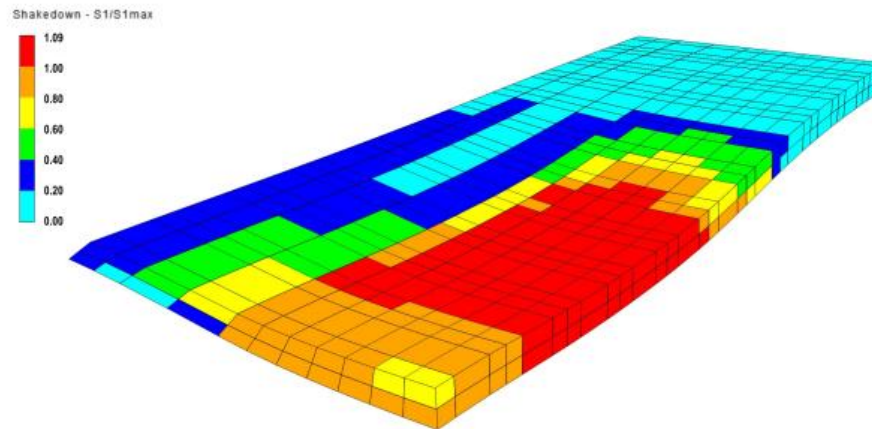


Figure 14. Shakedown verification in the Subballast layer -Scenario 1 (optimum moisture content)

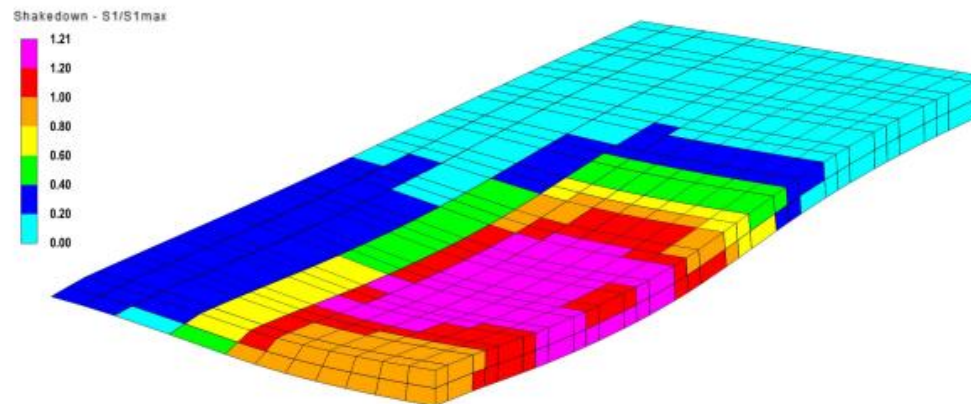


Figure 15. Shakedown verification in the Subballast layer -Scenario 2 (above optimum moisture content)

APARATO PARA ENSAIO DE LASTRO



Figura 2 – Pórtico de reação e atuador servo-controlado.

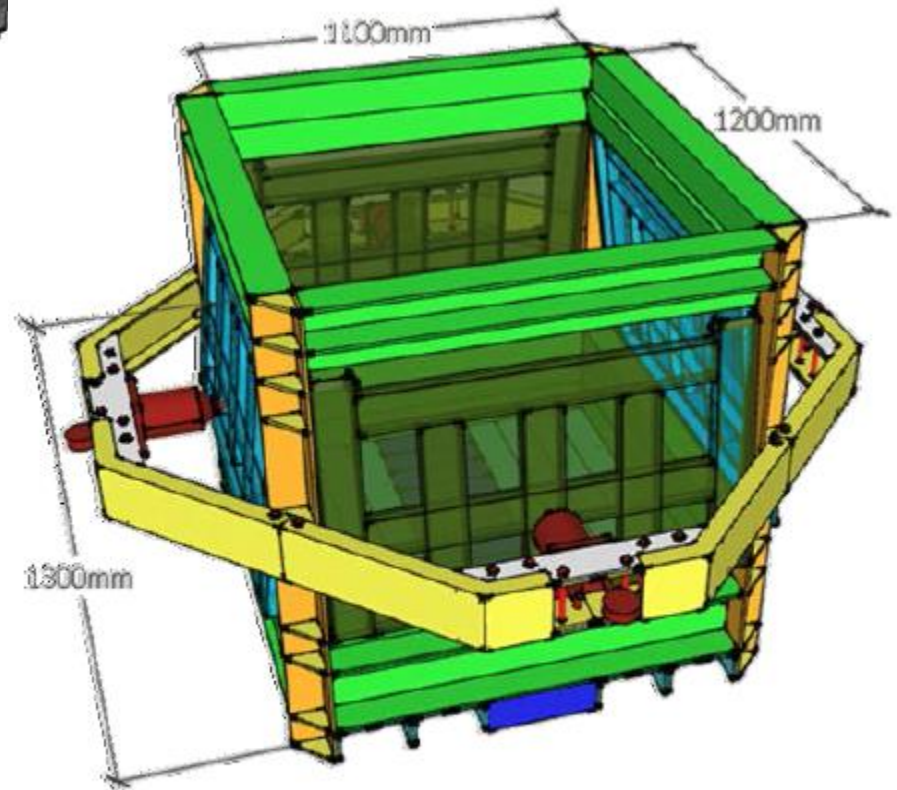


Figura 1 - Equipamento simulador de trafego e carga.

METODOLOGIA

❑ Compactação da camada de sublastro

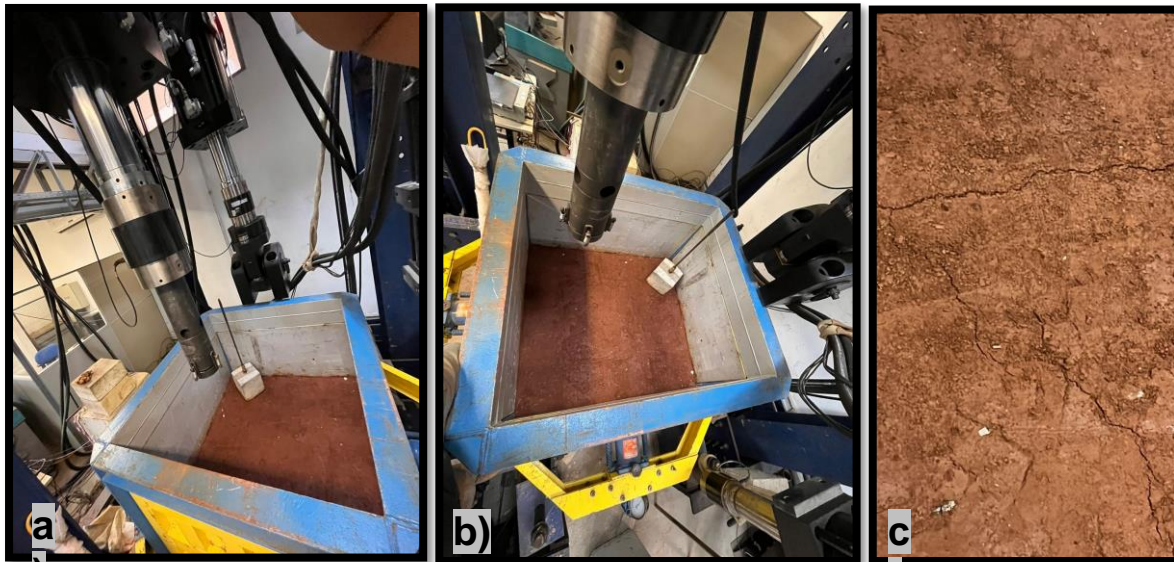


Figura 13: Preparação do sublastro na Box Test: (a) e (b) Camada compactada
(c) Detalhe da camada após compactação

METODOLOGIA

❑ Aplicação da camada de Lastro



Figura 17: Detalhe de parte da camada de Lastro Instalada



Figura 18: Estrutura instalada na Box Test

Resultados Esperados

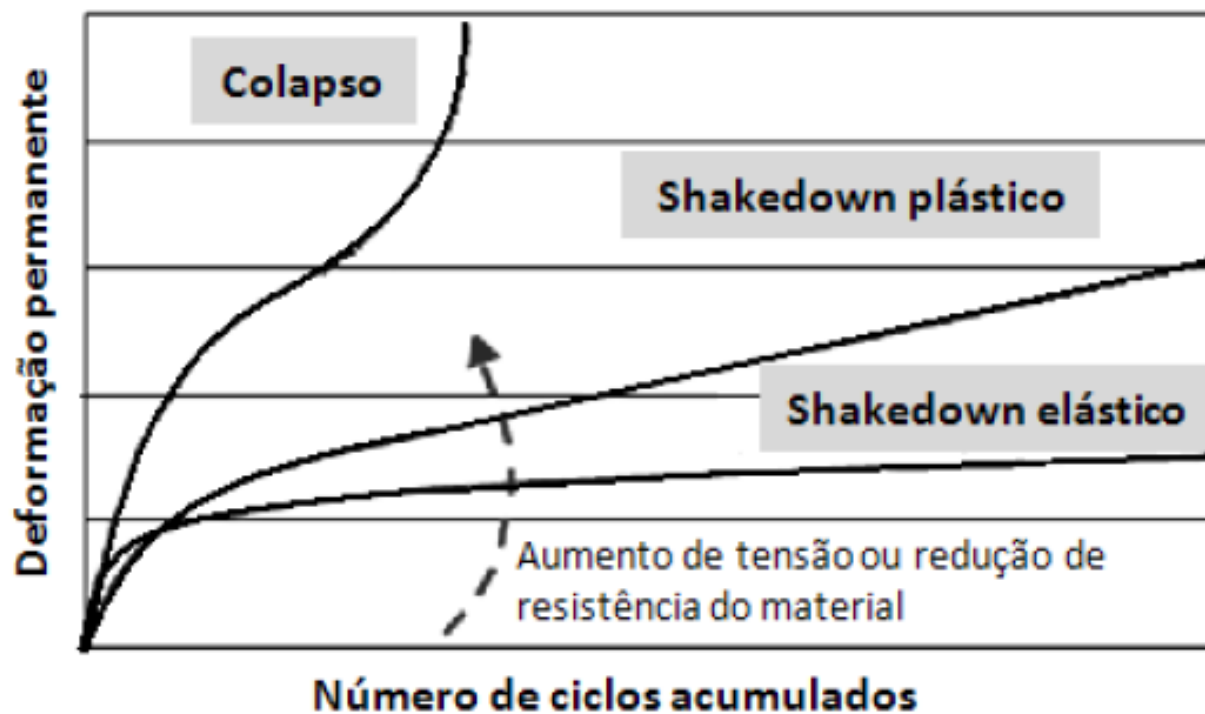
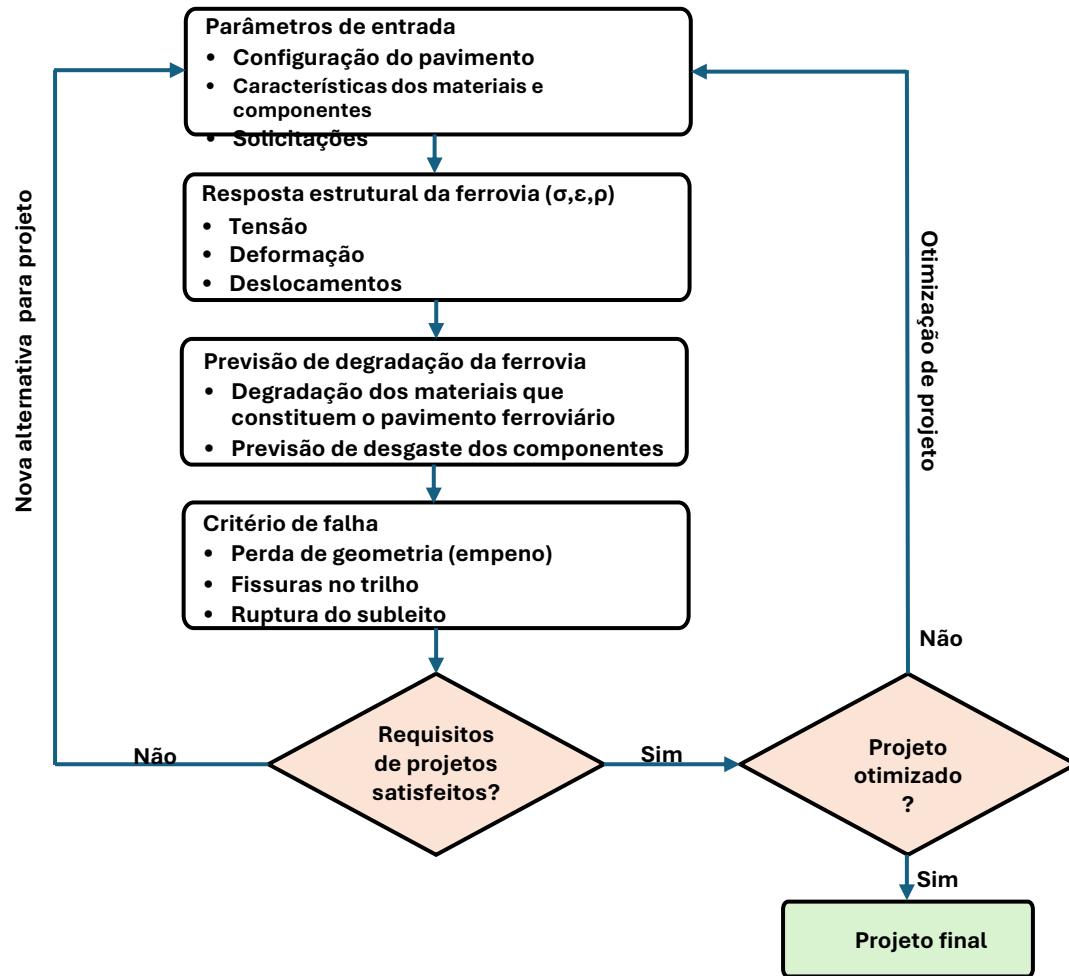


Figura 8 - Deformação permanente em função de ciclos acumulados para diferentes comportamentos de materiais granulares (ARNOLD, 2004)



III. Modelagem Numérica – Para Fins de Dimensionamento

- Pavimento Ferroviário como um problema da mecânica dos pavimentos => **software SysTrain**, para cálculo das tensões, deformações e deslocamentos
- Pavimento Ferroviário como um problema da Mec Solos Não Saturados => **Software IVflow**n, para determinação da umidade das camadas em função da água da chuva
- Metodologia para avaliação estrutural da plataforma ferroviária



Proposed framework for application of mechanistic-empirical (M-E) design to railroad track infrastructure and its components - Edwards (2021)

O grupo de pesquisa da University of Illinois liderada por Erol Tutumluer esboçaram uma estrutura conceitual para análise e elaboração de projetos de pavimento ferroviário pelo método mecanístico-empírico (M-E) similar ao método Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) já implantado nos EUA para projetos de pavimentos rodoviários.

No Brasil não existe um método mecanístico-empírico para o dimensionamento de pavimento ferroviário, porém a INFRA S.A. por meio da norma PRO-0002 indica a possibilidade dos projetos serem dimensionados a partir dessa abordagem.



Em projetos dimensionados por **análise mecanicista**, deve ser realizado no mínimo um ensaio de deformação permanente por segmento homogêneo. Os segmentos homogêneos devem ser definidos através do coeficiente de variação máximo de 20% ($CV = \sigma/X$) considerando a média obtida nos 18 pares de tensão em cada ensaio de módulo de resiliência.

Quando a classificação MCT for utilizada, o solo identificado deve ser de comportamento laterítico (LA, LA' e LG').

Ao realizar o dimensionamento por **análise mecanicista**, o projetista deve avaliar os resultados obtidos nos ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente, bem como a sensibilidade dos mesmos em relação à variação de umidade, devendo informar essa situação em projeto.



No IME, a avaliação mecanística-empírica que vem sendo realizada e aprimorada para dimensionamento de pavimentos pode ser observada no fluxograma a seguir.

1 - Geometria **PARÂMETROS DE ENTRADA**

2 - Parâmetros das camadas de lastro e solo (MR e v)

3 - Parâmetros dos dormentes, trilhos e grampos (W, E, v, kt, kc e kh)

2 - Parâmetros das camadas de solo (modelos hidráulicos)

3 - Condições e contorno (precipitação, evaporação e nível d'água)

SYSTRAIN

IVFLOW

PARÂMETROS ESTRUTURAL DA VIA

Tensão, σ
Deformação, ϵ
Deslocamento, ρ

Infiltração de água no pavimento

CRITÉRIOS DE PROJETO/NORMA

σ adm.
 ϵ adm.
 ρ adm.

Umidade volumétrica admissível das camadas m^3/m^3

Não

PROJETO OTIMIZAD

Sim

PROJETO FINAL

Shaked own

MCT

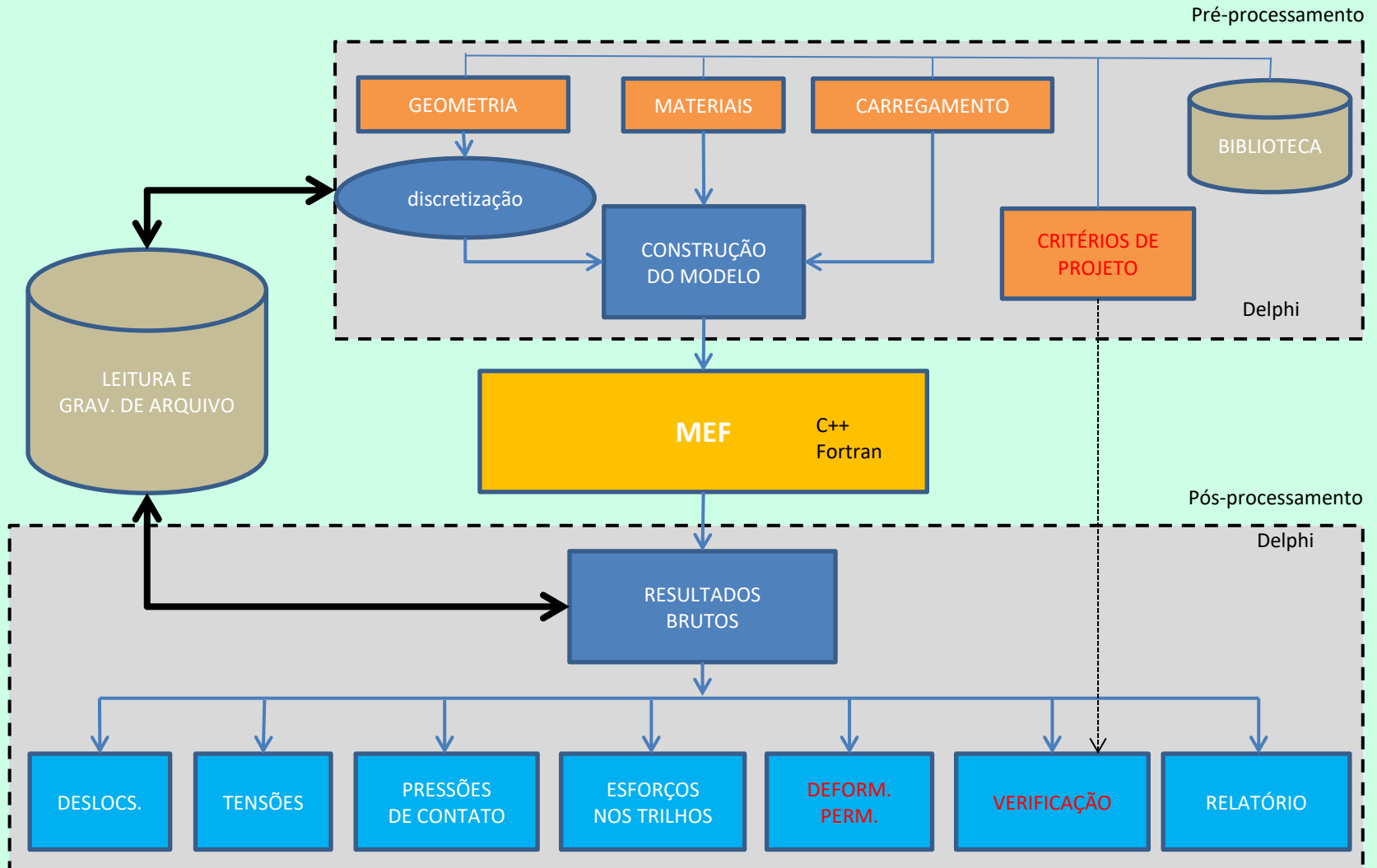
Deformação permanente acumulada

MR

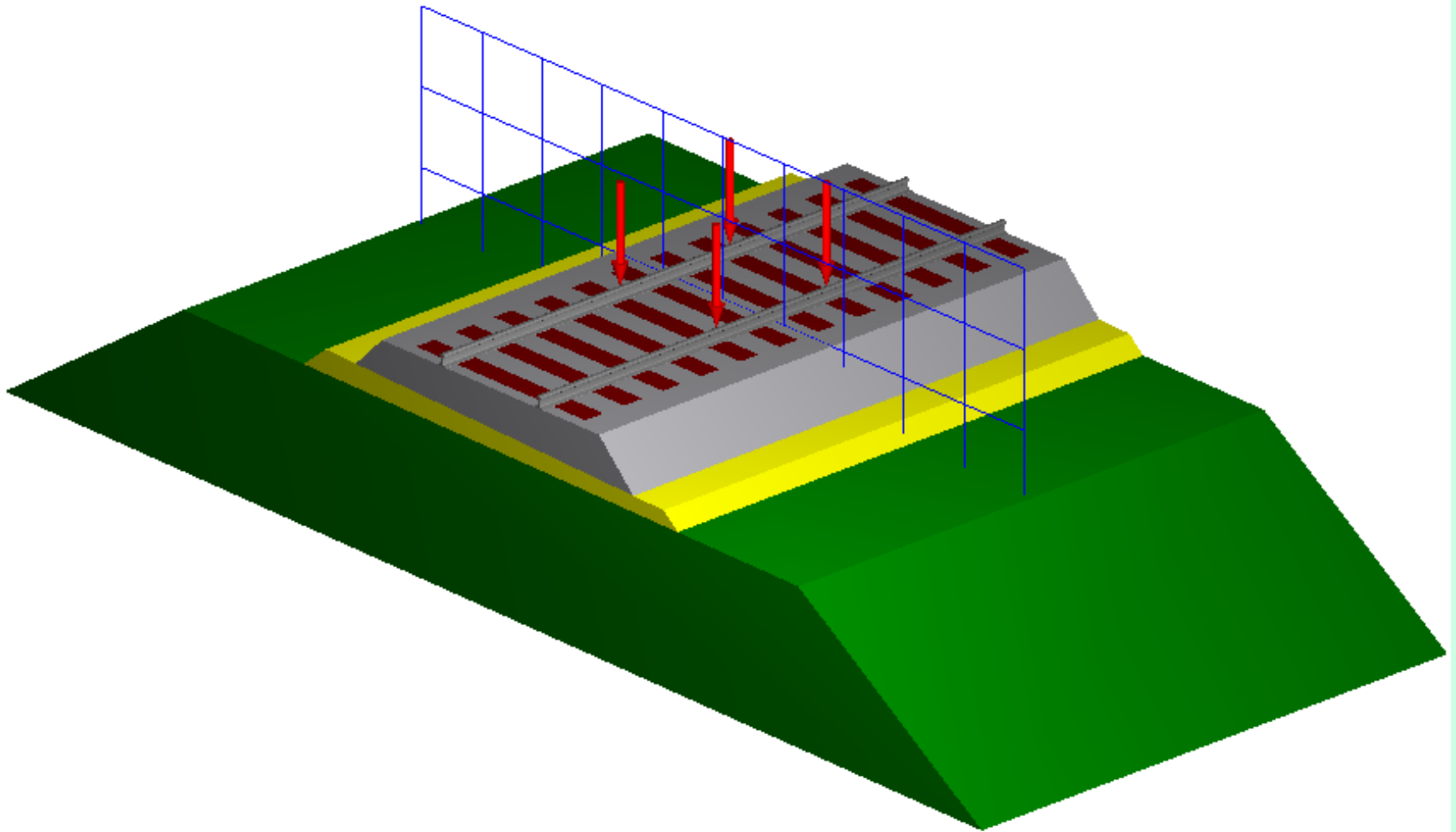
Expansão

SELECIONAMENTO DE MATERIAIS

Estrutura do programa

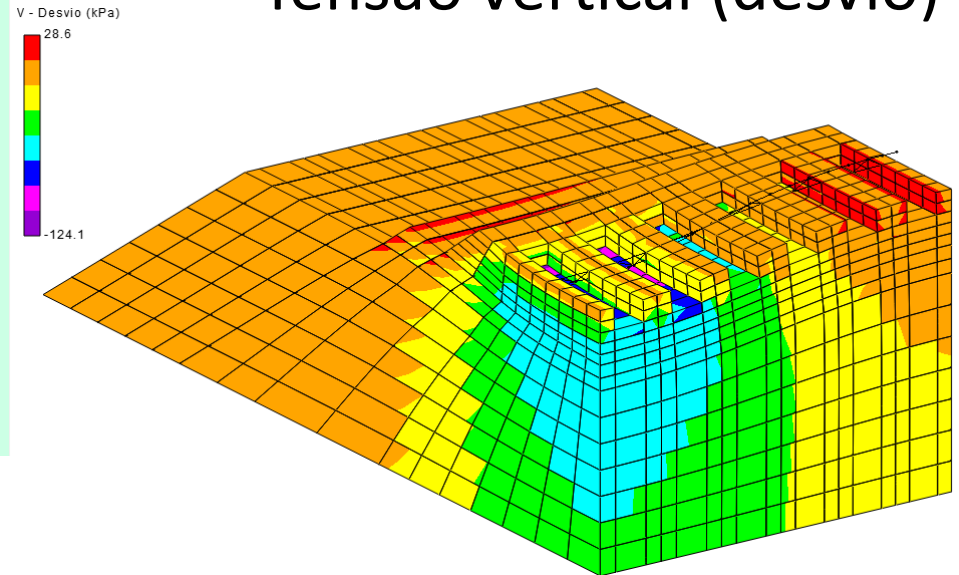


Verificação visual da geometria

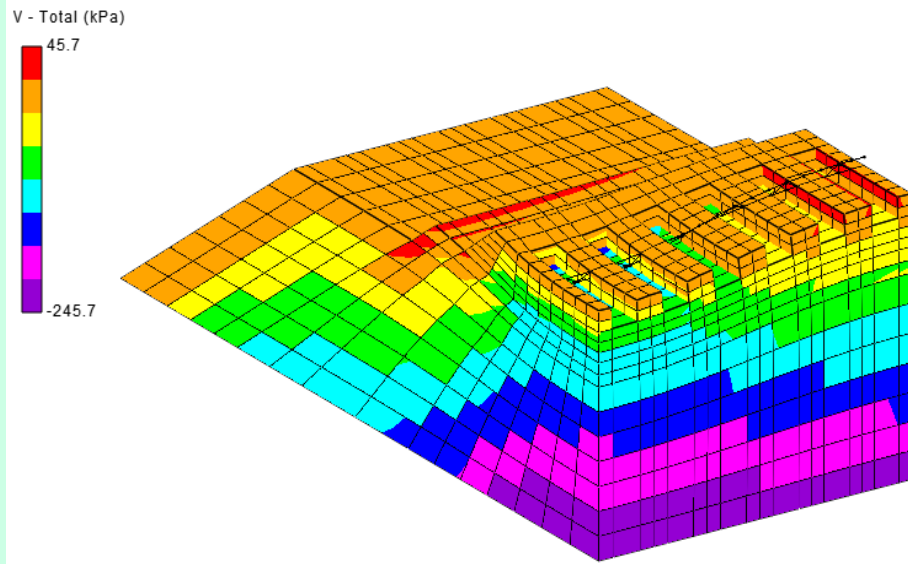


Resultados

- Tensão vertical (desvio)



- Tensão vertical (total)





SOFTWARE IVFLOW

- Permite a determinação da umidade das camadas do pavimento ferroviário, para variadas condições de chuva.
- **Meta** => selecionar solos para a plataforma considerando seu comportamento hidráulico, de forma a criar barreira capilar para a infiltração da água, aumentando a vida útil do pavimento.

IVFlow - Sequência de modelagem

Pré-processamento

Geometria
(tipo de
seção e
dimensões)



Parâmetros das
camadas de solo



Condições e contorno:

- duração e intensidade da chuva
- nível d'água no solo,
- evaporação da superfície,
- Contaminantes* (na próxima versão)



Geração da
malha
(automática
ou manual)

Processamento



Simulação:

Dependerá do tamanho do
domínio modelado e do
tempo físico simulado
(horas, dias ou meses)

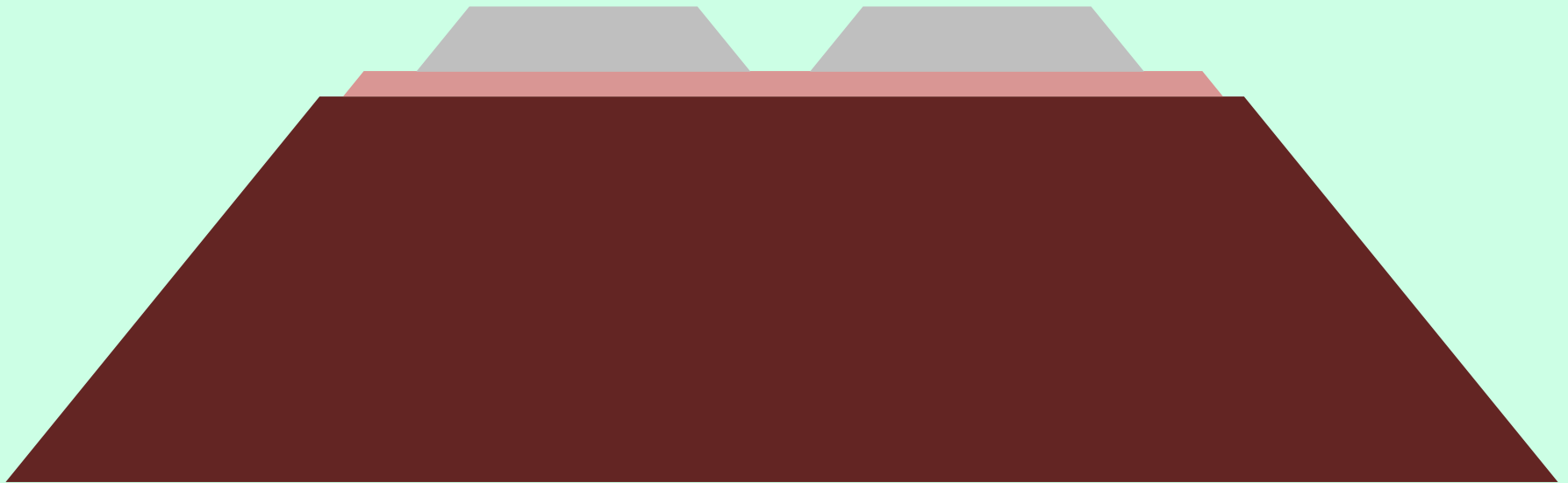
Pós-processamento



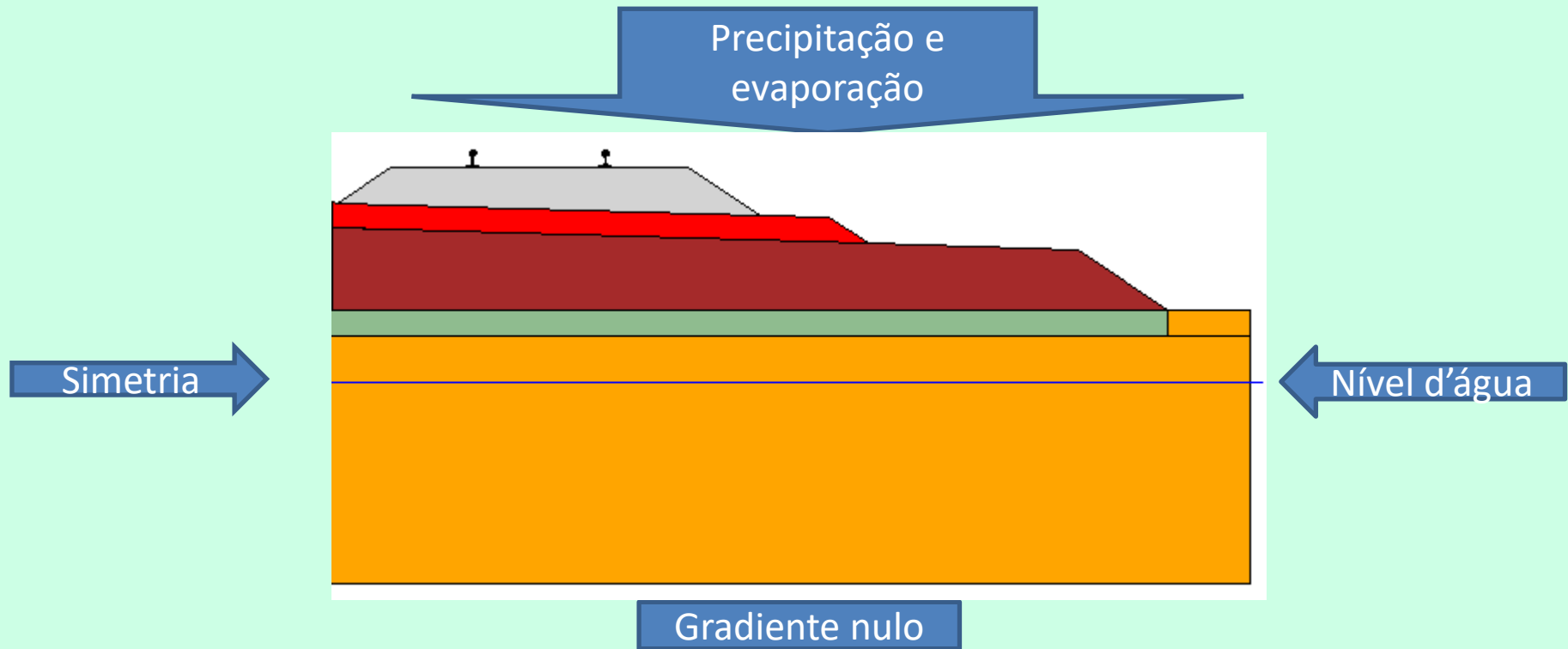
Análise de resultados:

Gráficos, tabelas e números.

IVFlow - Seção dupla de aterro



IVFlow - Condições de contorno



Condições de contorno:

dados de precipitação e evaporação ao longo do dia;
simetria (fluxo nulo);
nível d'água definido na lateral; e
gradiente de potencial nulo de potencial no fundo.

IVFlow - Sequência de modelagem

Pré-processamento

Geometria
(tipo de
seção e
dimensões)



Parâmetros das
camadas de solo



Condições e contorno:

- duração e intensidade da chuva
- nível d'água no solo,
- evaporação da superfície,
- Contaminantes* (na próxima versão)



Geração da
malha
(automática
ou manual)

Processamento



Simulação:

Dependerá do tamanho do
domínio modelado e do
tempo físico simulado
(horas, dias ou meses)

Pós-processamento



Análise de resultados:

Gráficos, tabelas e números.

IVFlow - Equação de Richard

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right) = C(h) \frac{\partial h}{\partial t}$$

onde

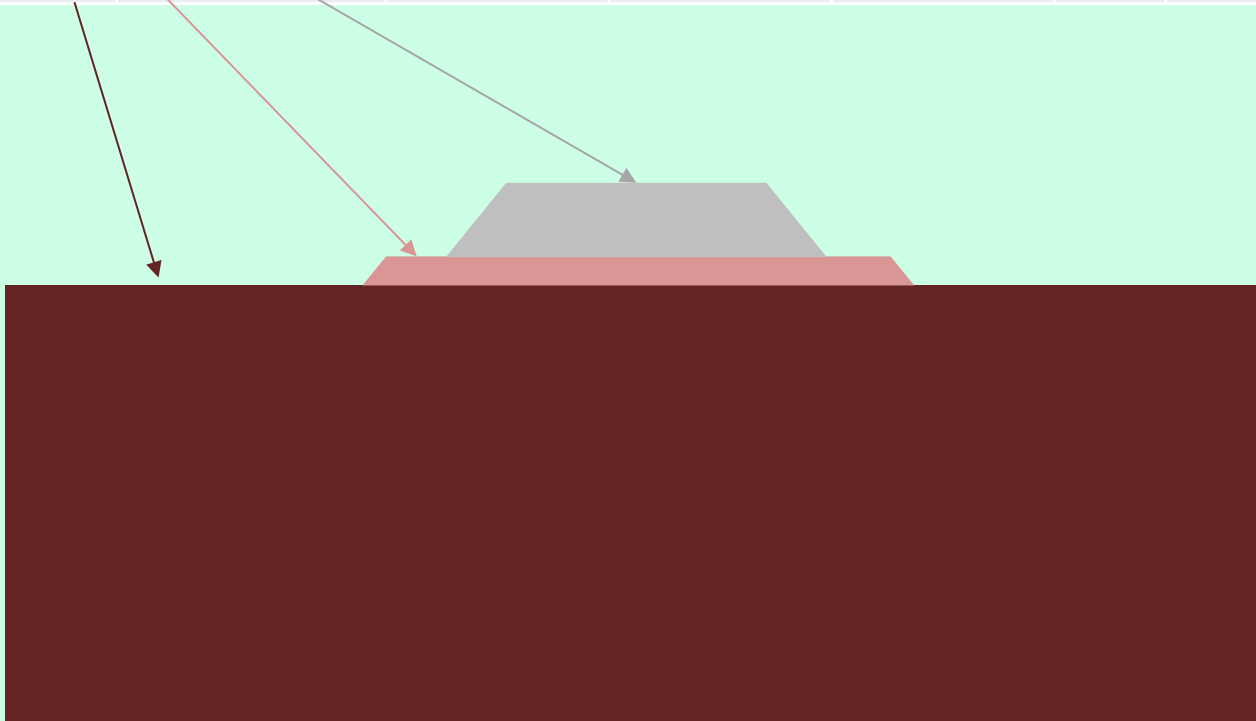
– h é a pressão

– $C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h}$ é a capacidade de umidade

IVFlow - Exemplo em pavimento

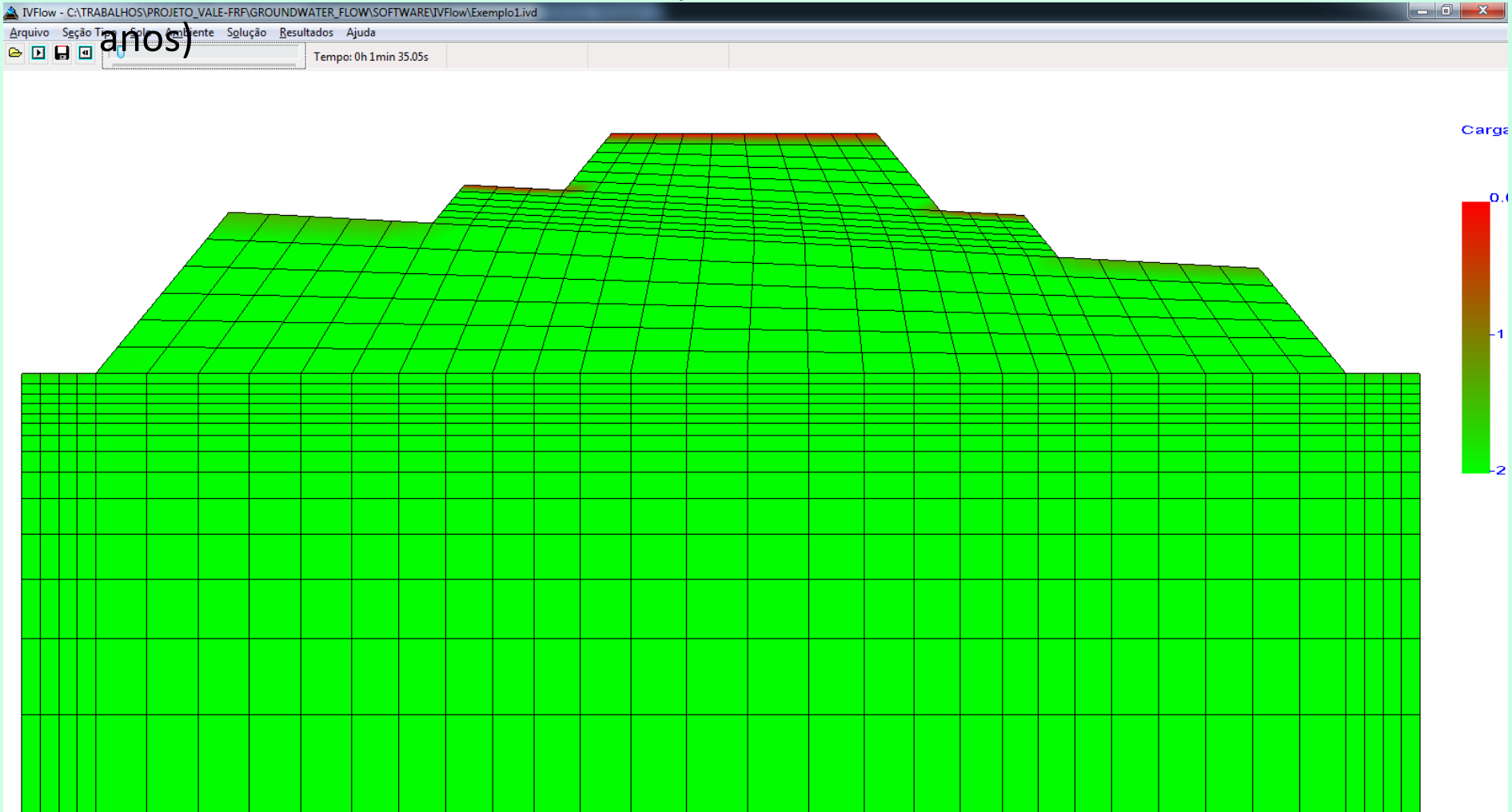
- Parâmetros de van Genuchten:

Camada	Porosidade	h_{sat}	K_{sat}	Alfa	l	n	h_{res}
Lastro	2,68	0,43	1000	0,145	0,5	2.68	0,045
Sublastro	1,3	0,4	2,33	0,024	0,5	1.30	0,0746
Subleito	1,3	0,4	50	0,024	0,5	3.80	0,0746



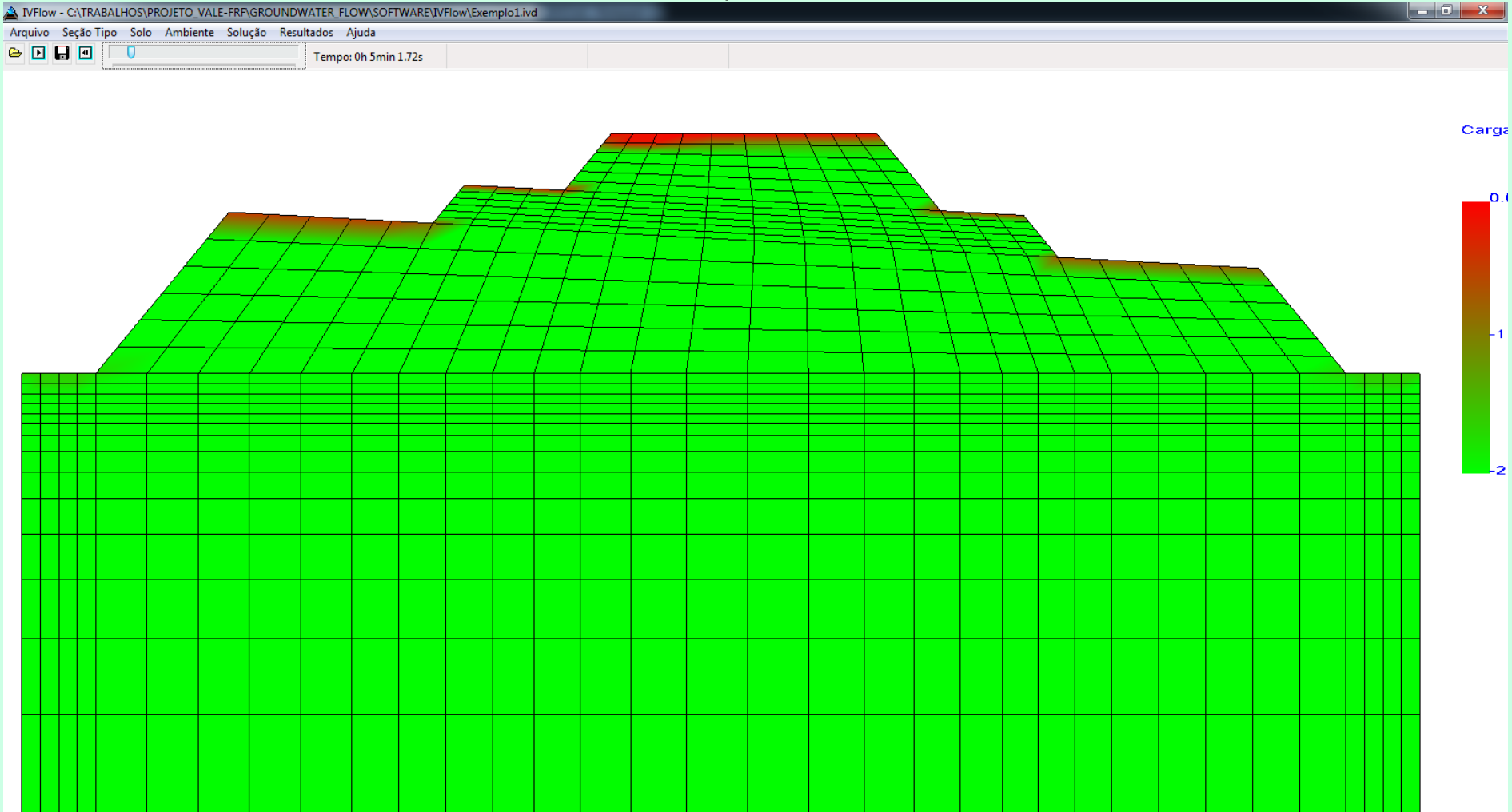
IVFlow - Exemplo em pavimento

- **01 minuto de chuva** (Otto Pfafstetter – Belém-PA, $t = 1$ hora, $Tr = 30$ anos)



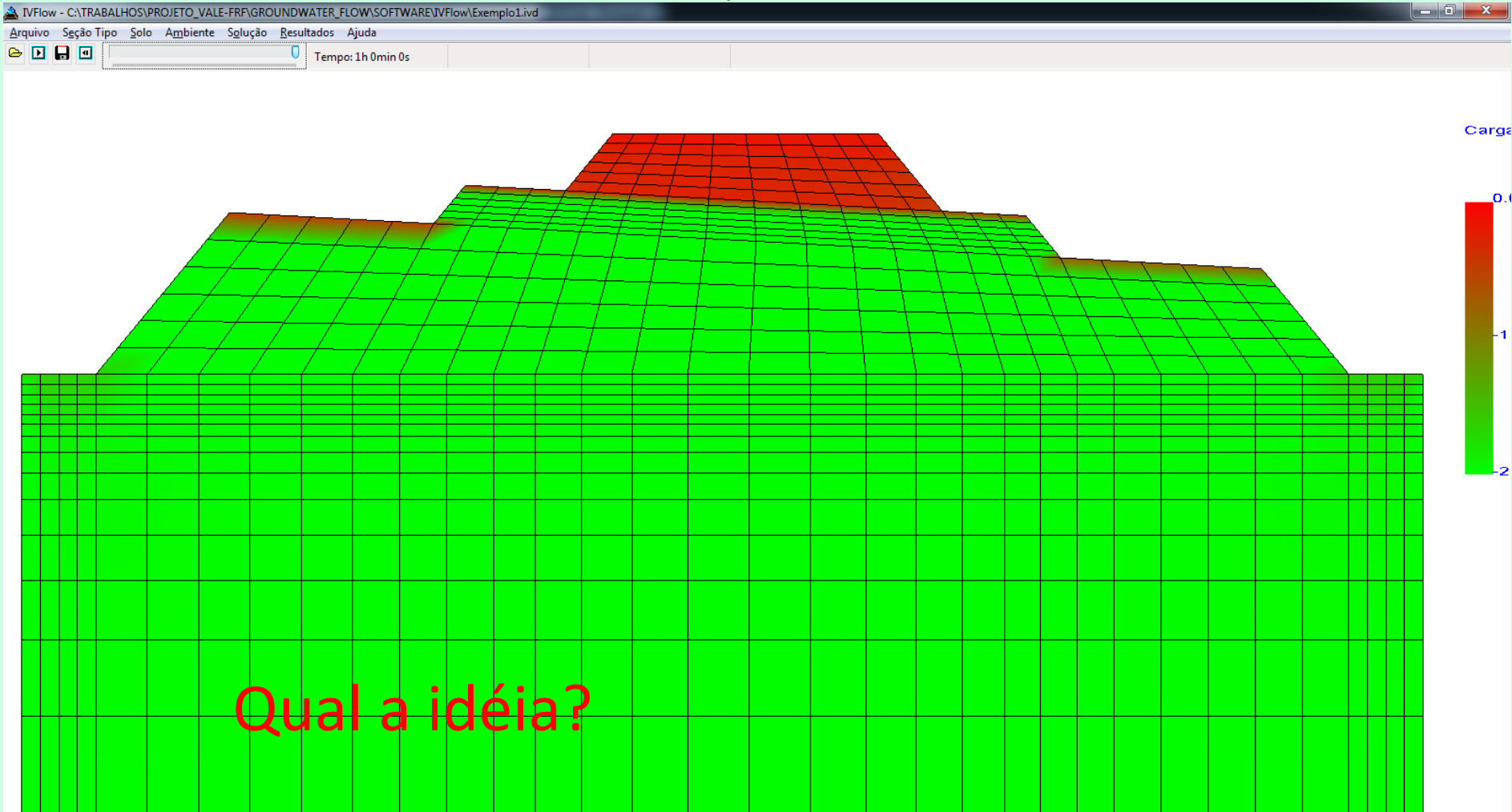
IVFlow - Exemplo em pavimento

- **05 minutos de chuva:** (Otto Pfafstetter – Belém-PA, $t = 1$ hora, Tr



IVFlow - Exemplo em pavimento

- **60 minutos de chuva:** (Otto Pfafstetter – Belém-PA, $t = 1$ hora, Tr



OUTRAS SIMULAÇÕES

SOLO LA'

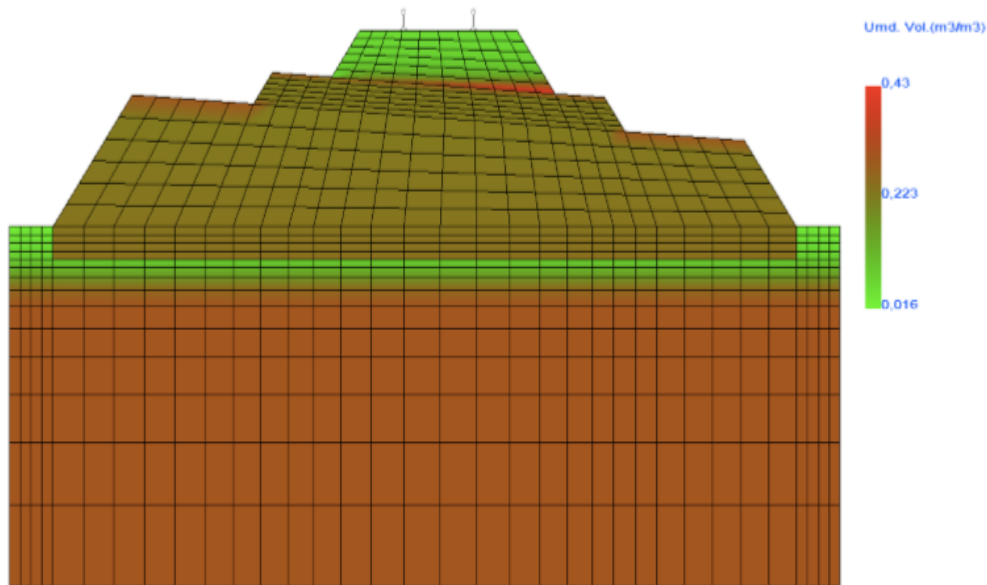


FIG. 4.27 – Umidade volumétrica em t=3h.

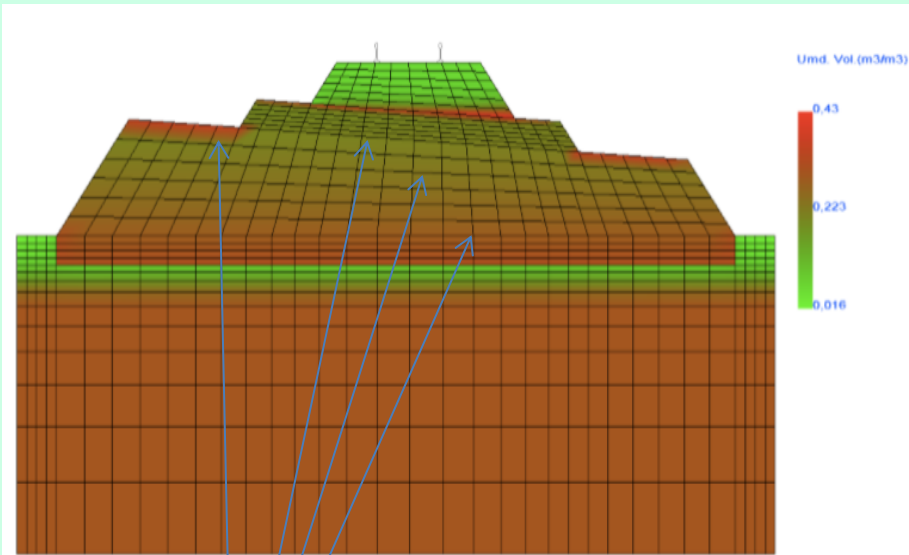
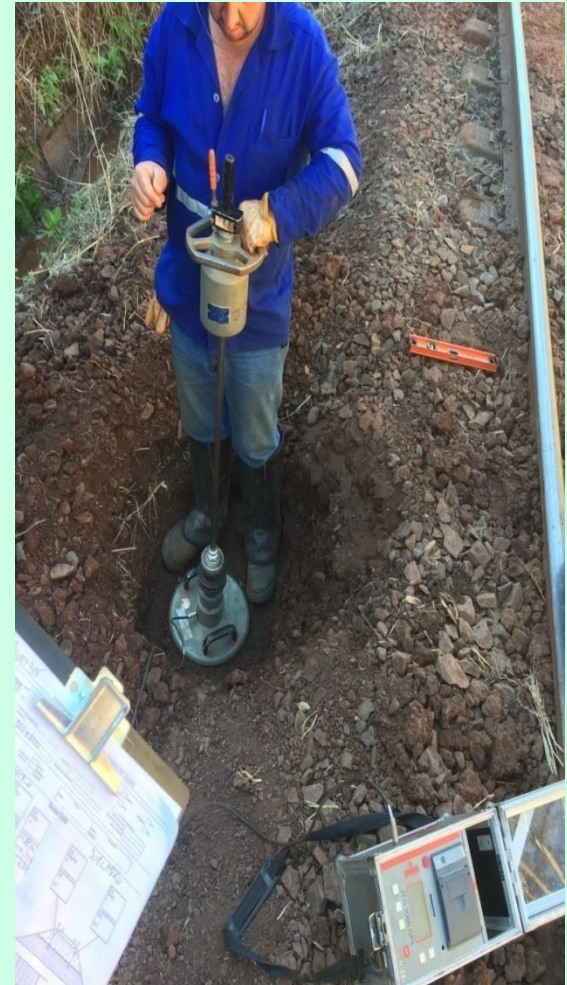


FIG. 4.49 – Umidade volumétrica em t=3h.

SOLO NA'
MAIOR UMIDADE
NA CAMADA
APÓS 3 HORAS

5. METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DA PLATAFORMA



Metodologia para Avaliação Estrutural da Plataforma Ferroviária

Abertura de Trincheira

Identificação visual da via
Identificação das camadas
Coleta das amostras



Ensaios de Campo

LWD no lastro, sublastro e subleito
DCP do sublastro para a camada inferior
Densidade Real e Umidade Speedy



Ensaios de Laboratório

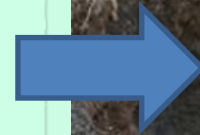
Caracterização dos solos
Módulo Resiliente



Modelagem
SysTrain

Ensaaios realizados

- LWD (Light Weight Deflectometer);
 - Lastro
 - Lastro degradado
 - Sublastro (se houvesse)
 - Subleito

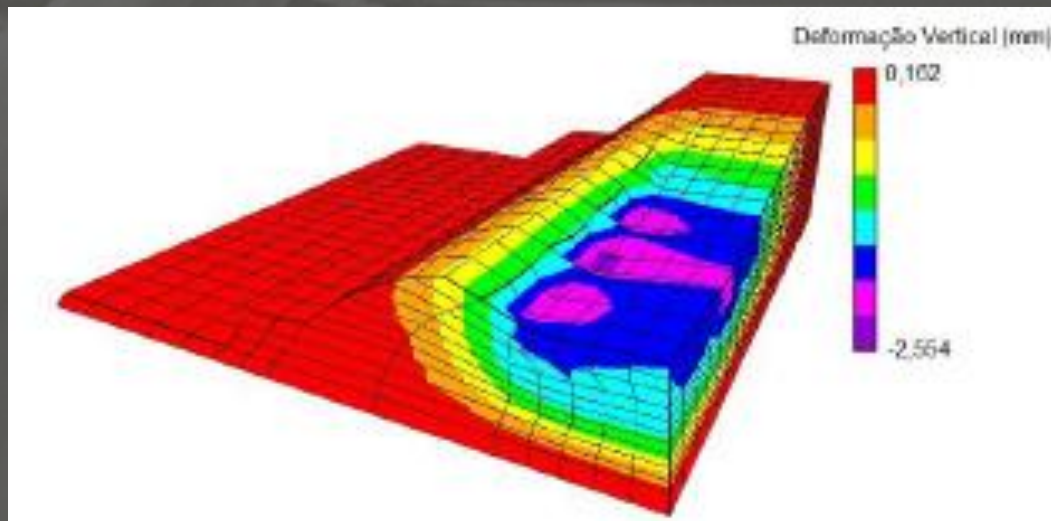




Modelagem Numérica

Deflexão (mm)	Tipo	Segmento
0,00 - 5,08	A	Vias com durabilidade indefinida.
3,41 - 6,35	B	Pavimentos de carga pesada, combinação de rigidez e flexibilidade. Intervalo definido pela AREMA (2013).

Lundgren et al. (1970)



Amostra	Deformação Vertical (mm)
01	2,554
02	3,591
03	1,906
04	2,773
05	1,434
06	1,275
07	1,266
08	1,744
09	1,412
10	1,249

SUMÁRIO

- Introdução;
- Conceito de Pavimento Ferroviário
- Maturidade Tecnológica
- Inovações Por Grupos
- Inovações Desenvolvidas (2012 – 2025)
- **Inovações em Desenvolvimento e Perspectivas**
- Conclusões
- Agradecimentos

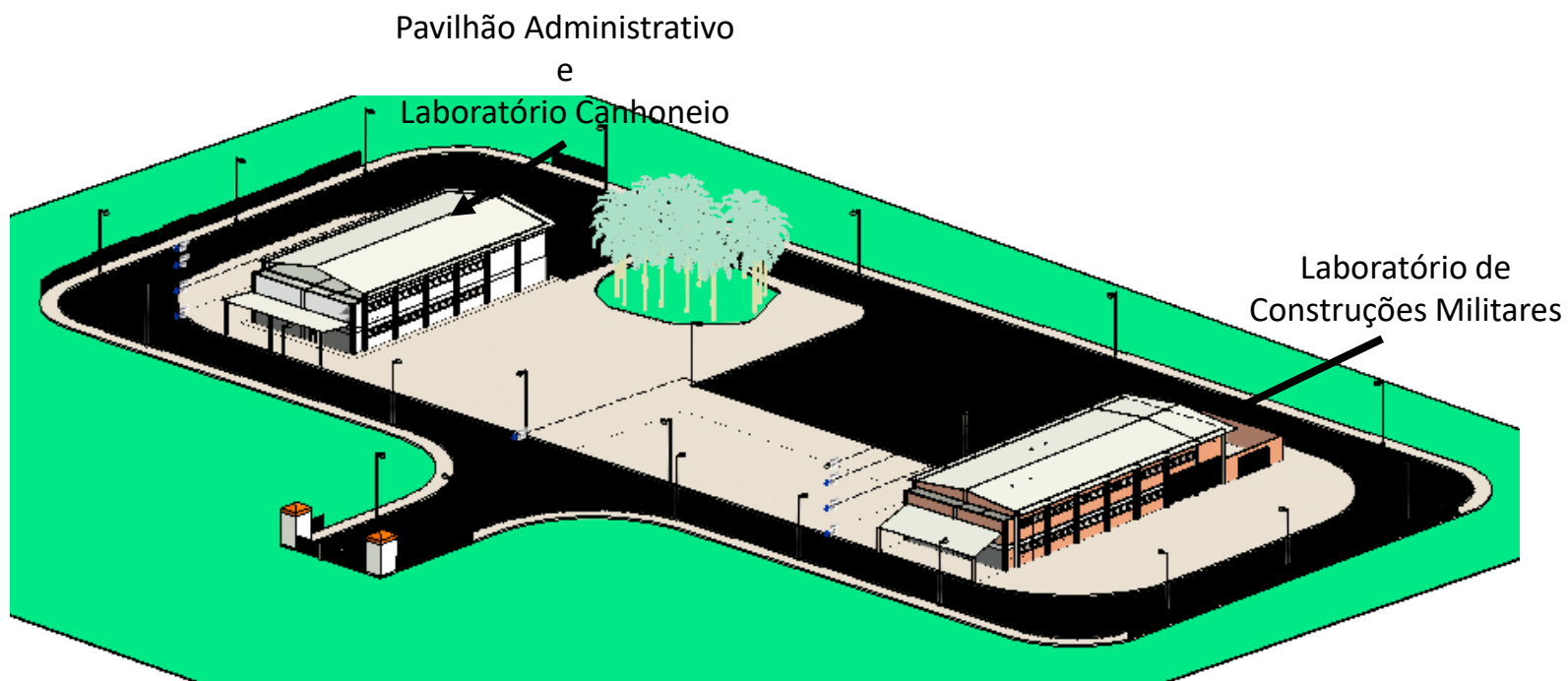


LARM

Localização



Pavilhão C13 da Área II



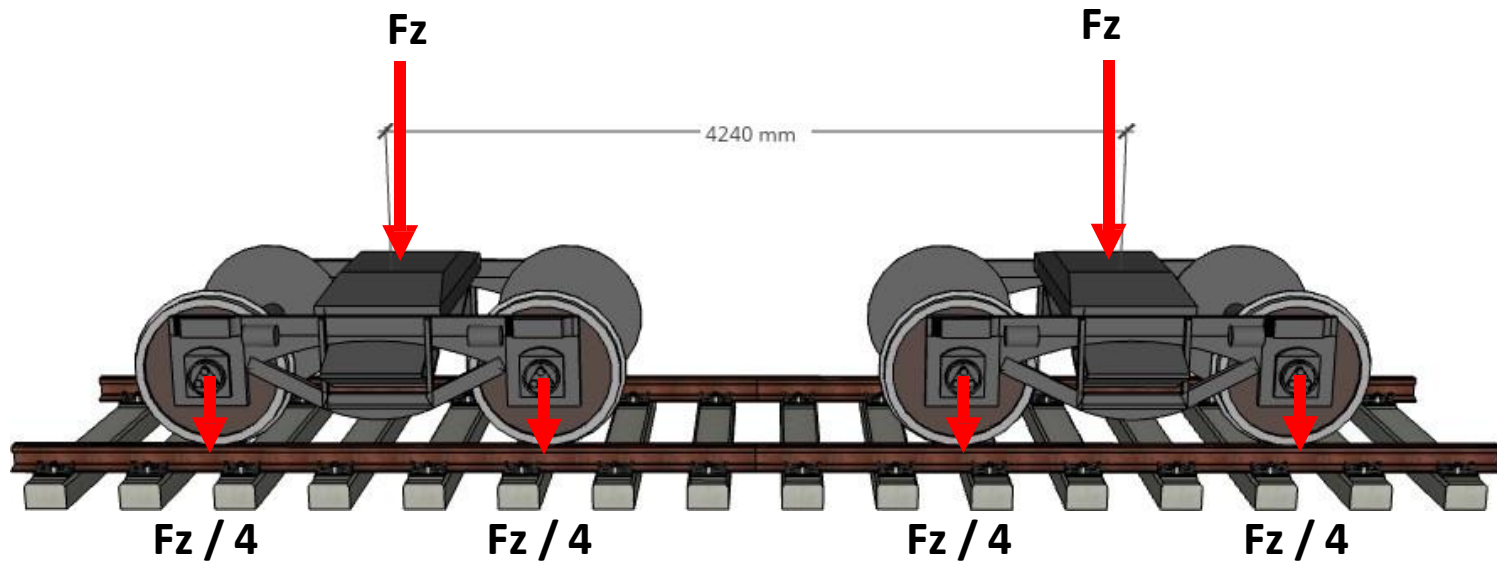
Panorama do projeto

IME – PORTAL FRAME 1MN – 1DOF UNDERSTANDING



TEST NEEDS

- The complete test system will have two train cars 4240 mm apart on a railroad track.
- The F_z Load will be applied in each Train Truck individually by two separated actuators

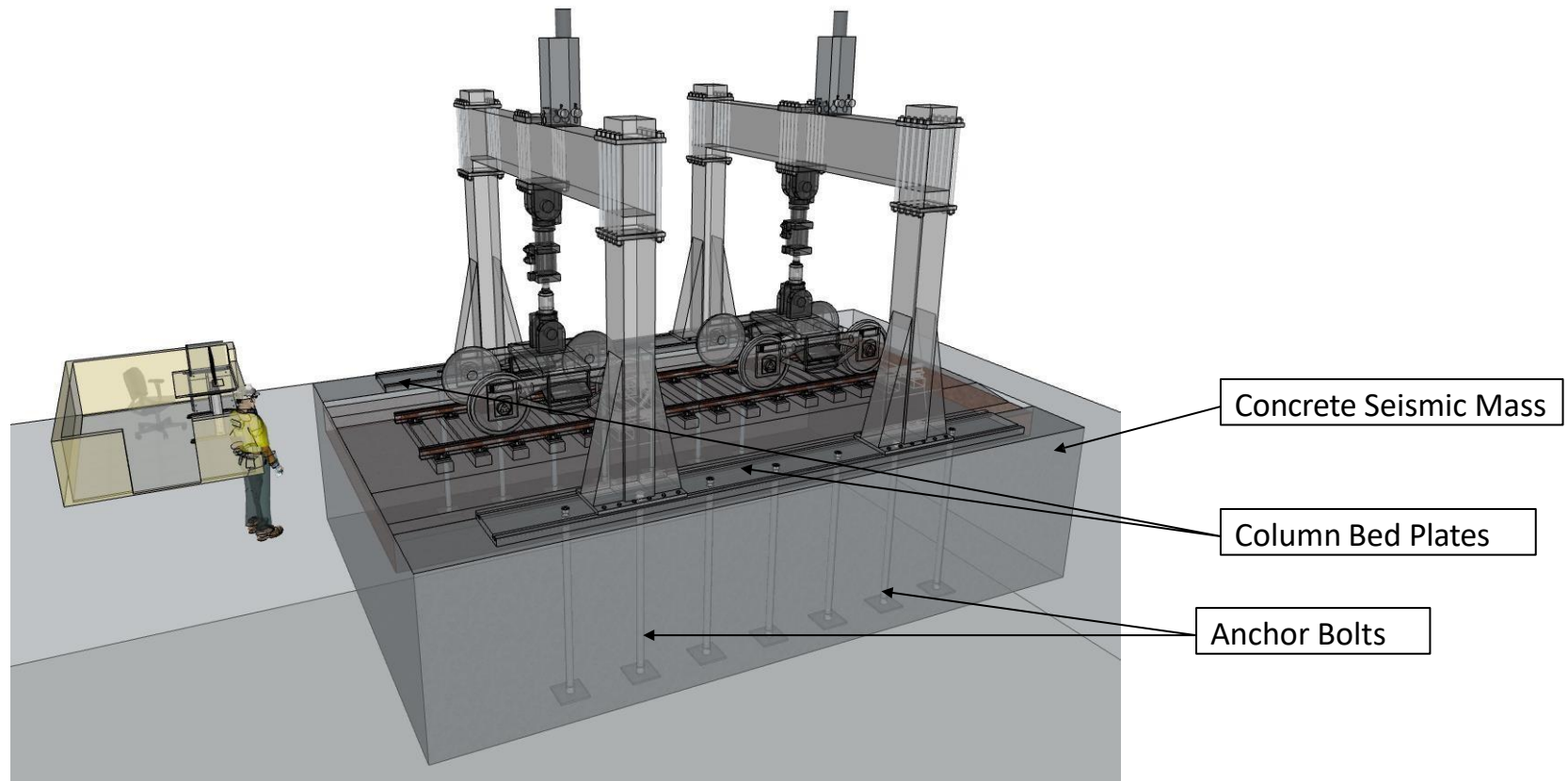


IME – PORTAL FRAME 1MN – 1DOF CONCEPT &



IDEAS

- Concept #1 – Layout – **1DOF - 2 Columns Portal Frame for each actuator**

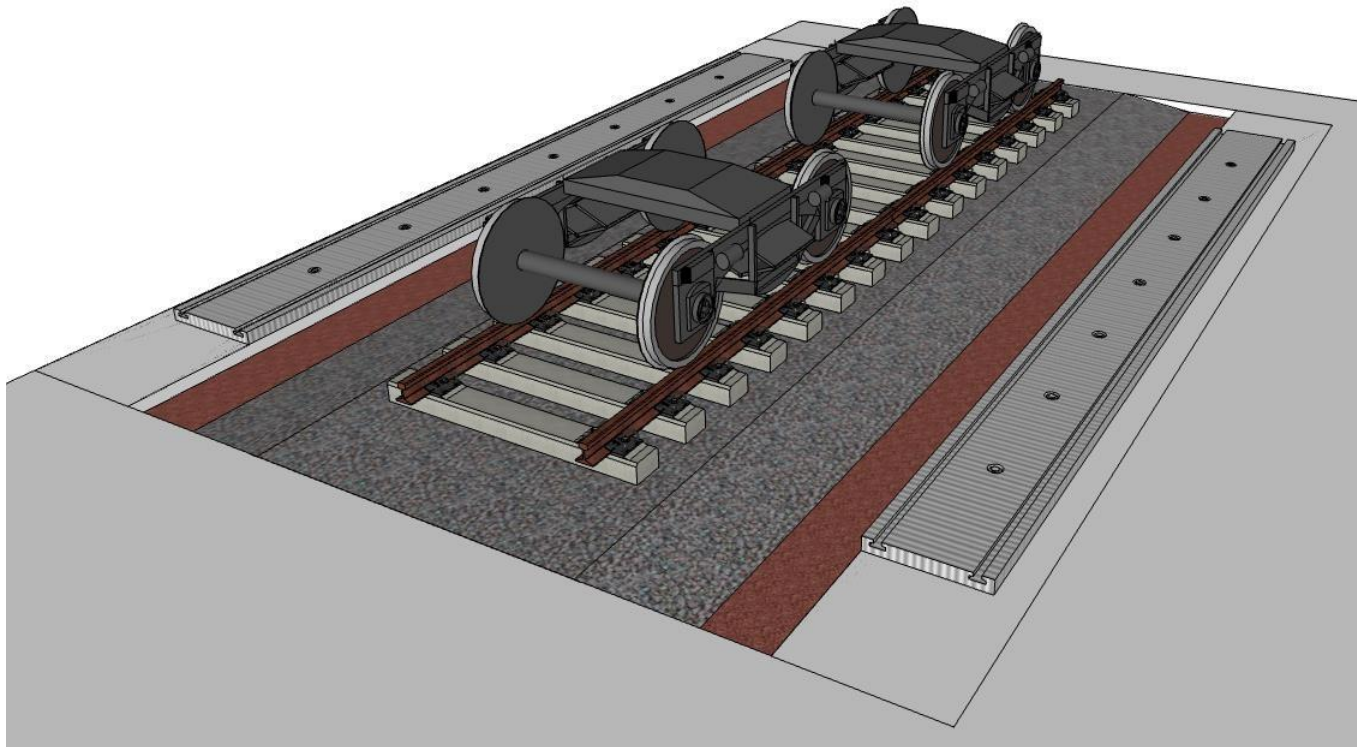


IME – PORTAL FRAME 1MN – 1DOF CONCEPT &



IDEAS

- Concept #1 – Layout – **1DOF - 2 Columns Portal Frame for each actuator**





LARM – Fase Equipamentos

Resultados Parciais

1ª parte do sistema de atuadores de carga adquirida



Desembarque do equipamento
no CTEx
(Guaratiba, Rio de Janeiro)



SUMÁRIO

- Introdução;
- Conceito de Pavimento Ferroviário
- Maturidade Tecnológica
- Inovações Por Grupos
- Inovações Desenvolvidas (2012 – 2025)
- Inovações em Desenvolvimento e Perspectivas
- **Conclusões**
- Agradecimentos

CONCLUSÕES

- Foram apresentadas algumas inovações na área de geotécnica de pavimentos, tais como os softwares SystRain, IVFlow, Uso de solo LA' como sublastro, equipamento para ensaio de lastro e metodologia de avaliação estrutural da plataforma ferroviária.