Ciências Exatas e da Terra



Rosyelle Cristina Corteletti

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE RISCOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS EM FERROVIAS

Estrada de Ferro Carajás (EFC)



METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE RISCOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS EM FERROVIAS

Estrada de Ferro Carajás (EFC)



Reitora

Cláudia Aparecida Marliére de Lima

Vice-Reitor

Hermínio Arias Nalini Jr.



Diretor

Prof. Frederico de Mello Brandão Tavares

Coordenação Editorial

Daniel Ribeiro Pires

Assessor da Editora

Alvimar Ambrósio

Diretoria

André Luís Carvalho (Coord. de Comunicação Institucional)
Marcos Eduardo Carvalho Gonçalves Knupp (PROEX)
Paulo de Tarso A. Castro (Presidente Interino do Conselho Editorial)
Sérgio Francisco de Aquino (PROPP)
Tânia Rossi Garbin (PROGRAD)

Conselho Editorial

Profa. Dra. Débora Cristina Lopez Profa. Dra. Elisângela Martins Leal Prof. Dr. José Luiz Vila Real Gonçalves Prof. Dr. José Rubens Lima Jardilino Profa. Dra. Lisandra Brandino de Oliveira Prof. Dr. Paulo de Tarso Amorim Castro

Rosyelle Cristina Corteletti

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE RISCOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS EM FERROVIAS

Estrada de Ferro Carajás (EFC)

Ouro Preto 2017



© EDUFOP

Coordenação Editorial Daniel Ribeiro Pires

Capa

Daniel Ribeiro Pires

Diagramação Pollyanna Assis

Revisão

Rosângela Zanetti Thiago Vieira (Estagiário)

Ficha Catalográfica

(Catalogação: sisbin@sisbin.ufop.br)

C827m Corteletti, Rosyelle Cristina.

Metodologia para análise de riscos geológico-geotécnicos em ferrovias : Estrada de Ferro Carajás (EFC) / Rosyelle Cristina Corteletti. – Ouro Preto : Editora UFOP, 2017.

222 p.: il.: color; grafs; tabs.

 Avaliação de riscos.
 Ferrovias.
 Estrada de Ferro Carajás (MA e PA).
 Titulo.
 Universidade Federal de Ouro Preto. CDU: 624.13:625.122

ISBN 978-85-288-0351-8

Todos os direitos reservados à Editora UFOP. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida, arquivada ou transmitida por qualquer meio ou forma sem prévia permissão por escrito da Editora.

EDITORA UFOP

Campus Morro do Cruzeiro Centro de Comunicação, 2º andar Ouro Preto / MG, 35400-000 www.editora.ufop.br / editora@ufop.br (31) 3559-1463



AGRADECIMENTOS

A Deus, por esta vida maravilhosa.

Ao meu marido Gilberto, pelo apoio incondicional.

Aos meus pais (Osório e Nair) e minha irmã Arlete, pela compreensão do desconhecido.

Ao Prof. Dr. Romero César Gomes, meu orientador, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa, e por sempre ensinar a pensar adiante a partir dos conceitos.

Ao Prof. Dr. Martin Ziegler, meu orientador na Alemanha, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa no *Geotechnik* im Bauwesen - RWTH Aachen, junto ao seu grupo de alunos e por me ensinar uma lógica nova do pensar em minha pesquisa.

Ao meu amigo Roberto Filgueiras, companheiro de NGA, parceiro na construção de um pensamento geotécnico para estradas de ferro neste país e pela ajuda primordial no desenvolvimento deste trabalho.

A Lucas Deleon Ferreira, Bruno de Oliveira Costa Couto e aos alunos do NGA que participaram e me ajudaram neste projeto, meu carinho especialíssimo a todos.

Aos meus companheiros na RWTH-Aachem: Gisa Kleine Vennekate, Oscar Juarez e Marcus Fuchsschwans, pelo apoio, colaboração e interesse em minha pesquisa.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro que possibilitou a conclusão deste trabalho.

Ao DAAD, pela oportunidade de desenvolver parte do meu trabalho na Alemanha.

À Vale Mineração S.A, pelo apoio financeiro e fornecimento de dados que possibilitou a conclusão deste trabalho.

Ao meu amigo Bernardo, pelo apoio em momentos cruciais além Oceano Atlântico.

Aos meus amigos e companheiros Bruno Camilloto, Claudia Pezzini, Elaine, Hudson, Max, Mariane, Rogerio Naves, incentivadores desta trajetória de vida.

A Ana Elisa, sobrinha, afilhada e amiga, pela paciência e pelo interesse em ajudar sempre.

Ao Rafael, secretário do NUGEO, que sempre me auxiliou nas diversas vezes de que precisei.

"Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, daß der nicht würfelt." (Albert Einstein)

> "O sol pega o trem azul" (Lô Borges)

Esta obra foi selecionada pelo Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto, a partir do Edital nº 002/2014 da Editora UFOP, para editoração eletrônica de trabalhos originados de teses e dissertações.

Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação Pró-Reitor Prof. Dr. Valdei Lopes de Araujo

Programa de Pós-Graduação em Educação Coordenador Prof. Dr. Romero César Gomes

Orientador Prof. Dr. Romero César Gomes **Coorientador** Prof. Dr. Martin Ziegler

Comissão Editorial

Prof. Dr. Romero César Gomes Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar

Prof. MsC. Eleonardo Lucas Pereira

SUMÁRIO

21	PREFÁCIO
23	APRESENTAÇÃO
27 27 30 31	CAPÍTULO 1 Introdução 1.1. Contextualização do trabalho 1.2. Objetivos do trabalho 1.3. Estruturação do livro
35	CAPÍTULO 2 Metodologia da pesquisa
43 43 53	CAPÍTULO 3 Estudo de caso 3.1. Caracterização e locação do empreendimento estudado 3.2. Contextualização geológica e geotécnica da via
61 61 65 67 74 79 84	CAPÍTULO 4 Conceitos e análises de risco 4.1. Conceitos fundamentais 4.1.1 Risco 4.1.2. Hazard 4.1.3. Suscetibilidade e vulnerabilidade 4.2. Classificações de risco 4.3. Análises de risco 4.4. Zoneamento de risco 4.5. Processos geodinâmicos
91	4.6. Modelos e incertezas
96	4.7. Classificações numéricas do risco
97	4.7.1. Termo "classificação"
100	4.7.2. Escalas de guttman
102	4.7.3 Análise multivariada

103	4.7.3.1. Análise fatorial
104	4.7.3.2. Análise de agrupamento (clusters analysis)
108	4.7.3.3. Clusterização hierárquica
	CAPÍTULO 5
113	Metodologia proposta
113	5.1. Introdução
114	5.2. Fase I da metodologia das análises de risco
118	5.3 Fase II da metodologia das análises de risco
119	5.3.1. Fase II – 1ª etapa: Estruturação dos dados e proposição dos
	índices de criticidade associados a processos geodinâmicos
127	5.3.2. Fase II – 2ª etapa: Identificação dos trechos com suscetibi-
	lidade de ocorrência aos processos geotécnicos
137	5.3.3. Fase II – 3ª etapa: Estimativa da vulnerabilidade da ferrovia
	aos processos geotécnicos
144	5.3.4. Fase II – 4ª etapa: Estimativa do risco geológico-geotécnico
	para ferrovias
155	5.4. Setorização geológico-geotécnica da EFC
	CAPÍTULO 6
165	Desenvolvimento do programa
165	6.1. Introdução
165	6.2. Programa geovia
103	o.z. Hogrania geovia
	CAPÍTULO 7
175	Conclusões
175	7.1. Considerações finais
176	7.2. Conclusões e sugestões para pesquisas adicionais
170	
179	REFERÊNCIAS RIBLINGRÁFICAS

191

ANEXOS

221 SOBRE A AUTORA

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 3

- 44 Figura 3.1 Localização da Estrada de Ferro de Carajás
- Figura 3.2 Erosão diferenciada no talude de corte no km 408. (VALE, 2010)
- Figura 3.3 Escorregamentos rotacionais em taludes de aterro nos km 399 e km 732+320
- Figura 3.4 Solapamento da base do aterro em contato com o rio Pindaré, no km 346. (VALE, 2010)
- Figura 3.5 Escorregamentos rotacionais em taludes de corte no km 334 e km 585 em sequência. (VALE, 2010)
- Figura 3.6 Vista de taludes do km 333 e km 578+950 em sequência, erodidos apresentando escorregamentos recentes. (VALE, 2010)
- Figura 3.7 Escorregamentos planares localizados nos km 388 e km 392 da EFC. (VALE, 2010)
- Figura 3.8 Obra de recuperação do aterro da ferrovia devido a escorregamento no km 671 em abr/2008. (VALE, 2010)
- Figura 3.9 Vista da plataforma com água acumulada, devido assoreamento do bueiro causado pela erosão do talude no km 403+741. (VALE, 2010)

CAPÍTULO 4

- Figura 4.1 Diferentes abordagens do conceito de vulnerabilida de. (BIRKMANN, 2006)
- 76 Figura 4.2 Classificação de riscos ambientais. (CERRI, 2001)
- 77 Figura 4.3 Classificação de riscos urbanos. (NOGUEIRA, 2002)
- Figura 4.4 Fluxograma de gestão de riscos para escorregamen tos. (FELL et. al., 2005)
- Figura 4.5 Representação esquemática das fases de avaliação do risco ao deslizamento de terra: A: Dados básicos; B:
 Suscetibilidade; C: Vulnerabilidade, D: Avaliação do risco; E: Ris co Final pela curva de risco. (VAN WESTEN, 2008)
- 96 Figura 4.6 Resumo das origens de incertezas em problemas geotécnicos (EL-RAMLY, 2001; DA COSTA, 2005; adaptado)

CAPÍTULO 5

- 116 Figura 5.1 Fluxograma de atividades da Fase I da metodologia proposta
- 118 Figura 5.2 Fluxograma de atividades da Fase II da metodologia proposta
- 120 Figura 5.3 Perfis ou configurações da via permanente
- 128 Figura 5.4 Configuração típica de obra linear. Exemplo: Estrada de Ferro de Carajás
- 130 Figura 5.5 Estrutura identificada da inter-relação entre os índi ces críticos
- Figura 5.6 Matriz de hierarquia de suscetibilidade aos processos geodinâmicos
- Figura 5.7 Distribuição das frequências a processos geodinâmicos para os trechos ao longo da EFC
- Figura 5.8 Distribuição das frequências da vulnerabilidade à paralisação da via para os trechos ao longo da EFC
- 150 Figura 5.9 Gráfico de riscos geológico-geotécnicos para ferrovia
- 154 Figura 5.10 Distribuição dos trechos com risco de paralisação da via (ano 2010/2011), devido a processos geodinâmicos ao longo da linha-tronco da ferrovia EFC
- 157 Figura 5.11 Dendograma gerado pelo Software R para o domínio itoestratigráfico Formação Couto Magalhães na Estrada de Ferro Carajás (EFC)

CAPÍTULO 6

- 167 Figura 6.1 Tela de acesso ao programa GEOVIA
- 167 Figura 6.2 Tela principal do programa GEOVIA
- 168 Figura 6.3 Tela para a entrada de dados para estimativa do tipo de obra de intervenção
- Figura 6.4 Tela para a entrada de dados para estimativa dos índices de criticidade
- 170 Figura 6.5 Tela para as estimativas da suscetibilidade, vulnera bilidade e risco
- 171 Figura 6.6 Tela correspondente ao comando "Acompanhamento Histórico"

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3

- Tabela 3.1 Unidades litológicas por trecho da Estrada de Ferro Carajás (VALE, 2010)
- 57 Tabela 3.2 Unidades geomorfológicas por trecho da Estrada de Ferro Carajás (VALE, 2010).

CAPÍTULO 4

- 63 Tabela 4.1 Diferentes proposições do conceito de risco
- 66 Tabela 4.2 Diferentes proposições do conceito de hazard
- 68 Tabela 4.3 Diferentes proposições dos conceitos de Vulnerabilidade e Suscetibilidade
- 75 Tabela 4.4 Eventos de riscos (SUGUIO, 1999 apud NOGUEIRA, 2002)
- 87 Tabela 4.5 Principais características dos processos geodinâmicos
- Tabela 4.6 Agentes e causas de movimentos de massa (GUIDICINI; NIEBLE,1984, mod.)

CAPÍTULO 5

- 114 Tabela 5.1- Princípios Gerais da Metodologia TMD aplicada a pavimentos ferroviários (GOMES, 2009)
- 122 Tabela 5.2 Tabela de dados processados na 1ª etapa da metodologia proposta
- 124 Tabela 5.3 Índices de criticidade de ocorrência de processos geodinâmicos em ferrovia
- 126 Tabela 5.4 Tabela de dados processados na 1ª etapa da metodologia proposta: índices críticos (iC) e eventos
- 133 Tabela 5.5 Padrões de suscetibilidade adotados com escala de cores
- 134 Tabela 5.6 Padrões de suscetibilidade para os trechos km 486+150 ao km 501+350 e km 749+150 ao km 764+450 da EFC
- 139 Tabela 5.7 Valores ponderais relativos aos índices de vulnerabilidade da ferrovia
- 140 Tabela 5.8 Padrões de vulnerabilidade

- Tabela 5.9 Índices de vulnerabilidade para os trechos km 486+150 ao km 501+350 e km 749+150 ao km 764+450 da EFC.
- 145 Tabela 5.10 Erfassungssystematik: seleção de parâmetros para análise de riscos (BURGUER; BUCHHART, 2002)
- 147 Tabela 5.11 Fatores de ponderação em função das obras de intervenção (LD e LE)
- 148 Tabela 5.12 Fatores de ponderação para a distância do talude ao eixo da via
- 148 Tabela 5.13 Fatores de ponderação para as obras de intervenção executadas na PL
- 150 Tabela 5.14 Classificação de índices de risco geológico-geotécnico para ferrovias
- Tabela 5.15 Índices de risco geológico-geotécnico para os trechos km 486+150 ao km 501+350 e km 749+150 ao km 764+45 da EFC
- Tabela 5.16 Setorização Geológico-Geotécnica (SGG) nos dois trechos de referência km 486+150 ao km 501+350 e km 749+150 ao km 764+450 da EFC
- 161 Tabela 5.17 Setorização Geológico-Geotécnica (SGG) da Estrada de Ferro Carajás (EFC)

LISTA DE ABREVIAÇÕES

ABGE Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e

Ambiental

ANTT Agência Nacional de Transportes Terrestres

AGS Australian Geomechanics Society

CPRM Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DNTI Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EFC Estrada de Ferro Carajás

GEOVIA Sistema de Análise de Riscos Geológico-Geotécnicos de

Ferrovias

IAEGE International Association for Engineering Geology and

the Environment

iC Índice de Criticidade

ISRM International Society for Rock Mechanics
ISSMGE International Society for Soil Mechanics and

Geotechnical Engineering

ISNT Instabilidade

IUGS International Union of Geological Sciences
IUGS-WGL Working Group on Landslides, Committee on

Risk Assessment

iV İndice de Vulnerabilidade

JTC 1 Joint Technical Committee on Landslides and

Engineered Slopes 1

JTC 32 Joint Technical Committee on Landslides and

EngineeredSlopes 32

LD segmento do Lado Direito
LE segmento do Lado Esquerdo

NA Nível d'água

PL Segmento da Plataforma S Padrão de suscetibilidade

SIG Sistema de Informação Geográfica

UNESCO Organização das Nações Unidas para a Educação, a

Ciência e a Cultura

USGS United States Geological Survey

V Vulnerabilidade

LISTA DE ANEXOS

- 190 Anexo I: Traçado da Estrada de Ferro Carajás (EFC)
- 191 Anexo II: Mapa geológico da Estrada de Ferro Carajás (EFC)
- 192 Anexo III: Mapa geomorfológico da Estrada de Ferro Carajás (EFC)
- 201 Anexo IV: Análise de caracterização do solo e classificação da Estrada de Ferro Carajás (EFC)
- 208 Anexo V: Modelo de ficha de campo adotado
- 211 Anexo VI: Análise gráfica da metodologia para diagnóstico de problemas geológico-geotécnicos de ferrovia, aplicada em toda a extensão da Estrada de Ferro Carajás (EFC)
- 212 Anexo VII: Dados e Dendogramas de referência da Análise Multivariada. Setorização geológico-geotécnica
- 216 Anexo VIII: Método ad-hoc utilizando a dinâmica de Brainstorming

PREFÁCIO

O conhecimento sobre os diversos temas envolvidos na análise de riscos geológico—geotécnicos em ferrovias é essencial para subsidiar a retomada de crescimento da demanda por ferrovias no Brasil, que tem proporcionado à implantação de novos empreendimentos ferroviários, cujas ferrovias em operação tem procurado a melhoria de sua capacidade operacional, por meio da garantia de qualidade na manutenção e no monitoramento.

Nesse contexto existe uma carência de informação técnico-científica integrada e multidisciplinar que aborde os diversos temas envolvidos na análise de riscos geológico-geotécnicos em ferrovias, como o uso de GBR (Geotechnical Baseline Report) em contratos de concessão, já utilizados internacionalmente.

A autora desse livro, com o intuito de atender aos técnicos que lidam com ferrovias, buscou abordar temas especializados em geologia, geotecnia e sistemas de monitoramento que fazem interface com a área de engenharia de infraestrutura de ferrovias, de forma a compor o presente trabalho com a perspectiva de apresentar insumos aos técnicos e especialistas que atuam nas diversas áreas correlatas, numa perspectiva integrada.

O livro tem como sua principal contribuição a proposta metodológica sobre análise de riscos geológico-geotécnicos ao longo de ferrovias, trazendo um novo conceito de projeto de engenharia de ferrovias, numa perspectiva preventiva, de maior economicidade e que integre informações geológico-geotécnicas. A partir daí passa pela análise dos riscos geológico-geotécnicos ao longo de ferrovias e o papel do monitoramento na prevenção de riscos proporcionando sua mitigação.

É importante ressaltar que a autora utilizou-se, de forma muito apropriada, de relevantes fundamentos para o desenvolvimento da metodologia proposta, tendo adotado as terminologias as principais correntes de pensamento do tema análise de riscos geológico-geotécnicos,

propostas pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – ABGE, Australian Geomechanics Society – AGS, International Society for Rock Mechanics - ISRM, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – ISSMGE e pelos comitês: Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes 32 (2004) e Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes 1 (2008).

A aplicação da metodologia deu-se no caso prático da linha tronco da Estrada de Ferro Carajás (EFC). O minério de ferro é extraído e transportado por meio da ferrovia que atravessa a Região Amazônica e sua zona de transição, ao longo de 892 km de extensão, da mina de Carajás até o porto de Itaqui, no Maranhão. Cerca de 100 milhões de toneladas são transportadas anualmente. Em 2010, a Vale S.A iniciou o projeto de duplicação da EFC, para aumentar a capacidade de transporte da ferrovia. No escopo deste projeto, foi desenvolvida a metodologia TMD (Gomes, 2010) utilizada como base deste trabalho.

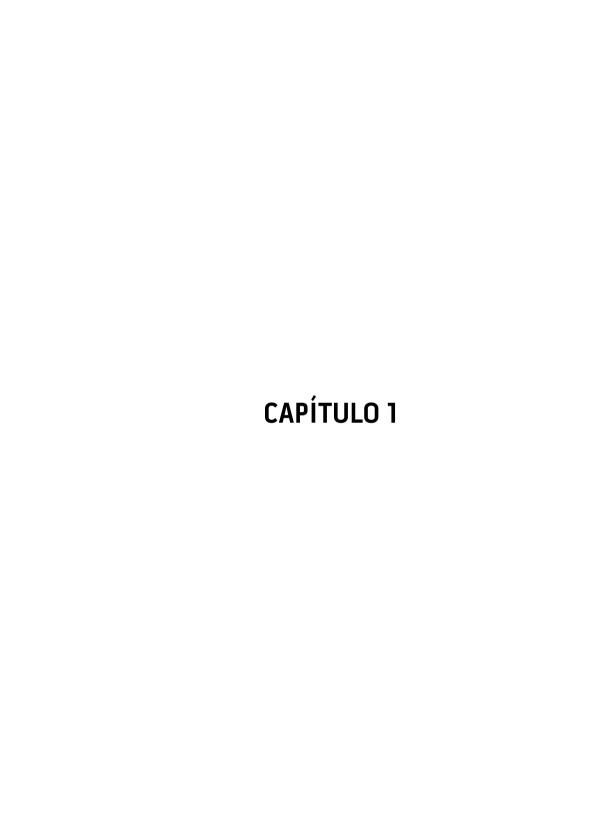
Para quem deseja ampliar seus conhecimentos na aplicação de análise de riscos geológicos e geotécnicos em empreendimentos ferroviários a fim de obter maior eficiência e eficácia na sua implantação, manutenção e monitoramento, recomendo o livro da Profa Dra Rosyelle Cristina Corteletti.

Profa. Dra. Noris Costa Diniz

APRESENTAÇÃO

Os problemas de origem geológico-geotécnica podem afetar as ferrovias de várias formas. Normalmente geram instabilidades nos taludes de corte e aterros ao longo da via e podem atingir, inclusive, a estrutura da plataforma ferroviária. A origem dos problemas geotécnicos nas ferrovias do Brasil não está restrita somente ao baixo investimento nesse tipo de infraestrutura no país, mas também está relacionada às características de contorno desse tipo de obra, pois percorrem longas distâncias e atravessam trechos com características geológicas, geotécnicas e geomorfológicas bem distintas. Diante disso, há uma carência em metodologia científica de análise de risco geológico-geotécnica para esse tipo de infraestrutura. Nesse sentido, o trabalho apresenta a proposição de uma metodologia para diagnóstico e quantificação do risco associado a problemas geológico-geotécnicos no âmbito de uma ferrovia, tendo como estudo de caso a Estrada de Ferro Carajás (EFC).

A metodologia proporciona a identificação de parâmetros utilizados na estimativa de riscos geológico-geotécnicos de ferrovias, por meio de índices críticos, parâmetros de suscetibilidade e parâmetros de vulnerabilidade, com base numa abordagem analítica simples, consistente e prática, subsidiada por ferramentas estatísticas em análises multivariadas, e que permitiram determinar um plano de setorização geológico-geotécnica da via. Com efeito, a hierarquia dos riscos geotécnicos, discriminada ao longo de toda a extensão da via, permite uma efetiva antecipação das ações mitigadoras e de minimização de eventos que acarretem efeitos de paralisação das atividades de tráfego, o que consiste na síntese de qualquer programa de gestão de empreendimentos desta natureza. Com intuito inovador, o trabalho desenvolveu a estruturação da metodologia em termos de um programa computacional, denominado GEOVIA. Trata-se de um software específico para a rápida aplicação dos princípios, correlações e cálculos inseridos no contexto da metodologia proposta neste estudo. De fácil interação com o usuário, o GEOVIA garante uma elevada praticidade e imediata aplicação da metodologia proposta a obras reais e inspeções técnicas de campo, proporcionando o contínuo monitoramento de integridade da via a partir de um banco de dados variável.



INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

O transporte ferroviário é caracterizado como sistema linear de transporte sobre trilhos, que compreende a via permanente e outras instalações fixas, o material rodante e o equipamento de tráfego. Trata-se de uma infraestrutura indicada geralmente para o transporte de cargas de baixo valor agregado, para fluxos concentrados (em termos de origens e destinos) e para grandes distâncias (PNLT, 2007; ANTT, 2012). No Brasil, a grande vocação das ferrovias consiste no transporte de cargas com elevada concentração, principalmente granéis, produtos siderúrgicos e cargas unitizadas (contêineres). No foco de uma operação econômico-financeira, a ferrovia brasileira passou a incrementar, nos últimos anos, transportes mais rentáveis, em virtude da escala de volumes transportáveis. (PLNT, 2007; CNT, 2013)

As ferrovias, como outras obras lineares, são caracterizadas por atravessarem trechos com diferentes feições geomorfológicas, geológicas, pedológicas e geotécnicas, incluindo diversos tipos de vegetação e núcleos urbanos distintos.

A malha ferroviária brasileira totaliza 29.706 quilômetros, sistema modesto dado às dimensões continentais do país. As ferrovias nacionais estão concentradas na região Sudeste e atendem também as regiões Sul, Nordeste e parte do Centro-Oeste e Norte do país (PLNT, 2007; ANTT, 2012). Como reflexo do baixo investimento em infraestrutura ferroviária no país, nota-se a escassez de dados científicos associados à engenharia ferroviária no Brasil, tanto no que se refere a plataformas, obras de arte e estudos de concepção de traçados, quanto a aspectos tecnológicos de implantação e operação de ferrovias, além dos aspectos econômicos.

Abordagens de obras geotécnicas são comumente descritas em termos de análises de riscos. A carência de tais metodologias no âmbito das

ferrovias está relacionada às características de contorno desse tipo de obra. Assim, projetos de traçado de ferrovias são baseados em processos empíricos (DINIS DA GAMA, 2005), com grande histórico de eventos danosos, que podem culminar na paralisação da via e em obras de manutenção sistemática e de natureza emergencial.

Os problemas de origem geológico-geotécnica podem afetar as ferrovias de várias formas. Normalmente geram instabilidades nos taludes de corte e aterros ao longo da via e podem atingir, inclusive, a estrutura da plataforma ferroviária. Ao longo das ferrovias, ocorrem movimentos de solo e de rochas, de depósitos artificiais (aterro) e de materiais mistos, caracterizando processos geodinâmicos (erosões, movimentos de massa em geral e subsidência ou colapso).

Dinis da Gama (2005) indica que a falta de levantamento de dados sobre a litologia e a ação de águas pluviais, na fase de concepção e implantação de traçados ferroviários, têm como consequência um desenvolvimento de estudos geotécnicos marcado por incertezas de natureza geológica e geotécnica.

Comumente, essas questões têm origem na falta de conhecimento do meio físico, principalmente da gênese dos processos de dinâmica superficial ou processos geodinâmicos. Trata-se de fato bastante comum em território brasileiro, na qual a falta de conhecimento leva à omissão das características do meio físico local, tendo como consequência projetos inadequados e construções deficientes, agravadas pela falta de manutenção de forma apropriada, tanto em ferrovias como em rodovias. Essa questão é mais difundida em rodovias, naturalmente devido à maior extensão desse tipo de infraestrutura no país.

Os principais conceitos e as proposições das análises de risco são de grande interesse para o gerenciamento dos processos de instabilizações associados a movimentos de massa (comumente escorregamentos) no Brasil, que implicam prejuízos elevados e danos à população mais exposta a esse tipo de eventos (parcela significativa de moradores da periferia das cidades brasileiras, particularmente as de relevo acidentado). Essas técnicas são também aplicadas para a adoção de medidas mitigadoras de

desastres naturais nas obras de infraestrutura lineares, como estradas e ferrovias, objetos deste trabalho.

Nesse contexto, abre-se a discussão de interpretação dos conceitos e da análise de riscos aplicada especificamente em obras lineares. Essas obras possuem a distinção de envolverem longas distâncias, com trechos com características bem distintas. O perfil da via é definido por uma área de construção, cuja extensão do traçado é muito maior que a largura. Essa desproporção de dimensões torna complexo tratar o percurso de uma obra linear em termos de áreas. Por outro lado, abordagens de cartografia geológico-geotécnica são comumente estabelecidas em termos de áreas.

Assim, torna-se um desafio desenvolver estudos em obras de infraestrutura lineares, quando se tem como foco o comportamento da via como um todo. É necessário notar que as análises qualitativas, usadas comumente para indicação de risco em obras lineares, representam um momentâneo do empreendimento (um esboço dinâmico de sua realidade física), que pode tornar-se, em função das suas atividades de operação e/ou manutenção, rapidamente defasado.

O estudo aqui apresentado tem como objetivo desenvolver uma metodologia de análise de riscos geológico-geotécnicos em ferrovias, que se baseia na hipótese elaborada de que a vulnerabilidade e o risco geológico-geotécnico de ferrovias são fatores dinâmicos nas análises de risco. Logo, a quantificação do risco geológico-geotécnico em trechos previamente situados, com a inserção dos resultados num banco de dados, representa a evolução dos trabalhos de mitigação ao longo da via e permite uma atualização rápida do nível de conhecimento do setor.

O estudo foi desenvolvido tomando-se como referência a linha tronco da Estrada de Ferro Carajás (EFC), que interliga a Mina de Ferro de Carajás (uma das *maiores* reservas de minério de ferro de alto teor no *mundo*) até o Porto do Itaqui, localizado na cidade de São Luís (MA). O minério de ferro é extraído e transportado por meio da ferrovia que atravessa a Região Amazônica e sua zona de transição, ao longo de 892 km de extensão. Cerca de 100 milhões de toneladas são transportados anualmente. Em 2010, a VALE Mineração S.A iniciou o projeto de duplicação da EFC,

para aumentar a capacidade de transporte da ferrovia. No escopo desse projeto, foi desenvolvida a metodologia TMD (GOMES, 2010), utilizada como base deste trabalho.

O desenvolvimento da metodologia adotou as terminologias das principais correntes de pensamento do tema análise de riscos geológico-geotécnicos, propostas pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – ABGE, Australian Geomechanics Society – AGS, International Society for Rock Mechanics – ISRM, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – ISSMGE e pelos comitês: Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes 32 (2004) e Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes 1 (2008).

Considerando adicionalmente que a expansão da malha ferroviária constitui plano estratégico do governo brasileiro nos próximos anos (DNIT, 2012), evidencia-se o interesse direto no desenvolvimento desse tipo de metodologia. Além das aplicações imediatas da aquisição do conhecimento previsto para facilitar a tomada de decisões com relação à priorização de obras ao longo da ferrovia, a metodologia proposta visa também proporcionar o planejamento dos recursos dispensados à manutenção da via.

A pesquisa apresenta forte caráter de desenvolvimento tecnológico, consubstanciada por uma política estratégica de investimento nacional e formação de recursos humanos em área de grande potencial de desenvolvimento futuro no Brasil.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral deste estudo é desenvolver uma metodologia de análise de riscos geológico-geotécnicos em ferrovias, tendo como estudo de caso a Estrada de Ferro Carajás (EFC) da VALE Mineração S.A. A elaboração do método tem como fundamento os conceitos e as técnicas clássicas das Análises de Risco, nos conceitos dos processos geodinâmicos e nos princípios clássicos da engenharia geotécnica.

O estudo visa desenvolver a aplicação de técnicas de identificação e de avaliação do risco de paralisação da ferrovia, devido aos processos geodinâmicos, com base no cruzamento e na sistematização dos dados consolidados do projeto da ferrovia estudada, levando-se em conta a natureza distinta dos seus diferentes domínios geológico-geotécnicos, sob os seguintes aspectos:

- Relevância dos atributos dos processos de alteração do meio físico;
- Distribuição das alterações do meio físico no tempo e no espaço;
- Magnitude das alterações e confiabilidade das alterações previstas;
- Desenvolvimento da metodologia em uma plataforma computacional (software GEOVIA).

A proposta inclui o desenvolvimento de uma metodologia de natureza quantitativa, específica para ferrovias, a partir de técnicas de Matriz de Criticidade e padrões de análise de riscos geotécnicos.

1.3. ESTRUTURAÇÃO DO LIVRO

No desenvolvimento proposto neste estudo, os assuntos foram ordenados de acordo com a seguinte estruturação geral:

- Capítulo 1: contextualização da pesquisa, conceitos a serem explorados e os objetivos a serem alcançados;
- Capítulo 2: metodologia adotada na pesquisa e no desenvolvimento dos trabalhos;
- Capítulo 3: apresentação do empreendimento escolhido para estudo de caso, seguida de uma descrição dos aspectos gerais do meio físico da área;

- Capítulo 4: revisão bibliográfica dos temas de contorno para o desenvolvimento da metodologia, buscando a definição dos conceitos clássicos da terminologia de análises de risco e suas principais premissas no foco do tema de estudo proposto;
- Capítulo 5: apresentação do desenvolvimento da metodologia proposta, subdividida em duas fases principais, com a aplicação da metodologia para o estudo de caso e apresentação dos resultados obtidos:
- Capítulo 6: apresentação do *software* desenvolvido na pesquisa para análise dos riscos geológico-geotécnicos em trabalhos de controle/manutenção de ferrovias;
- Capítulo 7: apresentação das principais conclusões e considerações acerca da metodologia proposta e de sua aplicação ao estudo de caso considerado, com algumas proposições de pesquisas complementares.



METODOLOGIA DA PESQUISA

A elaboração deste trabalho foi realizada em duas fases principais:

1ª Fase: Setorização geológico-geotécnica da via

Assim, a primeira fase do projeto teve como foco a obtenção de dados preliminares para subsidiar a divisão do traçado da EFC em domínios geológicos principais e uma setorização dos aspectos geológico-geotécnicos associados a cada domínio da compartimentação. Como ponto de partida, foram realizados levantamentos e análises de publicações referentes ao objeto do tema em estudo; essa pesquisa bibliográfica foi efetuada com a finalidade de buscar informações relevantes e integradas sobre os seguintes temas:

- Ferrovia e estruturas ferroviárias;
- Revisão bibliográfica dos princípios gerais associados ao tema Risco;
- Seleção de Metodologias de Avaliação de Risco, com objetivo de aferir a metodologia que mais se ajusta a estudos de ferrovias, propondo adaptações e melhorias segundo os objetivos propostos;
- Revisão bibliográfica sobre as técnicas de *brainstorming*, Identificação da Causa Raiz, técnicas de probabilidade de risco (ZIE-GLER, 2003), técnicas de cálculo de simulações de risco (ZIEGLER, 2010) e técnicas estatísticas;
- Levantamentos de mapas topográficos, geológicos, geomorfológicos, pedológicos e hidrológicos no domínio de influência da EFC;

- Levantamento de dados topográficos, geológicos, geotécnicos e hidrológicos associados ao projeto original e de duplicação da EFC;
- Levantamento dos programas de investigações indiretas (geofísicas) e diretas (sondagens mecânicas e ensaios geotécnicos) existentes, assim como os dados de prospecção preliminar de materiais terrosos, granulares e fontes de agregados necessários à construção dos trechos e à duplicação da ferrovia.

No contexto formal dessa fase do projeto, fizeram-se uma sistematização e uma integração de dados preliminares para subsidiar a divisão do traçado da EFC em domínios geológicos principais e uma setorização dos aspectos geológico-geotécnicos de cada domínio. As principais fontes de dados foram as seguintes:

- Projeto Detalhado da Construção da Ferrovia de Carajás (1977/78), que apresenta os dados da concepção do projeto da ferrovia, incluindo os dados do terreno *in situ*;
- Dados do Projeto Básico da Duplicação da Estrada de Ferro Carajás, realizado em 2005;
- Dados de campo da auditoria do gerenciamento de inspeção de campo da Estrada de Ferro Carajás (2009/2010);
- Dados do levantamento topográfico original do traçado da ferrovia (1977/78) na escala 1:2.000.

Todos esses dados foram fornecidos pela Mineração VALE S.A. Os demais dados utilizados foram relativos ao Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (1991, 1994) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e imagens de satélites.

Todos os dados foram georreferenciados individualmente, de forma que todos os trechos foram precisamente ajustados às localizações correspondentes, possibilitando a execução de sobreposições de mapas.

A ferramenta AUTOCAD 2009 foi utilizada para a execução do perfil do traçado, para inserção das unidades estratigráficas e de locação de investigações geotécnicas realizadas (furos de sondagem). A vetorização dos mapas e o georrefenciamento das imagens de satélite foram feitos com o programa *Arcgis* 9.3.

2ª Fase: Elaboração de uma metodologia para diagnóstico e avaliação de problemas geológico-geotécnicos para ferrovias

Cumprida a etapa de obtenção dos dados preliminares para subsidiar a divisão do traçado da EFC, em domínios geológicos principais, e com base na análise dos dados de auditoria das inspeções de campo, foi possível elaborar uma proposta metodológica de diagnóstico de problemas geológico-geotécnicos para ferrovias, baseada no estudo de caso analisado.

O desenvolvimento da metodologia teve como termo geral o tratamento dos dados, análise do comportamento do meio físico e suas inter-relações, identificação dos trechos suscetíveis aos processos de dinâmica superficial, sua magnitude para quaisquer traçados de ferrovia, levando em conta os seguintes aspectos e abordagens:

- Análise do traçado da ferrovia, com base na importância dos atributos dos processos de alteração do meio físico; na distribuição das alterações no tempo e no espaço; na magnitude das alterações e na confiabilidade das alterações previstas;
- Análise do traçado da ferrovia, com base no cruzamento de mapas topográficos, de declividades e geomorfológico;

• Análise do traçado da ferrovia em fases de implantação e manutenção, sob a ótica da dinâmica dos processos de alteração do meio físico (aceleração, amortecimento, uniformidade).

Para o tratamento e a aferição dos dados, as bases cartográficas foram georreferenciadas individualmente, o que possibilitou a execução de sobreposições, de forma que em todos os mapas, os trechos foram precisamente ajustados às localizações correspondentes.

A metodologia foi aplicada à Estrada de Ferro Carajás, envolvendo quatro etapas:

1ª Etapa: Estruturação dos dados e proposição dos índices de criticidade associados a processos geodinâmicos. Essa etapa compreendeu a transcrição dos dados de campo, de forma sistematizada, ao longo do percurso de 892km da ferrovia, que foram divididos em 914 subtrechos. Cada subtrecho foi dividido em três segmentos: Lado Esquerdo (LE), Lado Direito (LD) e Plataforma da Ferrovia (PL). Essa fase incluiu ainda a elaboração, quantificação e aplicação da tabela de índices de criticidade (iC), de ocorrências de processos geodinâmicos, ordenadas de acordo com o princípio da Escala Guttman, no âmbito da Estrada de Ferro Carajás (EFC).

2ª Etapa: Identificação dos trechos com suscetibilidade de ocorrência aos processos geotécnicos. O cálculo da suscetibilidade para os trechos teve como base os princípios do método estatístico de análise *Cluster*, e o método hierárquico pelo critério *Single-Linkage Method*, para gerar os níveis hierárquicos de suscetibilidade (alto, médio, moderado, baixo e irrelevante).

3ª Etapa: Estimativa da vulnerabilidade da ferrovia aos processos geotécnicos. Os valores ponderais dos parâmetros de cálculo dos índices de vulnerabilidade também foram obtidos com base no método estatístico de análise *Cluster* e no método hierárquico do tipo *Single-Linkage Method*.

4ª Etapa: Estimativa do risco geológico-geotécnico para ferrovias. Essa etapa dessa fase e o procedimento final da metodologia proposta consistiram no desenvolvimento de uma sistemática para estimativa dos riscos geológico-geotécnicos em ferrovias, nos seguintes termos:

- Cruzamento de trechos suscetíveis e dos trechos vulneráveis com a natureza da obra geotécnica de cada subtrecho;
- Cruzamento dos valores de LL e IP, lançados no Gráfico de Plasticidade de Casagrande, com os dados da classificação geotécnica de solos SUCS;
- Identificação da causa da distribuição da frequência dos processos geodinâmicos ao longo da via, com base nos dados de índices geotécnicos.

Esses estudos resultaram no desenvolvimento de uma metodologia geral para análise de riscos geológico-geotécnicos associados às ocorrências de eventos geodinâmicos potenciais ao longo da faixa de domínio da ferrovia, expresso em termos de três segmentos distintos: Lado Esquerdo (LE), Lado Direito (LD) e Plataforma da Ferrovia (PL), a partir das seguintes análises:

- Identificação dos riscos associados a eventos geológico-geotécnicos e a eventos de base (*Hazard*) ao longo dos taludes e via permanente da EFC;
- Hierarquização dos riscos, a partir de técnicas de matriz de criticidade, conceito do Número RPN *Risk Priority Number* (BURGUER; BUCHHART, 2002) e de simulações de risco geotécnico (ZIEGLER, 2003; 2010);
- Divisão do traçado da via em domínios geológicos principais e setorização dos aspectos geotécnicos associados a cada domínio.

Como etapa final do processo, foi desenvolvido um *software* específico para aplicação simples, direta e integrada de todas as fases da metodologia proposta neste trabalho (Programa GEOVIA).



ESTUDO DE CASO

3.1. CARACTERIZAÇÃO E LOCAÇÃO DO EMPREENDIMENTO ESTUDADO

De forma geral, é possível definir a ferrovia como um "caminho de ferro". Especificamente, é um caminho formado por trilhos paralelos de aço, assentados sobre dormentes de madeira, concreto ou outros materiais, sobre os quais, correm máquinas de propulsão elétrica, hidráulica ou por combustível, que tracionam comboios de passageiros acomodados em vagões-cabines e cargas acondicionadas em caçambas, contêineres ou tanques. (SCHECHTEL, 1996)

O transporte de passageiros por via férrea é bastante comum na Europa, nos Estados Unidos e no Japão. No Brasil, entretanto, a partir da segunda metade do século XX, o sistema de transporte foi modificado pelo modal rodoviário, impondo ao país um fenômeno incomum e raro na história do sistema ferroviário mundial: a redução da malha ferroviária.

Se, até a década de 1930, a extensão total, considerando os trilhos urbanos, chegava a 34.207km, atualmente o sistema não passa de 29.817km, uma redução de 12,83% em relação ao auge do alcance da malha. (ALMEIDA; OLIVEIRA, 2012)

A empresa VALE Mineração S.A. possui a concessão de uso da Estrada de Ferro Carajás (EFC), substancialmente utilizada para o escoamento dos minérios extraídos e beneficiados pela companhia, provenientes das minas de Carajás, o que representa cerca de 85% do volume anual transportado. A via é também utilizada por terceiros, para transporte de outros tipos de cargas: ferro-gusa, grãos, veículos e combustíveis (representando, juntos, os 15% restantes do volume anual transportado), além do transporte de passageiros. Cerca de 100 milhões de toneladas de minério são transportados anualmente.

A Mina de Ferro de Carajás constitui uma das maiores reservas de minério de ferro de alto teor no mundo. O minério de ferro é extraído e transportado por meio da Estrada de Ferro Carajás – EFC ao longo da Região Amazônica (Figura 3.1), numa extensão total de 892km, ligando a mina até o Porto do Itaqui, localizado na cidade de São Luís, no Maranhão. (Anexo I)



Figura 3.1 - Localização da Estrada de Ferro de Carajás

Em 2010, a VALE S.A iniciou a fase de duplicação de parte de seu traçado, com expansão de todos os 56 pátios de cruzamentos, para possibilitar a manobra e a circulação de composições maiores e para atender a meta de crescimento da produção de minério de ferro da empresa na mina de Carajás (VALE, 2008). O projeto de duplicação da Estrada de Ferro Carajás (EFC), pela natureza, porte e condicionantes geológicogeotécnicos envolvidos, exigiam estudos com uma abordagem analítica muito mais sofisticada que os modelos empíricos convencionalmente adotados ao longo de seu percurso original.

A implantação de uma ferrovia implica diversas intervenções no terreno. A execução de cortes e aterros, a construção de áreas de disposição de resíduos e de zonas de empréstimo, além da busca de jazidas de materiais de construção nas proximidades dos canteiros, para reduzir o custo logístico do suprimento de material, fazem parte do processo de implantação desse tipo de infraestrutura. Segundo Schechtel (1996), o conjunto e as obras de arte da infraestrutura ferroviária praticamente não diferem das obras de arte rodoviárias. A infraestrutura ferroviária é composta por obras de terraplenagem, obras de arte correntes e obras de arte especiais situadas, normalmente, abaixo do greide de terraplenagem, compreendendo:

- a) Obras de Terraplenagem: a superfície final de terraplenagem chama-se leito ou plataforma da estrada de ferro, e podem incluir:
 - Cortes: em caixão ou em meia encosta;
 - Aterros.
- b) Obras de Arte Correntes: são assim chamadas por obedecer a projetos bem padronizados. Podem ser:
 - Superficiais
 - Sarjetas;
 - Valetas de proteção de crista ou de contorno; laterais ou de captação (montante) e de derivação (jusante);
 - Descidas d'água ou rápidos;
 - Bacias de dissipação;
 - Bueiros abertos, fechados (tubulares ou celulares), de greide;
 - Pontilhões.
 - Profundas
 - Drenos longitudinais de corte;
 - Espinhas de peixe;
 - Colchão drenante, etc.
 - Sub horizontais: drenos sub horizontais

- c) Obras de Arte Especiais: aquelas que são objeto de projetos específicos, como:
 - Pontes, pontilhões e viadutos: com estrutura metálica; em concreto armado ou protendido;
 - Túneis escavados ou falsos;
 - Contenções de talude: muros grelhas; cortinas; etc.;
 - Passagens superiores ou inferiores; travessias (para linhas de telecomunicação); condutores de energia em baixa ou alta ten são; tubulações de líquidos ou gases.

A manutenção do complexo de infraestrutura ferroviário, com o fim de manter a integridade da via e seu transporte, está relacionada com etapas anteriores que perfazem desde a concepção do traçado, escolha de percurso, até a implantação da via. Furtado Neto (1999) relata que, na construção das primeiras ferrovias, pouca importância era dada ao estudo da infraestrutura, quanto aos materiais (solos) em que eram feitos os cortes ou com que se construíam os aterros. A partir da metade do século XX, foram estabelecidos os primeiros estudos pormenorizados da plataforma em termos de forma, constituição e tensões confinantes, em função das exigências do tráfego. Esses estudos tiveram lugar, inicialmente, em países de grande desenvolvimento ferroviário, como Alemanha, França, Estados Unidos, Inglaterra e Rússia.

Atualmente o uso de dados sobre a geologia e a litologia da região é primordial para a implantação de estradas, sejam pavimentos rodoviários ou ferroviários, sejam na otimização da implantação da obra, e na manutenção das vias. A CPRM (2009), por exemplo, recomenda a integração das informações de estudos geológico-geotécnicos a partir de modelos geológico-geomecânicos conceituais para análise de concepção de percursos de ferrovias, como ferramenta de identificação dos eventos de risco potenciais ao longo do traçado e eventuais recomendações para

mitigações. Copons e Vilaplana (2008) destacam a necessidade de conhecer a geomorfologia do terreno para a sua correta utilização, reduzindo os riscos de deslizamentos em obras lineares. Os usos desses dados refletem o desenvolvimento desses estudos no Brasil, tendo em vista a prevenção, o monitoramento e a correção de problemas geológico-geotécnicos adversos que podem ocorrer em ferrovias.

A análise de prevenção de deslizamentos e de processos correlatos em ferrovias é bastante relevante, visto que essas obras possuem características intrínsecas de linearidade e grande extensão, desenvolvendo-se por meio de diferentes sítios regionais, com características bem distintas quanto à geologia, ao relevo, à vegetação e a condicionantes geotécnicos.

As ferrovias em geral possuem processos de fiscalização das condições físicas do traçado principalmente no que diz respeito à identificação de possíveis deslizamentos com intuito de preveni-los. No entanto, as práticas comuns de controle e de manutenção do traçado apresentamse ineficazes quando se têm como resposta inúmeros trechos com ocorrências de deslizamentos ao longo do traçado da via, principalmente no período de chuvas.

A carência de abordagem implica, mesmo em períodos de curto prazo, a ocorrência de eventos de movimentos de massa que podem culminar em comprometimentos e até mesmo na paralisação da via, com a necessidade de contínuos procedimentos de manutenção e implantação de obras emergenciais nos trechos afetados. Dentro desse contexto, evidencia-se a necessidade de desenvolvimento de novas ferramentas que possibilitem, pelo menos, a identificação de taludes considerados mais susceptíveis a movimentos de massa, de forma a permitir ações preventivas que minimizem ou regulem a deflagração desses processos.

De maneira geral, segundo a Vale (2010), os principais problemas estruturais encontrados ao longo da EFC podem ser classificados como:

- Erosão;
- Escorregamento em corte;
- Escorregamento em aterro;
- Recalque em aterro e da plataforma.

Os processos erosivos são responsáveis por grande parte dos problemas que ocorrem ao longo da EFC. Sua ação pode ocorrer, destacandose os demais processos ou, de forma combinada, cabendo-lhe o papel, muitas vezes, de agente predisponente à ocorrência de escorregamentos (VALE, 2010).

Ao longo da via, observam-se trechos cujas superfícies de taludes de corte e aterro são mais frágeis que a das encostas naturais, devido ora à exposição dos solos saprolíticos (em cortes – Figura 3.2), ora às deficiências comumente resultantes da utilização de material de má qualidade e/ou de uma inadequada compactação das superfícies dos taludes (em aterro – Figura 3.3). Esses aspectos associados à falta de proteção superficial e à inexistência ou ineficácia de sistemas de drenagem provocam o surgimento de erosão em sulcos e de erosão diferenciada.



Figura 3.2 - Erosão diferenciada no talude de corte no km 408. (VALE, 2010)





Figura 3.3 - Escorregamentos rotacionais em taludes de aterro nos km 399 e km 732+320

Os fatores que afetam a estabilidade dos taludes da EFC próximos às margens dos rios, e caracterizados no presente estudo como erosão fluvial, estão localizados na região em que a ferrovia margeia o rio Pindaré. Esses fatores foram identificados por Vale (2010) pela ação fluvial, devido ao escoamento e à instabilidade geotécnica, resultante da saturação e infiltrações de água. Na região do rio Pindaré, uma das causas principais das instabilidades se deve à ação erosiva das correntes, ou seja, ocorre o solapamento do pé do talude quando a força erosiva exercida pela correnteza do rio é superior à força erosiva limite do material. (Figura 3.4)



Figura 3.4 - Solapamento da base do aterro em contato com o rio Pindaré, no km 346 (VALE, 2010)

A ocorrência de escorregamentos ao longo do traçado da via, tendo a água como principal agente deflagrador, tem origem em diversos fatores. Por esse motivo, são observados com maior frequência no período de inverno, que no norte do Brasil é caracterizado por índice pluviométrico acentuado no período de novembro a março. Esse período é marcado pelas condições mais críticas, devido ao período contínuo de chuvas, de alguns dias, seguido de uma precipitação mais intensa.

Os escorregamentos em corte na EFC ocorrem basicamente de duas formas: a primeira ocorre em taludes de dimensões até 5m de altura, tais como no km 334, 585 representados na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Escorregamentos rotacionais em taludes de corte no km 334 e km 585 em sequência (VALE, 2010)

Para esse tipo de talude, o desencadeamento do evento é geralmente devido à evolução de processos erosivos. São taludes com inclinação acentuada e o sistema de drenagem apresenta deficiências. (Figura 3.6)



Figura 3.6 – Vista de taludes do km 333 e km 578+950 em sequência, erodidos apresentando escorregamentos recentes (VALE, 2010)

A segunda forma são os taludes caracterizados por alturas superiores a 5m, localizados entre os km 300 e km 450, onde os escorregamentos são devidos, geralmente, à evolução das erosões no solo arenoso e arenosiltoso e/ou também deficiências no sistema de drenagem. (Figura 3.7)



Figura 3.7 - Escorregamentos planares localizados nos km 388 e km 392 da EFC (VALE, 2010)

Já os escorregamentos em aterros são observados ao longo de toda EFC, intensificando-se a partir do km 200, devido ao tipo de relevo mais acentuado, que condiciona situações mais desfavoráveis, como mostra a Figura 3.8. Geralmente as estabilizações estão associadas a problemas de fundações, de corpo do aterro, em travessias de linhas de drenagem e também devido a problemas com os sistemas de drenagem e proteção superficial. (VALE, 2010)



Figura 3.8 - Obra de recuperação do aterro da ferrovia devido a escorregamento no km 671 em abr/2008. (VALE, 2010)

Por fim, dentre os principais problemas na estrutura da EFC, o rebaixamento da plataforma é um dos mais preocupantes, pois os eventos nesse segmento causam paralisação da via e de seu transporte. Basicamente, a linha férrea está assentada sobre aterros ou cortes "in situ". Nos

casos de recalque do aterro, as causas mais comuns são a baixa capacidade de suporte da fundação associada com o nível d'água elevado ou acúmulo de água na plataforma, causado por deficiência de drenagem (Figura 3.9). Já para a plataforma sobre o terreno natural, o processo de abatimento está, de modo geral, associado ao fenômeno conhecido como "*mud pumping*" – ou bombeamento –, que ocorre em solos silto-argilosos saturados, de consistência média para baixa, quando submetidos a esforços pulsantes excessivos. (VALE, 2010)



Figura 3.9 – Vista da plataforma com água acumulada devido ao assoreamento do bueiro causado pela erosão do talude no km 403+741. (VALE, 2010)

Conforme apresentado, a Estrada de Ferro Carajás possui diversos problemas de origem geológico-geotécnico que envolvem a natureza de sua obra de construção, apresentando, assim, problemas distintos em áreas de corte, de aterro, ou mesmo de corte/aterro, dependendo da extensão do trecho na ferrovia. Ressalta-se que a manutenção do complexo de infraestrutura ferroviário, com o fim de manter a integridade da via e seu transporte, está relacionada com etapas anteriores que perfazem desde a concepção do traçado, a escolha de percurso, até a implantação da via.

3.2. CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA DA VIA

Dentro do contexto geológico regional, a Estrada de Ferro Carajás percorre, na maior parte de seu trajeto, dois tipos de materiais: sedimentos arenosos e argilosos pouco consolidados da Formação Itapecuru, que compreendem ainda passagens por depósitos aluvionares recentes, argilosos e silto-arenosos nas áreas da baixada e nos vales maiores dos principais rios; e sedimentos referentes à Cobertura Dentrítica Laterítica, caracterizados, de forma simplificada, por produtos de arenitos quartzosos, caulínicos, com estratificações cruzadas, que podem estar presentes em depósitos terciários interiores. (CPRM, 1994; VALE, 2010)

O terreno de fundação, em praticamente toda extensão da ferrovia (892 km), é composto por maciço terroso, e apenas em um pequeno trecho próximo de Carajás, na altura dos trechos do km 851+700, do km 853+900 e do km 856+00, ocorre corte em solo residual da Formação Granito Cigano. (VALE, 2010)

A Formação Itapecuru e a Cobertura Dentrítica Laterítica originaram-se de deposições ocorridas nos períodos Cretáceo e Terciário, respectivamente, em ambientes continentais, fluviais e lacustres. Apresentam-se em camadas e lentes sub-horizontais, como consequência das condições de deposição e da relativa estabilidade tectônica da bacia sedimentar, desde a época de deposição daqueles sedimentos. A espessura da Formação Itapecuru é de centenas de metros, de forma que, em superfície, ao longo do traçado, não são esperadas ocorrências litológicas diferentes daquelas verificadas em subsuperfície. Na região do Campo de Perdizes, constituída essencialmente por argilas siltosas moles, às vezes orgânicas, pretas, cinzentas e amarelas, com intercalação de veios de areias finas, as espessuras desses depósitos são muito variáveis, indo desde alguns metros a cerca de 40m. (CPRM, 1994)

No trecho entre o km 730 e o km 795, a ferrovia atravessa depósitos metassedimentares da Formação Couto Magalhães, constituída principalmente por filitos e xistos de granulação fina. Em alguns locais ao longo do eixo da ferrovia, é possível observar depósitos da Formação Itapecuru.

Nos segmentos do km 795 ao km 892, aproximadamente, a ferrovia percorre unidades metamórficas de médio a alto grau e sequências metavulcanossedimentares. Também podem ocorrer, de forma localizada, depósitos sedimentares e intrusões graníticas.

No km 830, a ferrovia passa sobre terrenos de origem metamórfica, constituídos tanto pela sequência metavulcanossedimentar, quanto por rochas metamórficas do Complexo Xingu. Nesse grupo de rochas, podem ser encontrados xistos variados, formações ferríferas bandadas e granitoides. Já as rochas intrusivas, representadas pelo Granito Cigano, ocorrem num pequeno trecho de cerca de 20 quilômetros, que vai do km 850 ao km 870, aproximadamente, e geram solos residuais maduros de composição predominantemente arenosa. (CPRM 1991; VALE 2010)

A Tabela 3.1 apresenta, de forma sucinta, as distribuições litoestratigráficas e os materiais de cobertura ao longo da ferrovia. O mapa geológico do percurso da ferrovia elaborado neste estudo, para compreensão do arcabouço geológico do percurso da Estrada de Ferro Carajás (EFC), é apresentado no Anexo II deste documento.

Já a Tabela 3.2 tem por intuito complementar as informações a respeito do meio físico no qual a ferrovia se estende traduzindo, de forma esquemática, a distribuição das unidades geomorfológicas. O mapa de geomorfologia do percurso da EFC é apresentado no Anexo III deste trabalho.

Tabela 3.1 – Unidades litológicas por trecho da Estrada de Ferro Carajás. (VALE, 2010)

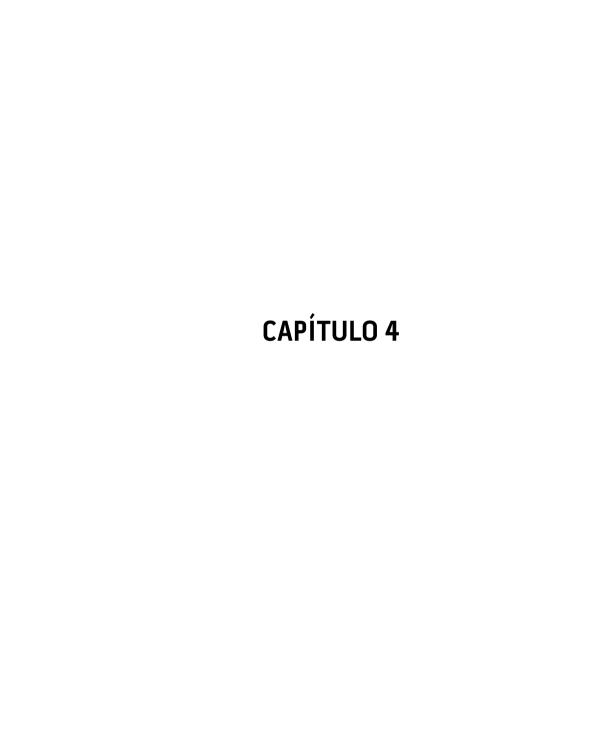
Ge	eologia		Ambiente	Locais de	Materiais de	
	Idade	Litologia	deposicional	ocorrência na ferrovia	cobertura	
Terraços superficiais	Quaternário	Aluviões, cascalhos, areias e argilas	Depósitos marinhos, flúvio-aluviais e solos laterí- ticos	km 20 ao km 130 (depósitos com influência marinha e latossolos). Entre os km 130 e 165 (rio Mearim) 620 e 730 (rio Tocan- tins) são compos- tos por sedimentos flúvio-lacustres. Também ocorrem em áreas restritas nas drenagens.	Solos argilosos, arenosos ou siltosos, por vezes conglomeráticos, podendo ocorrer intercalados em camadas horizontalizadas. Podem ser mal selecionados (aluviais) ou bem selecionados, quando de origem fluvial.	
Тепаçоs	Terciário	Arenitos, conglomera- dos siltitos e argilitos caulínicos. Laterita fer- ruginosa ou aluminosa	Sedimentos terrígenos.	Mapeáveis, muitas vezes, em função da escala. Observados na Ilha de São Luís (km 0 ao km 20) e entre os km 330 e km 550, na região que corres- ponde ao Planalto de Pindaré.	Solos predo- minantemente argilosos ou argilo-siltosos. Podem conter depósitos areno- sos ou pedregu- lhosos.	
Bacias Mesozoicas	Cretáceo Superior	Arenitos, níveis de siltito e argila	Sistema fluvial com contribuição lacustre, lagu- nar ou estua- rino. Presença de depósitos eólicos	Corresponde, principalmente, à Formação Itapecu- ru. Ocorre do km 165 ao km 620, sendo que do km 330 ao 550 essa formação ocorre sob solos laterí- ticos, expostos ocasionalmente.	Solos com grande variação granulo- métrica, podendo ocorrer mudanças bruscas de textu- ra/granulometria laterais ou verti- cais. Distribuídos em camadas horizontalizadas.	

Nivel Crustal	Proterozoico	Superior	Arenitos, filitos, xistos de granu- lação fina a ardósias, grauvacas e conglomera- dos	Metassedi- mentos e sedimentos continentais	Correspondem aos metassedimentos da Formação Couto Magalhães e estão distribuídos ao longo dos km 730 a 795. Nesse intervalo, também podem ocorrer, sobrejacentes a ela, sítios de sedimentos da formação Itapecuru.	Ocorrem, geralmente, sob forma de solo residual maduro (maioria de filito quartzoso ou sericítico), com estruturas reliquiares (foliação e fraturas) causando planos preferenciais de escorregamento. Nos leitos dos cursos d'água, podem ocorrer sob a forma de rocha sã ou pouco alterada.
		Médio	Granitos e pegmatitos	Intrusivas ácidas	Entre os km 850 e 870, aproxima- damente.	Solo residual maduro de composição predominante- mente arenosa.
		Arqueano	Micaxistos e quartzitos, formações ferríferas, granulitos básicos a ácidos	Rochas metassedimentares de baixo grau a suítes de alto grau metamórfico. Sequências metavulcanossedimentares	Do km 795 até o final da ferrovia (km 893), com exceção do tre- cho entre os km 850 e 870.	Solo residual maduro de textura silto-a- renosa (areia fina) ou solos argilosos.

Tabela 3.2 – Unidades geomorfológicas por trecho da Estrada de Ferro Carajás. (VALE, 2010)

Locais de ocorrência na ferrovia (localização aproximada)	km 20 ao 30	Encontrado no terraço aluvial dos rios Mearim e Grajaú, km 130 a 165.	Localizado entre os km 620 e 730 (planície aluvial do rio Tocantins)	km 0 ao km 20	km 30 ao km 130 (depósitos ter- ciários) e entre km 165 ao km 250 (Formação Itapecuru)
Descrição: Aspectos Geomorfológicos	Áreas planas recortadas por canais, formando ilhas em alguns trechos: resultam da acumulação flúvio-marinha, constituída por sedimentos quaternários inconsolidados, com solos indiscriminados de mangue.	Áreas inundadas e/ou sujeitas a inundações, constituídas por depósitos flúvio-marinhos holocênicos, onde dominam os gleissolos e solos aluviais.	Áreas planas compostas por aluviões holocênicos, sujeitas a inundações durante as enchentes; correspondem às várzeas e terraços; ocorrência de solos aluviais e/ou gleissolos.	Relevo plano em aberturas detríticas com latos- solos, localmente dissecado em lombas e colinas.	Superfície rampeada em direção ao litoral, modelada nos siltitos, argilitos e por vezes arenitos argilosos da Formação Itapecuru, em relevo plano com plintossolos.
Unidades Geomorfoló- gicas	Planícies Litorâneas	Baixada Maranhense	Planícies e Terraços Fluviais	Tabuleiros Costeiros Maranhenses	Superfície Sub litorânea do Bacabal
Domínios Morfoes- truturais	Depósitos Sedimentares Quaternários e Terciários				

ao rio Gurupi, m intercalações ão Itapecuru.	cadas, com topos km 330 ao km 550 os.	drenagem. Apre- com declividade km 550 ao km 620 e entre os km 730 e 785	direção à drena- km 785 ao 795	ação fluvial, do Entre ao km 795 e 893 (faixa de transição com a morf. Serra dos Carajás)	ao fluvial do tipo Entre o km 795 a 893 (faixa de tran-
Superfície rampeada em direção ao rio Gurupi, talhada em siltitos e argilitos com intercalações de arenitos argilosos da Formação Itapecuru.	Relevos planos e vertentes dissecadas, com topos convexos e vales pouco profundos.	Constituídos por colinas dissecadas e relevos planos rampeados em direção à drenagem. Apresentam vales pouco profundos com declividade das vertentes medianas a suaves.	Relevos planos rampeados em direção à drena- gem.	Relevos modelados por dissecação fluvial, do tipo colinoso.	Relevos modelados por dissecação fluvial do tipo tabular denotando eventual controle estrutural
Depressão de Gurupi	Depressão de Gurupi Planalto Dissecado do Pindaré/Grajaú Tabuleiros Paraenses		Depressão do Médio Baixo Araguaia	Depressão do Médio Xingu	Serra dos Carajás
	Cobertura es Fanero	as Sedimen- zoicas	Cinturões Móveis Neoproterozoicos		rozoicos



CONCEITOS E ANÁLISES DE RISCO

4.1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Varnes (1984), em seu trabalho realizado para a Associação Internacional de Geologia de Engenharia e publicado pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura – UNESCO, propôs uma definição formal para diferentes sentidos de risco, como risco específico, *hazard* e vulnerabilidade, com o objetivo de normatizar a terminologia aplicada a estudos nas áreas geológica e geotécnica.

No Brasil, Augusto Filho *et. al.* (1990), num contexto de acirrados debates internacionais, propuseram uma normatização nacional dos termos, conceitos e nomenclaturas associados ao tema risco. Para Nogueira (2002), esse turbulento movimento de construção conceitual é característico e essencial para a configuração de um campo multidisciplinar do conhecimento técnico-científico. Passados mais de dez anos do século XXI, os debates continuaram, porém, em termos menos conflitantes. Atualmente, os conceitos mais usuais são aqueles recomendados por grandes associações da categoria, como a AGS, ISSMGE, ISRM, IAEG, além da ISO 31.000.

Com o intuito de apresentar o suporte conceitual do objeto deste trabalho apresenta-se, a seguir, uma síntese do estabelecimento dos diferentes conceitos associados aos riscos, incluindo as concepções de suscetibilidade e a vulnerabilidade. Essa apresentação reflete a evolução dos conceitos e o movimento de uma normatização dos termos nos últimos anos.

4.1.1 Risco

O conceito de risco vem sendo motivo de discussão desde a década de 1970, com grande diversidade de conceitos e de terminologias. Também são amplamente relatadas as dificuldades encontradas para se estabelecerem conceitos gerais a respeito do tema risco, do termo *hazard*, assim como para os conceitos de suscetibilidade e vulnerabilidade, usados nas estimativas de risco e avaliação de risco. Em 1981, um comitê da *United States Society for Risk Analysis*, como resultado de quatro anos de estudos, publicou 14 diferentes definições sobre risco (FELL, 1994). Ressaltou-se que as definições não poderiam alcançar uma ampla concordância e recomendou-se que não fosse estabelecida uma definição única e simples de risco, mas que o termo fosse adequado de forma mais apropriada para cada caso.

Naturalmente, as conceituações e as padronizações são fundamentais para a elaboração e determinação de metodologias de avaliação de risco, seja de qual for à área de estudo. Maljazova e Cjalov (2004) ressaltam a ampla difusão do termo "risco" na vida atual e seu amplo uso na ciência. No entanto, até o momento, não existe uma definição universal do termo, como se pode constatar nas diferentes concepções sistematizadas na Tabela 4.1; porém, o sentido e sua compreensão mais gerais são interpretados como uma "probabilidade de ameaça".

Tabela 4.1 – Diferentes proposições do conceito de risco

Ano	Autor	Risco
1984	Varnes	O número esperado de vidas perdidas, pessoas feridas, danos à propriedade e interrupção de atividade econômica, devido a um fenômeno particular para uma dada área e período de referência.
1990	Augusto Filho et. al.	Representa a possibilidade ou probabilidade de ocorrência de algum dano a uma população (pessoas, estruturas físicas, sistemas produtivos) ou a um segmento dela. É uma condição potencial de ocorrência de um acidente.
1993	Zuquette	É a probabilidade de que ocorram perdas (econômicas, sociais e ambientais), além de um valor ser considerado normal ou aceitável para um lugar específico, durante um período de tempo determinado. É considerado o resultado da relação entre um hazard e vulnerabilidade dos elementos expostos (seres humanos, residências, entre outros).
1993	Cerri	Situação de perigo, perda ou dano, ao homem e às suas propriedades, em razão da possibilidade de ocorrência de processos geológicos, induzidos ou não.
1993 - 1996	Cardona <i>apud</i> (Nogueira, 2001)	É obtido pela correlação da probabilidade de ocorrência de eventos perigosos (de consequências econômicas e sociais em um determinado local e em certo período de tempo (A) e da Vulnerabilidade (V) dos elementos expostos a tais ameaças, matematicamente expresso como a probabilidade de exceder um nível.).
1995	ABGE	Processo, situação ou evento no meio geológico de origem natural, induzidos ou mistos, que pode gerar um dano econômico ou social para as comunidades, cuja previsão, prevenção ou correção irão empregar critérios geológicos.
1997	IUGS-WGL - Int. Union Of Geological Sciences (Landslide Working Group)	Uma medida da probabilidade e gravidade de um efeito adverso para a propriedade, à saúde ou meio ambiente. Segue em notas que "Risco é estimado pelo produto de consequências X probabilidades". No entanto, uma interpretação mais geral de risco implica uma comparação da probabilidade e consequências de uma forma de não produto.
1998	Carvalho	Consequência, ou dano esperado de eventos aleatórios associados a processos de instabilização de maciços naturais, artificiais ou obras geotécnicas.

2004	JTC32 ¹	Medida da probabilidade e gravidade de um efeito adverso à saúde, vida, propriedade ou ao ambiente. Quantitativamente, Risco = Hazard x <i>Potencial Worth of Loss</i> . Isso pode ser também expressado como "Probabilidade de um evento adverso x consequências se o evento ocorre".
2005	Amaro	Função da natureza do perigo, acessibilidade ou via de contato (potencial de exposição), características da população exposta (receptores).
2005	Einstein	Função da probabilidade de ocorrência da ameaça e das consequências, o qual pode envolver perdas de vidas ou ferimentos a pessoas, perdas de capital ou danos ambientais não monetários.
2007	Dagnino e Crapi Jr.	Presente em situações ou áreas em que existe a probabilidade, a suscetibilidade, a vulnerabilidade, o acaso ou o azar de ocorrer algum tipo de ameaça, perigo, problema, impacto ou desastre.
2007	AGS	Uma medida da probabilidade e gravidade de um efeito adverso à saúde e ao ambiente. O risco é frequentemente estimado pelo produto da probabilidade e consequências. No entanto, uma forma mais geral de interpretação do risco implica uma comparação da probabilidade e as consequências de uma forma não-produto.
2008	USGS - United States Geological Survey	Risco de escorregamento: a probabilidade de consequências prejudiciais (o número esperado de vias perdidas, pessoas feridas, extensão de danos à propriedade ou a sistemas ecológico, ou interrupção das atividades econômicas) dentro de uma área sujeita a escorregamentos. O risco pode ser de abrangência individual ou coletiva, resultante da interação entre a ameaça e a vulnerabilidade individual ou coletiva.
2009	ABNT NBR ISO 31.000	Efeito ² da incerteza nos objetivos ³

¹ Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes 32 realizado em 2004 com as instituições ISSMGE, ISMR e IAEG.

² Um efeito é um desvio em relação ao esperado – positivo e/ou negativo.

³ Os objetivos podem ter diferentes aspectos (tais como metas financeiras, de saúde, de segurança e ambientais) e podem aplicar-se em diferentes níveis (tais como estratégico, em toda a organização, de projeto, de produto e de processo).

4.1.2. Hazard

O termo *hazard* pode ser entendido como ameaça ou perigo, quando traduzido de forma literal do inglês. No Brasil, em diversos estudos científicos nas áreas geológicas e geotécnicas, o termo não possui entendimento comum entre os pesquisadores, podendo ser entendido como perigo, ameaça, suscetibilidade, ou mesmo como risco.

Apresentam-se na tabela 4.2 alguns conceitos do termo *hazard*, expostos por diferentes autores, para as áreas geológicas e geotécnicas.

Tabela 4.2 – Diferentes proposições do conceito de hazard

Ano	Autor	es proposições do conceito de <i>nazard</i> Risco
1984	Varnes ⁴	A probabilidade de ocorrência de um processo potencialmente danoso numa determinada área e num certo período de tempo.
1993	Zuquette	Evento perigoso: representa um perigo (latente) que se associa a um fenômeno de origem natural ou provocado pelo homem, que se manifesta em um lugar específico, em tempos determinados, produzindo efeitos adversos nas pessoas, nos bens, e/ou no meio ambiente.
1994	Fell	Refere-se ao potencial de ocorrência de um es- corregamento de terra que cause danos em uma área; tal dano poderia incluir perdas de vida ou lesões, danos a propriedades, perturbação social e econômica ou degradação do meio ambiente.
1997	Einstein	Trabalha com a incerteza de um perigo, com a sua previsibilidade limitada. É a probabilidade de que um perigo particular ocorra em um determi- nado período de tempo.
1997	IUGS-LWG In- ternational Union of Geological Sci- ences – (Landslide Working Group)	Uma condição com potencial para causar consequências indesejáveis. Ameaças de escorregamento devem ser descritas por zonas e magnitudes.
1998	ABGE	Caracterizou como melhor termo para <i>hazard</i> , nas áreas geotécnicas, a palavra suscetibilidade.
1998	Rodrigues-Car- valho	Perigo natural: a probabilidade de ocorrência, num determinado período de tempo e numa dada área, de um fenômeno potencialmente danoso (extraída de <i>United Nations Disaster Relief</i> <i>Office</i> - UNDRO, 1992).
2004	JTC32	O potencial de que uma ameaça particular ocorra dentro de um determinado período de tempo.
2007	ASG	Uma condição com o potencial de causar uma consequência indesejável. Na descrição de deslizamento de terra, o <i>hazard</i> deve incluir o local, o volume (ou área), a classificação e a velocidade dos deslizamentos e a probabilidade da sua ocorrência ao longo de um determinado período de tempo.
2008	USGS - United States Geological Survey	Hazard para escorregamento de terra: refere-se ao potencial de ocorrência de um escorregamento de terra que cause danos dentro de uma área. Tais como: perdas de vidas ou lesões, danos à propriedade, perturbação social e econômica, ou degradação do meio ambiente.

-

 $^{^{\}mbox{\tiny f}}$ Varnes (1984) e Fell (1994) destacam que o termo "hazard" não deve ser restrito a fenômenos naturais.

Em 1992, um levantamento entre os congressistas na 6ª Conferência em Geomecânica na Austrália, mostrou que os termos ameaça (*hazard*) e risco (*risk*) foram utilizados quase como equivalentes para definir a probabilidade de escorregamento e dos danos nos eventos de escorregamentos. Sobreira (2001) ressalta a constante confusão gerada pelas traduções dos termos, utilizados muitas vezes como sinônimos, sendo um constantemente tomado pelo outro.

4.1.3. Suscetibilidade e vulnerabilidade

Os conceitos de suscetibilidade e vulnerabilidade estão intimamente associados ao conceito de risco, e também são objeto de amplo debate de definições, particularmente a vulnerabilidade (Tabela 4.3). No Brasil, a discussão sobre suscetibilidade e vulnerabilidade tem sido focada na hierarquização espacial e elaboração de índices, com o objetivo de avaliar as desigualdades sociais, ambientais e reduzir riscos associados a desastres naturais.

A suscetibilidade refere-se essencialmente em termos da probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenômeno numa dada área, tendo em conta os fatores condicionantes inerentes ao terreno, independentemente do seu período de recorrência, ou seja, a suscetibilidade reflete uma probabilidade espacial, mas não temporal.

O conceito de vulnerabilidade é bastante mais abstrato e propenso a variantes diversas. Segundo Lavell (2001), para uma ameaça ou um perigo existir, é necessária a existência da vulnerabilidade. Se não há propensão para a ocorrência de danos frente a um determinado evento físico, não há ameaça, não há risco, há apenas eventos físicos, naturais, sociais ou tecnológicos sem repercussão na sociedade.

Os avanços nas discussões para desenvolver tipos de metodologias capazes de traduzir o abstrato conceito de vulnerabilidade em ferramentas práticas para aplicação indicam a tendência de operacionalizar o conceito, principalmente no sentido de sua mensuração (quantitativa ou semiquantitativa) e hierarquização espacial. Van Westen (2005, 2008)

sintetizou: "O problema com a avaliação de vulnerabilidade é que existem muitos tipos de deslizamentos de terra, e que todos devem ser avaliados separadamente".

Tabela 4.3 – Diferentes proposições dos conceitos de vulnerabilidade e suscetibilidade

Ano	Autor	Vulnerabilidade	Suscetibilidade
1984	Varnes	Grau de perda de potencial (dano) de um dado elemento ou conjunto de elemento, sem risco resultante da ocorrência de fenômeno de catástrofe (desastres naturais) de uma determinada magnitude. Ela é expressa numa escala de 0 (ausência de danos) até 1 (perda total).	
1993	Zuquette	Característica intrínseca de um sujeito, sistema ou elemento que estão expostos a um evento perigoso (<i>hazard</i>), correspondendo à predisposição destes em serem afetados ou suscetíveis a perdas. É expressa em uma escala que varia de 0 (sem perdas) a 1 (perdas totais).	Possibilidade de que um escor- regamento ocorra em uma área, com base nas condições do ter- reno local. A suscetibilidade não considera, de forma explícita, a probabilidade de ocorrência que também dependa da recorrência de fatores de disparo, tais como as precipitações ou sismos.

1994	Fell	É o grau de perda para um dado elemento ou conjunto de elementos dentro de uma área afetada pelo(s) escorregamento(s). É expressa na escala de 0 (sem danos) a 1 (perda total). No caso de perda de vida sem escorregamento, a vulnerabilidade é a probabilidade de que uma vida em particular seja perdida, dada à ocorrência do escorregamento. Sugere-se a vulnerabilidade total (V), determinada como o produto de vários componentes na forma V = VS x VT x VL, onde VS é a probabilidade de impacto espacial, VT é a probabilidade de impacto temporal e VL, a probabilidade de perda de vida de um ocupante individual da área impactada.	Ao escorregamento, referindo- se à possibilidade de que o es- corregamento ocorra em uma área com base nas condições do terreno local. A suscetibili- dade não considera, de forma explícita, a probabilidade de ocorrência, que também depende de recorrência de fatores de disparo, tais como as precipitações ou sismos.
1996	Soeters e Van Westen		Propensão de uma determina- da área de ser afetada por um (certo tipo) de deslizamento de terra, baseado, unicamente, em condições do terreno, não apresentando a probabilidade de ocorrência dos fenômenos.
1997	INGS-WGL	Grau de perda de potencial para um dado elemento ou grupo de elementos dentro da área afetada por um escorrega- mento.	

2001	Nogueira	Suscetibilidade dos elementos expostos a esta ameaça (pessoas, estruturas físicas, sistemas produtivos e componentes do ambiente) de sofrer danos e prejuízos caso ocorra o evento conforme prognosticado, por estar na área de influência do evento, por sua fragilidade física frente a ele e pela incapacidade de resposta e deficiência para absorver o impacto. Esta suscetibilidade está condicionada às características intrínsecas, conjunturais ou ambientais dos elementos expostos.	
2004	JTC32	O grau de perda para um determinado elemento ou conjunto de elementos dentro da área afetada por um acidente (ameaça). Ela é expressa numa escala de 0 (sem perda) a l (perda atotal). Além disso, trata-se de um conjunto de condições resultantes de processos físicos, social, econômico e fatores ambientais, que aumentam a suscetibilidade de uma comunidade ao impacto das ameaças.	Ao escorregamento, envolve classificação de área, ou volume (magnitude) e distribuição espacial e potencial de deslizamento de terra na área de estudo. Pode também incluir uma descrição da distância de deslocamento, velocidade e intensidade do atual ou potencial escorregamento.
2005	Zêzere		Como a probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenômeno numa dada área, tendo em conta os fatores condicionantes existentes no terreno, independentemente do seu período de recorrência, ou seja, a suscetibilidade reflete uma probabilidade espacial, mas não temporal.

2007	ASG concordando com ISSMGE JTC 32 (2004)	Grau de perda para um determinado elemento ou conjunto de elementos dentro da área afetada pelo escorregamento. Ela é expressa numa escala de 0 (sem perda) a 1 (perda total). Para uma propriedade, a perda será o valor do dano em relação ao valor da propriedade; para pessoas, será a probabilidade que uma determinada vida (elemento em risco) será perdida, quando afetadas pelo deslizamento.	A avaliação quantitativa ou qualitativa da classificação, volume (ou área) e distribuição espacial dos deslizamentos de terra que existem, ou potencialmente pode ocorrer em uma área. A suscetibilidade pode também incluir uma descrição da velocidade e da intensidade do escorregamento existente ou potencial.
2008	USGS	Ao escorregamento de terra, refletindo a extensão das perdas potenciais para um dado elemento, ou conjunto de elementos, dentro de uma área afetada pela ameaça, expressa na escala de 0 (sem perdas) a 1 (perda total); vulnerabilidade é formada por condições físicas, sociais econômicas e ambientas.	Ao escorregamento, possibilida- de de que um escorregamento ocorra em uma área com base nas condições do terreno local. A suscetibilidade não considera de forma explícita a probabili- dade de ocorrência, que tam- bém depende da recorrência de fatores de disparo, tais como precipitações ou sismos.

Segundo Glade (2005), as informações de vulnerabilidade devem ser oriundas de estudos históricos em primeiro lugar, mas podem ser combinadas com métodos de modelagem e abordagens empíricas. Birkmann (2006) estabeleceu proposições múltiplas da vulnerabilidade, em diferentes níveis de abordagem (Figura 4.1).

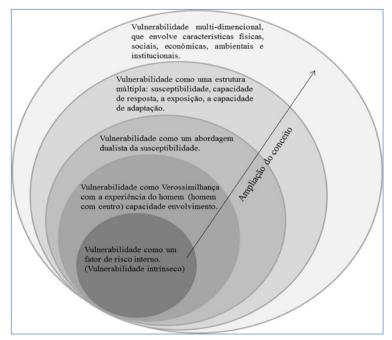


Figura 4.1 – Diferentes abordagens do conceito de vulnerabilidade (BIRKMANN, 2006)

O autor também destaca a importância de mensurar a vulnerabilidade, sendo este um pré-requisito essencial para a redução dos riscos de desastres, conquanto implique uma habilidade para, ao mesmo tempo, identificar e entender exatamente quais são as diversas vulnerabilidades cuja origem são os desastres naturais. Nesse contexto, propõe uma "redução" na quantidade de dados coletáveis, para um conjunto de indicadores e critérios relevantes, que facilitem uma avaliação ou estimação exequível da vulnerabilidade.

Embora tenha havido contribuições de quantificação de risco e vulnerabilidade na primeira década do século XXI, os estudos de risco associados a movimentos de massa tendem a ser qualitativos, em sua grande maioria. Fell et. al. (2008), em artigo emblemático Guidelines for land slide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning, destacaram a necessidade crescente de uma gestão de riscos quantitativa, o que exigiria métodos quantitativos para análise de movimentos de terra, de ameaças e do próprio risco. Os autores ressaltam ainda que os estudos nessa área encontram-se em momento favorável gracas ao desenvolvimento de técnicas de SIG e melhorias metodológicas que tornam o zoneamento de risco quantitativo mais viável. Porém, o antigo problema de uniformidade de termos, de nomenclatura e de diretrizes para o zoneamento de risco, antecede o problema da falta de métodos quantitativos. Por isso, é necessária uma formulação clara de diretrizes para o zoneamento de risco e consequente uniformização das nomenclaturas e conceitos.

Nesse propósito, os autores apresentaram proposições para tais diretrizes, formuladas a partir de um esforço conjunto no *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes 1* (JTC1) com as instituições ISSMGE, ISMR e IAEG, e de orientações propostas pela AGS (2007), estabelecidas nos seguintes termos:

- Definições e terminologia para uso internacional;
- Descrições dos tipos e níveis de zoneamento dos deslizamentos de terra;
- Orientações sobre o zoneamento onde o deslizamento de terra e o planejamento do seu uso são necessários para responder por deslizamento de terra;
- Definições de níveis de zoneamento e escalas sugeridas para o zoneamento e mapas, tendo em conta as necessidades e objetivos do planejamento do uso e ocupação e dos reguladores, e a finalidade do zoneamento;

- Orientações sobre a confiabilidade, a validade e as limitações dos métodos;
- Aconselhamento sobre as qualificações dos parâmetros.

Com o intuito de propor uma uniformidade nas nomenclaturas e nos seus usos, Fell *et. al.* (2008) defendem que as definições adotadas pelo *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes* 32 (JTC32), de 2004, devem ser usadas para todos os zoneamentos, relatórios, documentos de ordenamento territorial e estudos afins.

A padronização dos termos e a uniformização dos conceitos e nomenclaturas são essenciais para o avanço dos estudos de risco geológico-geotécnico. Ao longo da reflexão dos conceitos ligados a esse tema, notou-se uma evolução em direção a uma homogeneização geral, como um passo adiante para o desenvolvimento dos estudos relacionados a deslizamentos de terra ou movimentos de massa.

Por fim, neste trabalho, os conceitos adotados para risco, *hazard*, suscetibilidade e vulnerabilidade seguem as prescrições do glossário elaborado pelo JTC 32 (2004) e as diretrizes gerais propostas por Fell *et. al.* (2008).

4.2. CLASSIFICAÇÕES DE RISCO

Os processos geodinâmicos induzidos ao longo do traçado de uma ferrovia podem levar à interdição da via. Assim, nesse caso, o conceito de risco permeia a ideia do risco geológico (Tabela 4.4), tal como proposto por Suguio (1999, *apud* NOGUEIRA, 2002), no qual lista uma série de eventos de riscos de origem predominantemente natural.

Tabela 4.4 - Eventos de riscos (SUGUIO,1999 apud NOGUEIRA, 2002)

RISCOS E PROBLEMAS GEOLÓGICOS DE ORIGEM PREDOMINANTEMENTE NATURAL **EROSÃO** SOLOS PROBLEMÁTICOS Eólica - por furações e ciclones Solos expansivos e compressivos Fluvial - em deltas e planícies de inundação 'Permafrost' (solos congelados) enchentes-relâmpago Lõess ("quente" e "frio") Movimentos de massa - avalanche de neve-RISCOS À SAÚDE - fluxos de lama e de detritos Emissão de radônio - gueda de rocha Outros compostos nocivos de solos e rochas SUBSIDÊNCIA DE TERRENOS POR escorregamentos Zona costeira - Isunamis e ondas de tempestade MOVIMENTOS CRUSTAIS - erosão costeira acelerada Carstificação e dissolução subterrânea do embasamento **TERREMOTOS** Desertificação Bocorocamento MUDANÇA DO NÍVEL DO MAR **VULCANISMOS** MUDANÇA DE CLIMA DESTRUIÇÃO DE RECIFES DE CORAIS PROBLEMAS GEOLÓGICOS DE ORIGEM PREDOMINANTEMENTE ANTRÓPICA AGRICULTURA E SILVICULTURA ESCASSEZ DE RECURSOS MINE-RAIS, ENERGÉTICOS E HÍDRICOS Contaminação do solo Salinização do solo Exploração inadequada Erosão acelerada por escoamento superficial Espotamento por desenvolvimento de algumas produzida por sobrepastagem, desflorestamento e prática de agricultura rudimentar. MINERAÇÃO atividades superficiais DESCARTE DE REFUGO Perturbação do terreno (frentes abandonadas): Pedreiras e minerações a-céu-aberto Operações subterrâneas Produtos químicos perigosos (inclusive fertilizantes e inseticidas) Esgotos e efluentes em geral Exploração de pláceres Contaminação do solo e da água por drenagem IMPACTOS DE CONSTRUÇÃO E da mina e efluentes DESENVOLVIMENTO EM DETERMI-Subsidência do terreno e escorregamentos Riscos de gás de mina (grisu) NADOS AMBIENTES GEOLÓGICOS EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS Captação de água para usos industriais, Derramamento e surgência (blow-out) Subsidência de terrenos domésticos e agrícolas . Mudanças nos regimes por retificação, Contaminação de água subterrânea Perturbações superficiais devidas às atividades construção de diques marginais, barragens e serviços de drenagens de exploração, produção e transporte POLUIÇÃO DO AR, DA ÁGUA E DO SOLO Planicies de marés . Modificação de condições de deposição POR OPERAÇÕES DE REFINO, CONCEN-TRAÇÃO E FUNDIÇÃO . Poluição Reservatórios: .Colmatação INCÉNDIOS SUBTERRÂNEOS (turfas) . Efeito represamento . Sismicidade induzida EXPLORAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA . Anoxía de sedimentos e de água de fundo Subsidência pela retirada Rebaixamento de lençol freático Intrusão e contaminação por água salina Subida de lencol freático

Carvalho (1998) faz uso do conceito do risco geotécnico como a consequência ou dano esperado de eventos aleatórios associados a processos de instabilização de maciços naturais, artificiais ou em obras geotécnicas. Cerri (2001) caracterizou os riscos em termos ambientais, subdivididos em riscos naturais e antrópicos (Figura 4.2), definindo os riscos geológicos em termos de: "situação de perigo, perda ou dano ao homem e às suas propriedades, em razão da possibilidade de ocorrência de processos geológicos, induzidos ou não". Inseridos no âmbito dos riscos naturais (em distinção aos riscos antrópicos, tecnológicos e sociais), o autor diferencia os processos geológicos de endógenos e exógenos na classificação de riscos de origem geológico-geomorfológica mais frequentes no Brasil.

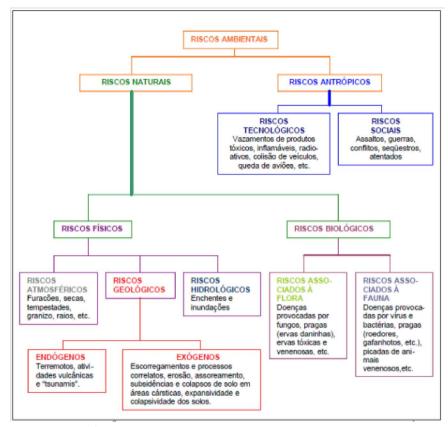


Figura 4.2 – Classificação de riscos ambientais (CERRI, 2001)

Nogueira (2002) readaptou a classificação anterior, introduzindo o conceito de risco ambiental urbano relativo à associação entre riscos geológicos e geomorfológicos às práticas de uso e ocupação do solo, numa temática geral de riscos denominados como socionaturais. (Figura 4.3)

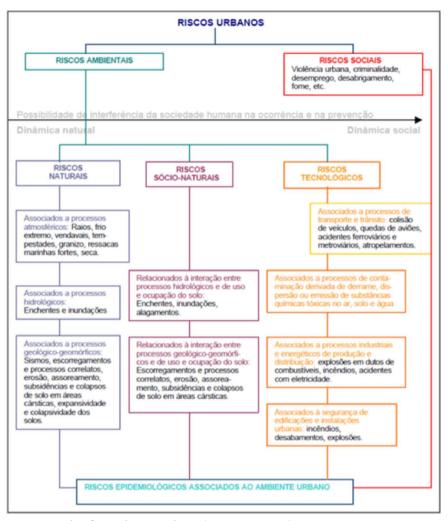


Figura 4.3 - Classificação de riscos urbanos (NOGUEIRA, 2002)

Na abordagem do autor, o risco ambiental urbano é definido como "a condição *potencial* de ocorrência de um acidente que possa causar perda ou dano a uma dada comunidade (pessoas, estruturas físicas ou sistemas produtivos) ou segmento desta, em função de degradação ou disfunção do ambiente urbano (meio físico transformado + ambiente construído)". Sob a ótica da diversidade de áreas percorridas ao longo do traçado de obras lineares, ferrovias comumente atravessam núcleos

urbanos e, dessa forma, incluem associações diretas com as premissas dos riscos ambientais urbanos.

Os estudos de risco geralmente apresentam aplicações de procedimentos específicos baseados nas condições físicas locais, o que dificulta a utilização do mesmo estudo em outras regiões que apresentam contextos geológicos, ambientais e socioeconômicos diferentes. No entanto, a proposta de Cerri (2001) para a classificação de riscos, assim como a de Nogueira (2002), é harmônica com as diretrizes propostas por Fell *et. al.* (2008). Destaca-se que ambas estão atreladas à determinação de níveis de zoneamento aos movimentos de massa, levando em conta as necessidades do planejamento do uso/ocupação do solo e sua regulamentação, e determinam que a propensão de ocorrência de deslizamentos depende da topografia, geologia, propriedades geotécnicas, clima, vegetação e fatores antrópicos.

As ferrovias podem ser consideradas como empreendimentos que estão expostos ao risco ambiental – geológico-exógeno (CERRI, 2001) – e, num contexto mais amplo de risco, também se encaixam na classificação proposta por Nogueira (2002) de risco ambiental urbano. Ao longo das ferrovias ocorrem movimentos de solo e de rochas, de depósitos artificiais (aterro) e de materiais mistos, caracterizando processos geológicos, geomorfológicos ou geotécnicos. Os escorregamentos ao longo da ferrovia podem ser resultados de causas naturais ou antrópicas; no entanto, a geração dos riscos associados aos escorregamentos pode ser sempre interpretado como um processo natural ou ambiental urbano.

Os principais conceitos utilizados nesse estudo são de grande interesse para o gerenciamento de riscos de escorregamentos no Brasil, sejam eles para reduzir riscos associados a desastres naturais no que se refere à população, sejam para a proposição de ações mitigadoras aos desastres naturais nas obras de infraestrutura lineares, como estradas e ferrovias.

4.3. ANÁLISES DE RISCO

No âmbito dos processos de avaliação de risco, são sistematizadas as informações necessárias para a tomada de decisão, considerando a existência de uma ameaça potencial (MOHAMED; ANTIA, 1998), envolvendo profissionais de várias áreas.

No caso da avaliação de risco geológico-geotécnico, estão inseridos profissionais de áreas tradicionais como engenharia civil e geologia e, em um contexto multidisciplinar, a participação de profissionais da área ambiental e social, passando por economistas e agentes de companhias seguradoras.

No caso de análise de risco de escorregamentos de terra, o JTC 32 da ISSMGE apresenta as premissas e as informações necessárias para estimar o risco para ambiente, indivíduos e populações, a partir do potencial de ocorrência de um evento (*hazard*). As análises de risco geralmente contêm os seguintes passos:

- Definição de escopo,
- Identificação do hazard;
- Estimativa de probabilidade de ocorrência;
- Estimativa da vulnerabilidade dos elementos;
- Identificação de consequência;
- Cálculo do risco.

Fell *et al.* (2008) especificam que uma análise de risco deve envolver a desagregação ou a decomposição do sistema e das fontes de risco em suas partes fundamentais, caracterizando que a análise de risco pode ser de caráter qualitativo e quantitativo:

(i) Análise qualitativa de riscos: análise que usa a forma de texto, de natureza descritiva ou por escalas numéricas, para descrever a magnitude das consequências potenciais e a probabilidade de que essas consequências ocorram;

(ii) Análise quantitativa de risco: análise baseada em valores numéricos da vulnerabilidade, probabilidade e consequências, resultando em um valor numérico para o risco.

De acordo Fell *et al.* (2008), a análise de risco deve ser tratada como um processo que estima forma, dimensão e característica do risco. Comumente, a análise de risco tem como principal objetivo o conhecimento das possibilidades de danos e perdas na elaboração de projetos, na expectativa das tomadas de decisões que envolvam custos e no prazo de execução prevista. (Figura 4.4)

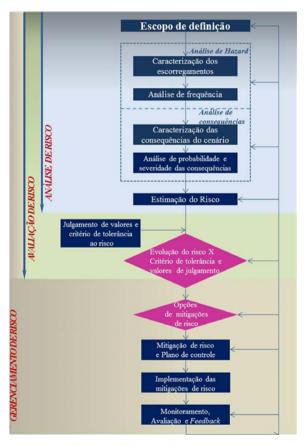


Figura 4.4 - Fluxograma de gestão de riscos para escorregamentos (FELL et. al., 2005)

Van Westen *et al.* (2008) e Jaiswal *et al.* (2010) apresentam uma visão esquemática dos principais dados necessários para a análise de risco e suscetibilidade de escorregamentos, que são divididos em quatro grupos:

- Dados de inventário de deslizamentos;
- Fatores ambientais:
- Processos desencadeadores:
- Elementos de risco.

Van Westen (2006), em trabalho de cunho similar, ressalta a dificuldade em se determinar todas as informações pertinentes, devido à inexistência de dados, e de registros históricos dos eventos representativos da área estudada, problema este levantado por vários autores (VARNES, 1994; IUGS, 1997; CARVALHO, 1998; FELL *et. al.*, 2005; 2008).

Nesse sentido, Van Westen (2008) propõe uma seleção dos fatores específicos que estão relacionados com os tipos de deslizamentos de terra e os mecanismos de falha em cada ambiente específico. Indica ainda os tipos de dados que devem ser incluídos, relacionados com a morfometria, geologia, tipos de solo, geomorfologia, hidrologia e o uso e ocupação do solo. (Figura 4.5)

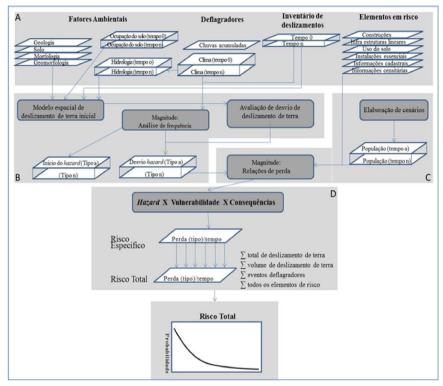


Figura 4.5 – Representação esquemática das fases de avaliação do risco ao deslizamento de terra: A: Dados básicos; B: Suscetibilidade; C: Vulnerabilidade, D: Avaliação do risco; E: Risco final pela curva de risco. (VAN WESTEN, 2008)

A sistemática estabelece uma análise do processo "como um todo", visando obter respostas mais satisfatórias e realçando a flexibilidade das informações no contexto temporal, e considera a problemática da disponibilização de dados.

Amaral e Silva (2001) propuseram uma metodologia que incorpora o conceito dos chamados índices quantitativos de risco (IQR), que têm como base o estabelecimento desses índices a partir de eventos ocorridos em locais previamente estabelecidos. Os índices agregados aos trabalhos de cartografia permitem uma atualização rápida do nível de conhecimento da área investigada. Um dos principais objetivos perseguidos na quantificação do risco é o estabelecimento de um parâmetro para a alocação de investimentos em obras de estabilização, a partir de critérios

bem definidos que permitem a comparação entre situações distintas. O índice quantitativo de risco é expresso pela seguinte relação:

$$IQR = P \times C \times F_{i} \tag{4.1}$$

sendo:

IQR – Índice quantitativo de risco;

P – Probabilidade de ocorrência de um escorregamento com vítimas;

C – Consequência, referente às perdas causadas pelo escorregamento;

F_i – Fator de correção para as intervenções realizadas.

O desenvolvimento da estimativa do risco geológico-geotécnico, com base nas metodologias de Van Westen (2008) e Amaral e Silva (2004), tem como intuito permitir uma análise comparativa de diversos trechos, diminuindo acentuadamente a subjetividade na hierarquização das análises, de modo a facilitar a tomada de decisões com relação à priorização de obras ao longo da ferrovia, além de proporcionar o planejamento dos recursos dispensados à manutenção da via.

A problemática de dados experimentais ou a disponibilidade de registros históricos com levantamento de dados que sejam representativos, além de medições confiáveis que permitam a análise probabilística, sempre retornam ao foco de atenção, quando se propõe estudar o risco em uma determinada área. Carvalho (1996) ressalta que essas questões não impedem a utilização da teoria das probabilidades para a quantificação do risco; porém, exige uma definição alternativa a respeito do significado do termo "probabilidade". Nesse contexto, o autor acentua a necessidade da adoção de um conceito de probabilidade subjetiva para as análises quantitativas de risco, no qual se expresse o grau de confiança de um indivíduo em particular na ocorrência do evento.

Segundo Carvalho (1998), Fell *et. al.* (2008) e Van Westen (2006), nota-se que os conceitos de probabilidade permitem que o conhecimento de especialistas da área (conceitos teóricos, experiências práticas, parâmetros típicos, resultados de cuidadosas campanhas de investigação

geológico-geotécnica de superfície) possa ser traduzido em valores de probabilidade. Em suma, segundo esses autores, a possibilidade de adoção do conceito de probabilidade subjetiva não inviabiliza a adoção de frequência relativa. Assim, caso as probabilidades obtidas empiricamente estejam disponíveis, elas devem ser usadas como pano de fundo para a avaliação, possibilitando a tomada de decisões de controle de risco de forma lógica e racional.

4.4. ZONEAMENTO DE RISCO

Dentro do contexto de avaliação de risco de uma área, torna-se necessária a conceituação de zoneamento. De acordo com JTC-32/ISSMGE (2004), o zoneamento trata da divisão do solo em áreas homogêneas ou domínios, e sua classificação é feita de acordo com o grau de suscetibilidade, ameaça, ou risco de deslizamento de terra, real ou potencial. As diretrizes apresentadas por Fell *et. al.*(2008), oriundas do esforço conjunto do JTC–1 (ISSMGE, ISMR e IAEG) e orientações semelhantes preparadas pela AGS (2007), partem do princípio que os zoneamentos do solo são essenciais para a análise de risco e apresentam as particularidades dos tipos de zoneamento:

• Zoneamento de suscetibilidade de deslizamento: envolve a classificação, volume (ou área) e distribuição espacial e ocorrência de deslizamentos de terra em potencial na área de estudo; pode também incluir uma descrição da velocidade, distância e intensidade do escorregamento existente ou potencial. O zoneamento de suscetibilidade de deslizamento de terra geralmente envolve o desenvolvimento de um inventário de deslizamentos de terra que ocorreram no passado, juntamente com uma avaliação das áreas com potencial comum para experimentar escorregamentos no futuro, mas sem avaliação da frequência (probabilidade anual) dos eventos. Em algumas situações, o zoneamento de suscetibilidade terá de ser

estendido fora da área de estudo, para cobrir áreas de deslizamentos que possam ocorrer e atingir a área a ser zoneada. Em geral, devem ser preparados mapas de zoneamento de suscetibilidade separados para mostrar a origem dos deslizamentos e das áreas em que foram afetadas pelos deslizamentos de terra.

- Zoneamento de *hazard* de deslizamento de terra: apresenta os resultados do mapeamento de suscetibilidade de deslizamento de terra, e atribui uma frequência estimada (probabilidade anual) para os deslizamentos potenciais. Este deve considerar todo escorregamento que pode afetar a área em estudo, incluindo deslizamentos de terra que estão a montante da área, que podem afetá-la, assim como os deslizamentos de terra que afetarão a área a jusante do local em estudo. A ameaça (*hazard*) pode ser expressa como a frequência de ocorrência de um determinado tipo de deslizamento de terra de certo volume ou deslizamento de terra de um determinado tipo, volume e velocidade (que pode variar com a distância da fonte de deslizamento).
- Zoneamento de risco de deslizamento de terra: apresenta os resultados do mapeamento de riscos e avalia o potencial de danos a pessoas (probabilidade anual de uma ou mais pessoas em risco de perder a vida) e/ou à propriedade (valor anual de perda da propriedade) para os elementos em risco, representando a probabilidade temporal e espacial, e a vulnerabilidade. Geralmente é necessário produzir um mapa de suscetibilidade de ameaças e também mapas de zoneamento de risco para os diferentes tipos de deslizamentos de terra que afetam a área (quedas de blocos, deslizamentos de grande porte, pequenos deslizamentos superficiais). Deve-se considerar ainda a elaboração, em casos especiais, de mapas separados para deslizamentos naturais de encostas e para taludes executados.

4.5. PROCESSOS GEODINÂMICOS

Outra questão conceitual importante trata do conhecimento detalhado de todos os aspectos e pormenores da superfície terrestre que influenciem as atividades humanas ou que possam ser afetados ou alterados por estas. De maneira geral, a origem dos processos de modelagem da superfície terrestre apresenta caráter estático ou caráter dinâmico.

Os processos de caráter estático tratam do enquadramento geológico/estrutural do território em escala regional e local, da caracterização petrográfica. Os aspectos de caráter dinâmico referem-se a todos os processos e mecanismos relacionados com a geodinâmica externa da Terra. O mecanismo geodinâmico influencia as atividades de infraestrutura desde a concepção, implantação e manutenção de obras em geral, até o ordenamento territorial. Vale ressaltar que a denominação para esse mecanismo apresenta uma diversidade de termos, usados de forma alternativa, como processos geodinâmicos, processos geológicos, processos geotécnicos ou mesmo processos geológico-geotécnicos, dentre outros, com definições específicas e diferentes entre si. Essa diversidade de definições reflete a complexidade da natureza das muitas disciplinas associadas ao estudo desse fenômeno.

Diante de tal diversidade de conceitos e terminologias adotadas para os mecanismos geodinâmicos, neste estudo será adotado o termo *processo geodinâmico* para abranger não apenas os clássicos movimentos gravitacionais de massa, descritos em termos de rastejos, escorregamentos, quedas e corridas, mas também os movimentos de transporte de massa (erosão pluvial, fluvial, eólica e glacial) e os processos correlatos de subsidência e colapso, considerados como movimento de massa gravitacional, vertical, sem frente livre de movimentação, conforme as proposições de diferentes autores da literatura técnica (RIB; LIANG, 1978; MONT-GOMERY, 1992; INFANTI JR.; FORNASARI FILHO, 1998; SANDORI *et. al.*, 2001; KRAUTER, 2001; MOURA; LÁZARO, 2004; USGS, 2010). A Tabela 4.5 apresenta uma sistematização das principais características dos processos geodinâmicos.

Tabela 4.5 – Principais características dos processos geodinâmicos

Classe	Desenho esquemático	Características		
Erosão	Tominaga (2009)	Processo natural que resulta em transporte de massa devi- do à dinâmica superficial das encostas. A erosão é acionada por ventos, chuvas e desgelo. A magnitude do processo é diretamente influenciada por fatores de solo, relevo e cobertura vegetal, principal- mente.		
Subsidência ou Colapso	Colapso Subsidência Tominaga (2009)	Movimento, relativamente lento, de afundamento de terrenos, devido à deformação ou ao deslocamento de direção, essencialmente, vertical descendente. O colapso apresenta a mesma definição, porém, apresenta-se como um movimento brusco do terreno.		
Rastejo (creep)	troncos curvados da árvores postes tortos postes tortos curvados da árvores postes tortos postes tortos curvados da árvores postes tortos postes tortos postes tortos postes tortos curvados da árvores postes tortos postes poste	- Vários planos de deslocamento (internos); - Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade; - Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; - Solo, depósitos, rocha alterada e/ou fraturada; - Geometria indefinida.		
Espalhamento Lateral	Lateral Alterce de ágia e tendo caradas extensão, mova de uma camada e mais fraca; - As rupturas sá associadas a um			
	USGS (2008)	to generalizado em direção a essa camada inferior.		

Classe	Desenho esquemático	Características		
Escorregamento	USGS (2008)	- Poucos planos de deslocamento (externos); - Velocidades médias (m/h) a altas (m/s); - Pequenos a grandes volumes de material; - Geometria e materiais variáveis: planares ou translacionais; solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza; - Circulares ou rotacionais: aterros, solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas; - Em cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza.		
Quedas	USGS (2008)	- Sem planos de deslocamento; - Queda livre ou rolamento através de plano inclinado. Velocidades muito altas (vários m/s); - Material rochoso; - Pequenos e médios volumes; geometria variável: lascas, placas, blocos, etc.; - Tipos: rolamento de matacão; tombamento; desplacamento.		
Corridas	USGS (2008)	- Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação); - Movimento semelhante ao de um líquido viscoso; - Desenvolvimento ao longo das drenagens; - Velocidades médias a altas; - Mobilização de solo, rochas, detritos e água; - Grandes volumes de material; - Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.		

Segundo Guidicini e Nieble (1984), os movimentos de massa podem ser desencadeados por agentes distintos, denominados de agentes predisponentes ao meio natural, e agentes efetivos (Tabela 4.6). O primeiro agente depende das características intrínsecas do meio natural, onde poderá ocorrer o movimento de massa. O segundo tipo, agentes efetivos, são aqueles diretamente responsáveis pelo desencadeamento do movimento de massa, podendo ser preparatórios ou imediatos.

Tabela 4.6 – Agentes e causas de movimentos de massa (GUIDICINI; NIEBLE,1984)

AGENTES			CAUSAS		
Predisponentes	Efetivos		Internas	Externas	Intermediárias
	Preparatórios	Imediatos	1		
Complexo geológico, complexo morfológico, complexo climato - hidrológico, gravidade, calor solar, tipo de vegetação.	Pluviosidade, erosão pela água e vento, congela- mento e degelo, variação da tem- peratura, dissolu- ção química, ação de fontes e mananciais, oscilação de lençol freático, ação humana e de animais	Chuvas intensas, fusão de gelo e neve, erosão, terremoto, ondas, vento, ação do homem	Efeitos das oscilações térmicas, redução dos parâmetros de resistência por intemperismo,	Mudanças na geometria do sistema, efeitos de vibrações, aumento do declive do talude por processos naturais ou artificiais, deposição de material na porção superior do talude.	Liquefação expontânea Elevação do nível ou da coluna de água em massas "homogêneas" e descontinuidades, rebaixamento rápido do lençol freático, erosão subterrânea retrogressiva (piping), diminuição do efeito de coesão aparente.

As causas são agrupadas de acordo com sua posição em relação ao talude em:

- Internas, que levam ao colapso sem que se verifique qualquer mudança nas condições geométricas do talude, resultando da diminuição da resistência do material;
- Externas, que provocam aumento das tensões de cisalhamento, sem redução da resistência do material; e as causas intermediárias, que são causadas por modificações nos agentes externos no interior do talude.

Cerri e Amaral (1998) discutem que, para cada processo geológico (processo geodinâmico), devem ser identificadas as principais condições predisponentes, as intervenções antrópicas desencadeadoras e as feições de campo indicativas. Os autores salientam que, frequentemente em encostas brasileiras, os escorregamentos têm como principais condições predisponentes as encostas com inclinação elevada, os depósitos de tálus e coluviões, a concentração do escoamento de águas superficiais e subsuperficiais e a pluviometria média anual elevada. Destacam também que as intervenções antrópicas desencadeadoras podem estar relacionadas à eliminação da cobertura vegetal, cortes desestabilizadores, lançamento de lixo e de água não controlados e a desestabilização de margens pela construção de reservatórios.

Complementam que as principais feições podem ser trincas no terreno, degraus de abatimento e postes, árvores e muros inclinados ou tombados. Destacam que, para um dado local, poderá ser obtida uma ponderação dessas variáveis para elaboração de um esquema, seja qualitativo ou quantitativo de classificação da suscetibilidade local a escorregamentos. Dentro desse contexto, observa-se uma grande quantidade de informações necessárias à obtenção de uma classificação adequada, o que ocasiona problemas decorrentes da ausência de fontes em escala apropriada, custos e tempo para a realização dos trabalhos.

De forma sistemática, os processos geodinâmicos foram primeiramente reconhecidos de forma puramente empírica. Entretanto, atualmente, no que diz respeito ao uso da definição e identificação para avaliação de suscetibilidade dos terrenos e avaliação de riscos geológicogeotécnicos, vários autores nacionais e internacionais e diferentes órgãos institucionais, como ISSMGE, ASG e ABGE, apresentam metodologias para identificação das principais condições predisponentes, das feições indicadoras de campo e das intervenções antrópicas desencadeadoras desses processos. As questões relativas à determinação de parâmetros, ponderação e elaboração de variáveis qualitativas ou quantitativas, para classificação da suscetibilidade a esses processos, assim como para avaliar o risco de ocorrência desses processos, constituem parte integrante do desenvolvimento dos estudos geotécnicos.

4.6. MODELOS E INCERTEZAS

As terminologias de riscos são várias, no contexto de um cenário onde, por mais controladas as ações, sempre haverá a possibilidade de ocorrer um evento não previsto. Einstein (2005) resume risco como a exposição à possibilidade de perdas ou danos. A percepção da falta de controle tende ao grande número de variáveis que intervêm em um evento. No entanto, há senso comum de que, quanto mais variáveis forem analisadas e controladas, menores serão as perdas e, consequentemente, os danos associados.

As incertezas estão relacionadas a um determinado evento inserido na rotina de abordagem dos estudos de risco nas áreas geológico-geotécnicas. Desde a etapa de caracterização da área e da realização de mapeamentos, passando pelos zoneamentos de suscetibilidades, vulnerabilidades e ameaças, as incertezas estão presentes nas análises de risco. Da Costa (2005) destaca o cerne da questão: *A verdadeira questão não é se devemos lidar com a incerteza, mas como fazê-lo.* (EINSTEIN; BAECHER, 1982)

Costa (2008) cita que a primeira abordagem realizada para lidar com incertezas e riscos na área de geotecnia foi apresentada por Casagrande em 1964. Ao longo dos anos, as abordagens de risco evoluíram para um reconhecimento explícito das incertezas presentes em problemas geotécnicos. Da mesma forma, nota-se no âmbito da área geotécnica, assim como em outras áreas, o desenvolvimento de estratégias no sentido de desconsiderar as incertezas, ser conservativo, usar o método observacional ou quantificar as incertezas. (CHRISTIAN, 2004)

No entanto, é necessário destacar que, na área geotécnica, um dos principais problemas é a determinação das propriedades e o comportamento de um maciço, independentemente de se realizar uma análise probabilística ou determinística. Normalmente, na prática se tornam inviáveis o conhecimento e a investigação em detalhe de uma área. Assim, as investigações são realizadas, de forma pontual, em um plano e amostragem discretos e espaçados.

Van Westen (2005) destaca o caso de inventários de deslizamentos de terra e a dificuldade na elaboração de mapas coesos que possam exercer sua função primária: a de prevenção de acidentes ligados a desastres naturais. Nesse mesmo contexto, o autor discute que, na maioria dos países, não há uma única agência que tenha a responsabilidade de manter um banco de dados de deslizamentos.

Além da questão de as agências de obras públicas lidarem apenas com os deslizamentos de terra que afetam sua área de interesse, ou mesmo as universidades e unidades de pesquisas que possuem projetos de duração limitada, não há continuidade no armazenamento de dados pelos órgãos formais. O resultado se reflete em um banco de dados incompleto e pouco representativo acarretando assim a produção de mapas elaborados a partir da extrapolação de dados, cujo acúmulo de incertezas traz questionamentos quanto à sua confiabilidade.

De acordo com Zimmerman e Eber (2011), os estudos geológicogeotécnicos se encaixam no que são chamados de sistemas complexos, pois se trata de vários parâmetros subjacentes em que são consideradas distribuições de incertezas diferentes. Dentro desse sistema, não são apenas os números que provocam incertezas, mas também a interação dos parâmetros nas questões de propagação de risco.

Morgenstern (1995) indicou três categorias de incerteza para os estudos geotécnicos:

- Incerteza dos parâmetros: envolve os parâmetros geotécnicos de análise;
- Incerteza do modelo: ressalta as limitações das teorias e dos modelos usados na previsão do desempenho;
- Incerteza humana: relaciona os erros e equívocos humanos.

Wu et. al. (1996) esclarecem que as incertezas apresentam basicamente duas fontes de origem:

- i. Cargas futuras e condições ambientais que não podem ser previstas com certeza (como em relação a terremotos ou a efeitos da chuva nos valores das poropressões);
- ii. Condições de campo; dada a variabilidade espacial dos maciços, comumente ocorre a inserção de dados a partir da extrapolação de furos de sondagem e amostras. Outras fontes de incertezas são a não percepção de descontinuidades geológicas durante a investigação geotécnica, erros de estimativa das propriedades dos maciços causados pela insuficiência de amostras ou mesmo dos métodos de ensaio, adoção de procedimentos incorporando erros aleatórios.

Segundo Chowdhury *et. al.* (2012), os desafios nos estudos de risco na área geológico- geotécnica surgem das incertezas e das necessidades de incorporá-las aos projetos, às análises e a obras. O desempenho geotécnico, seja em um projeto específico de uma estrutura, seja em um estudo regional, pode ser afetado por diferentes tipos de incertezas, como as seguintes:

- Incerteza geológica (detalhes de feições geológicas, por exemplo);
- Incerteza de parâmetro geotécnico (variabilidade dos parâmetros de resistência e de poropressão, por exemplo);
- Incerteza hidrológica (condicionantes do fluxo de água subterrânea);
- Incerteza relacionada a dados históricos (frequência de escorregamentos, quedas e processos de *debris flow*);
- Incerteza relacionada a eventos naturais ou extremos (localização, magnitude e tempo de tempestades, inundações, terremotos, tsunamis);

- Incerteza do projeto (qualidade de construção, atrasos na construção, manutenção);
- Incerteza devido a fatores desconhecidos (efeitos das mudanças climáticas).

Durante o início do desenvolvimento dos métodos de análise probabilística na análise de risco, com relação aos estudos de parâmetros geotécnicos (geológico-geotécnicos), deparou-se com as incertezas dos parâmetros quanto à confiabilidade na resposta ao estudo de risco ou de probabilidades para a avaliação do risco. Chowdhury *et. al.* (2012) destacam a evolução desses estudos, cujos pesquisadores frequentemente tinham como foco a variabilidade das propriedades do solo, a fim de desenvolver as ferramentas para a análise probabilística.

Christian *et. al.* (1994) atribuíam as incertezas dos parâmetros à dispersão dos dados e a erros sistemáticos. Os autores consideram a variação espacial como sendo a dispersão das propriedades do solo em torno da tendência média e os erros sistemáticos como as incertezas na obtenção da própria média. Para Lacasse e Nadin (1996 *apud* DA COSTA, 2005), as dispersões de dados têm duas origens: a variação espacial das propriedades do solo e os erros aleatórios dos ensaios. Eles tratam a variabilidade espacial como a variação real das propriedades do solo, a qual é atribuída a fatores como variação da composição mineralógica, condições de deposição, eventos de tensão, processos de decomposição físicos e mecânicos. Dessa forma, a variabilidade espacial é uma herança do solo e não pode ser reduzida, devendo ser considerada em qualquer certeza de análise.

Nota-se, ao longo dos anos, a percepção que a variabilidade natural dos parâmetros geotécnicos, tais como resistência ao cisalhamento, deve ser separada das incertezas sistemáticas, tais como erro de medição e números limitados de amostras (CHOWDHURY *et. al.*, 2012). Outro avanço destacado pelo autor trata-se da compreensão que a variabilida-

de de um parâmetro, medida pelo seu desvio padrão, é uma função de dimensão espacial sobre a qual a variabilidade é considerada.

Uma das questões mais importantes a ser relacionada dentro deste item está nas escolhas de parâmetros geotécnicos e o número de inclusões no estudo de risco e na análise de incertezas, no âmbito do estudo. Normalmente, a seleção de parâmetros é baseada na experiência da equipe, a partir de testes de sensibilidade e de percepção de risco. Christian (2004) salienta que tais incertezas podem ser aleatórias, caso a informação não melhore a capacidade de previsão. E no intuito de cercar os estudos de informações necessárias e coesas, deve-se estabelecer um compromisso entre o custo do aumento do conhecimento sobre o projeto e a capacidade de melhorar as previsões efetuadas.

A Figura 4.6 (DA COSTA, 2005) apresenta uma sistematização dos aspectos relativos à questão das incertezas dos parâmetros no contexto dos estudos de riscos geológicos e geotécnicos. À luz das discussões prévias, o presente trabalho considera que, além das incertezas associadas ao comportamento do próprio maciço em estudo, é necessário considerar ainda que o modelo e os parâmetros adotados também implicam incertezas que variam segundo as opções tomadas.

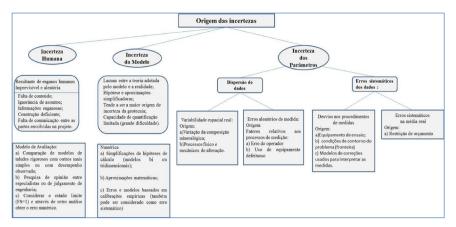


Figura 4.6 – Resumo das origens de incertezas em problemas geotécnicos (El-RAMLY, 2001; DA COSTA, 2005; adaptado)

4.7. CLASSIFICAÇÕES NUMÉRICAS DO RISCO

A construção de um dado instrumento de medida exige um profundo conhecimento do atributo e das relações que se podem estabelecer. A elaboração de uma escala qualquer, cujas bases são observações e respostas de sujeitos, envolve campos de investigações psicológicos e matemáticos. Dentre essas chamadas escalas de atitude, as mais conhecidas e utilizadas são as de Thurstone, Likert, Guttman e Osgood. Na prática atual, o termo "atitude" é usualmente associado ao estímulo social e às respostas matizadas emocionalmente, envolvendo, frequentemente, juízos de valor. (ANASTASI, 1990)

Vale ressaltar que este estudo não trata de escalas de atitudes, mas as utilizam como ferramenta para a obtenção de dados. Assim, tem-se como intuito uma proposta metodológica de análise quantitativa, porém com base qualitativa, a partir de observações de processos geotécnicos *in loco*. Constata-se ainda que, comumente, as incertezas dos parâmetros quanto à confiabilidade na resposta ao estudo de risco ou das probabilidades para a avaliação do risco, são orientadas pela crítica e experiência do pesquisador ou sujeito envolvido na análise de risco. (ZIEGLER, 2010)

Com o objetivo de minimizar as incertezas dos parâmetros, cuja origem provém da subjetividade do sujeito observador, faz-se necessário uma rápida explanação, a seguir, dos principais critérios de contorno dos conceitos básicos que envolvem uma construção de escala, classificações e a escolha do método para análise de dados adquiridos, para melhor entendimento das ferramentas utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

4.7.1. Termo "classificação"

"Classificar" provém das palavras latinas *classis* e *facere*, do latim *classis*, termo usado pioneiramente para caracterizar cidadãos em posições distintas da ordem social ou jurídica. Atualmente, a palavra é usada para distinguir séries ou, num conjunto, o grupo ou a divisão que apresenta características semelhantes e, até mesmo, para indicar categoria e/ ou ordem. (CAMPOS, 2008)

Os diversos tipos de classificação existentes fazem parte do conjunto de instrumentos utilizados para representar o conhecimento de uma área de saber, além de terem a capacidade intrínseca de se constituir em linguagens de indexação e recuperação de informações.

De acordo com Apostel (1963 *apud* CAMPOS, 2008), há cinco características gerais para um sistema de classificação geral:

- 1ª Cada classificação possui um determinado mecanismo classificador que executa, melhor ou pior, as operações necessárias à *classificação*;
- 2ª Cada classificação segue uma ou mais sistemáticas de *multiplicidade de fins* que, em última análise, vão determinar a sua estrutura;
- 3ª Cada classificação exerce sobre um conjunto de realidade, cujas estruturas internas tornam essa função mais ou menos fácil, as operações necessárias à *classificação*;
- 4ª Cada classificação se constrói no contexto das *classificações* precedentes, ou seja, sob uma flexível influência histórica das classificações

dos domínios ao longo do qual o domínio classificado pode ser modificado, as divisões podem ser completadas e novos critérios de classificação podem ser acrescentados;

5ª – Para cada classificação, existe um produto externo da atividade classificadora, isto é, toda classificação supõe uma dupla operação: o estabelecimento de equivalências entre classes do espaço classificatório global e o estabelecimento de hierarquias entre subclasses no interior das classes previamente estabelecidas.

Nesse sentido, as classificações podem ser baseadas na presença ou ausência de uma determinada propriedade ou em uma propriedade qualificada como diferença específica. A escolha entre uma ou outra propriedade resultará em diferentes arranjos de cenários para classificar, impondo-se, portanto, diferentes classificações. Assim, classificar é escolher uma entre outras classificações existentes, logicamente possíveis, mediante a adequação de justificativas para a escolha feita.

Vale ressaltar a questão da arbitrariedade da classificação, pois a escolha da classificação faz-se a partir da observação das afinidades que permitem reunir classes das diversas realidades a classificar (PERELMAN, 1963 *apud* CAMPOS, 2008). No processo de construção de uma classificação específica, primeiramente realiza-se a coleta de termos próprios existentes na área e finaliza-se com a etapa de agrupamento dos termos em facetas, ordenando-os em categorias.

Destaca-se que a principal propriedade da estrutura classificatória registrada dentro do arcabouço da teoria é a "característica". As características são usadas para comparar os elementos classificatórios, pretendendo formar classes e, dentro destas, as cadeias e os alinhamentos. Salienta-se que, no agrupamento de termos dentro de cada faceta, é primordial decidir se todos os termos incluídos numa categoria podem ser arranjados numa única árvore hierárquica, por meio da aplicação de uma sucessão de características. Logo, determinarão classes mutuamente excludentes e completas dentro do contexto imediato e modulado, não omitindo nenhum elo. (CAMPOS, 2008)

Constitui uma convenção útil definir medição como a atribuição de números a objetos ou acontecimentos segundo uma regra rigorosa. Uma vez que há diferentes regras, há diferentes formas de medidas; para cada uma delas obtém-se certo grau de isomorfismo entre as relações empíricas dos objetos e as relações formais dos números. Para Vellen e Wilkinson (1993), torna-se necessário diferenciar as variáveis qualitativas (nominais e ordinais) das quantitativas (interpolares e de razão) e discutir a aplicabilidade das técnicas estatísticas aos diversos níveis de mensuração.

Se, por um lado, estuda-se a natureza do que se quer medir, por outro se desenvolvem técnicas para medir. Aparecem, claramente, dois campos de investigação: o vetor psicológico procurando definir o conceito e os fenômenos observáveis que o revelam e outro, de caráter matemático, procurando definir a medida de uma forma ampla e precisa, permitindo a construção de escalas (campo metodológico), que traduzam os fenômenos observáveis em números. Ambas as frentes estão em constante diálogo, influenciam e promovem os avanços e os recuos próprios do conhecimento. (DA CUNHA, 2007)

Dentro desse contexto, a bibliografia específica apresenta um grande número de medidas de similaridade ou de dissimilaridade, propostas e utilizadas em análise de agrupamento, sendo a escolha entre elas baseada na preferência e/ou na conveniência do pesquisador (BUSSAB et. al., 1990). Uma vez escolhida a definição da medida de dissimilaridade a ser utilizada, a etapa seguinte é a adoção de uma técnica de agrupamento para a formação dos grupos. Para a realização dessa tarefa, existe um grande número de métodos disponíveis, dos quais o pesquisador tem de decidir qual o mais adequado ao seu propósito, uma vez que as diferentes técnicas podem levar a diferentes soluções. (SOUZA et. al., 1997)

Nota-se que o caminho percorrido na construção de escalas é longo e, por vezes, complexo. Referindo-se apenas às questões metodológicas e às limitações que a matemática impõe, há várias abordagens desse tipo de construção. Neste estudo, optou-se, como base de conceito para a elaboração de escala da metodologia proposta, a escala do tipo Guttman

(1944), e como tipo de análise de dados, o método de análise multivariada do tipo *Cluster* (agrupamento), que são resumidamente explanados a seguir.

4.7.2. Escalas de Guttman

Abdi (2010) define a escala de Guttman como um método de escala acumulativa que procura definir mais precisamente a área neutra de uma escala de atitude, levando em consideração as atitudes dos respondentes em relação aos atributos. De maneira simplificada, é composta por um conjunto de frases (itens), organizadas de forma hierárquica, e em relação às quais se pede ao sujeito que manifeste a sua concordância ou não. O resultado é dado pelo número de respostas positivas, de acordo com os padrões de resposta preestabelecidos.

Apresenta grande similaridade com a chamada escala de Likert, com a diferença que, sendo acumulativa, na técnica de Guttman, as afirmações selecionadas incorporam a ideia da afirmação anterior, sendo a classificação formulada de forma dicotômica, ou seja, as questões admitem respostas como Sim/Não, Concordo/Discordo, Faço/Não Faço, tendo em vista a presença ou ausência de uma determinada propriedade.

Com base na natureza nominal do tipo variável 0/1, usada para codificar a resposta, o conjunto de respostas (*escore*) caracteriza a classificação da Guttman como sendo ordinal. Os procedimentos de montagem e aferição da escala de Guttman levam em conta a natureza dicotômica da variável e determinam, ao final do processo, a definição da forma padrão de respostas, que revelará os padrões de respostas do questionário. A escala de Guttman é valorizada pela simplicidade da resposta dicotômica, pela facilidade do cálculo do *escore* e por sua forma padrão.

No processo de construção de uma escala, com base no método de Guttman, são levadas em consideração as seguintes questões (CHIS-NALL,1973; ABDI, 2010):

i. A elaboração de uma lista de frases relativas a um único tema, muito restritas e com um caráter muito repetitivo;

ii. As respostas dadas numa amostra são avaliadas pelo chamado escalograma, no qual se tem a eliminação de itens que não são ordenáveis ou que se revelaram dependentes uns dos outros; em seguida, estabelece-se a ordem de apresentação dos itens selecionados. As frases serão então ordenadas da mais negativa até a mais positiva, de tal forma que a concordância com uma delas conduz tendencialmente à concordância com todas as anteriores. Depois de escolhida a ordem de apresentação dos itens, é ainda conveniente avaliar a reprodução da lista, isto é, o índice de reprodutibilidade deve ser superior a 0,9 e ser de cálculo fácil [1- (nº de erros / nº de padrões de resposta possíveis)]. O índice de escala possui cálculo mais elaborado e avalia se a escala tem as propriedades de uma escala de Guttman; para isso, deve ser superior a 0,60 (ANDERSON, 1990 apud DA CUNHA, 2008). Por vezes, as frases parecem encadear-se, de forma cumulativa, mas só os valores desses dois índices permitirão dar suporte, ou não, a essa aparência.

iii. A partir da matriz das respostas possíveis, estabelece-se o valor da atitude correspondente; obtém-se uma escala ordinal com resultados de 1 a n+1, sendo n o número de itens que integram a escala.

Os procedimentos aplicados na construção de uma escala de atitude baseiam-se no método de tentativas e erros, no qual as tentativas são traduzidas pelas descrições abrangentes do construto, e os erros são detectados pela análise estatística que, na sua essência, seleciona um subconjunto de perguntas que atenda aos coeficientes e indicadores inerentes a uma escala aceitável. Ao se analisarem as curvas características dos itens de uma escala Guttman, encontram-se funções em escada, isto é, os itens têm o poder de discriminação máximo; todos os índices de discriminação são infinitos.

Por outro lado, na escala do tipo Guttman, a medida da atitude é dada pelo padrão de resposta, ou seja, a combinação de frases com que

o sujeito avaliador concorda. Como as frases são organizadas de forma hierárquica, a formulação das frases, bem como a ordem pela qual são enumeradas, apresenta uma tendência: ao concordar com uma frase, concorda-se com todas as anteriores. Porém, há ressalvas a esse procedimento, pois, se as atitudes são hierarquizadas sem se considerar que há homogeneidade entre as respostas, o resultado não terá garantia de que os estímulos possam ser ordenados. A essência da construção de uma escala tipo Guttman é a ordenação dos itens que garantam um *crescendum* na atitude, desde a mais desfavorável até a mais favorável.

4.7.3 Análise Multivariada

As técnicas de tratamento de dados espaciais têm sido uma importante ferramenta para auxiliar na análise de dados heterogêneos, relacionados às áreas biológicas, climáticas/geográficas, ou sociodemográficas, em função das dimensões ou das próprias especificidades do sistema analisado.

Dentre os métodos estatísticos existentes para analisar variáveis de um dado sistema, a abordagem multivariada trata as variáveis de forma conjunta. O uso da análise multivariada se dá em todas as áreas de conhecimento, em que várias características (variáveis) são observadas. Essas variáveis, em geral, não são independentes e, por isso, devem ser analisadas conjuntamente. Para ser considerada como análise multivariada, todas as variáveis devem ser aleatórias e inter-relacionadas de tal maneira que seus diferentes efeitos não podem ser significativamente interpretados em separado.

O tratamento multivariado incorpora múltiplas variáveis estatísticas, e não somente no número de variáveis ou observações. Assim, ela corresponde a um grande número de métodos e técnicas que utilizam, simultaneamente, todas as variáveis na interpretação teórica do conjunto de dados obtidos. (HAIR *et. al.*, 2004)

De acordo com Hair *et. al.* (2009), a análise multivariada é formada por um conjunto de técnicas para análise de dados que está sempre em expansão, sendo elas: análise de componentes principais e análise dos fatores comuns; regressão múltipla e correlação múltipla; análise discriminante múltipla e regressão logística; análise de correlação canônica; análise multivariada de variância e covariância; análise conjunta; análise de agrupamentos; mapeamento perceptual (escalonamento multidimensional); análise de correspondência e a modelagem de equações estruturais e análise fatorial confirmatória.

Os métodos multivariados são escolhidos de acordo com os objetos de pesquisa, pois a análise multivariada é uma análise exploratória de dados. Logo, sua utilização depende do tipo de dado que se deseja analisar e os objetivos do estudo. O uso desse tipo de análise permite a tomada de uma decisão mais bem informada sobre o planejamento em estudo e a interpretação dos resultados, compreendendo abordagens distintas. Dentre todas as formas distintas para a realização de análise multivariada, nesse estudo as técnicas mais utilizadas serão a análise fatorial e a análise de agrupamento (*Cluster*).

4.7.3.1. Análise Fatorial

A análise fatorial possui um papel único na aplicação de outras técnicas multivariadas, pois fornece as ferramentas para analisar a estrutura das inter-relações (correlações) em um grande número de variáveis (p.ex. itens de testes, respostas a questionários) definido por conjuntos de variáveis conhecidos como fatores. Esses grupos de variáveis (fatores), que são por definição altamente intercorrelacionadas, são considerados como representantes de dimensões dentro dos dados (HAIR *et. al.*, 2004). Logo, tem como objetivo principal explicar a correlação ou covariância, entre um conjunto de variáveis, em termos de um número limitado de variáveis não observáveis.

A análise fatorial pode identificar a estrutura de um conjunto de variáveis, bem como fornecer um processo de redução de dados. Para isso, trabalha com a interdependência, cujo propósito principal é definir a estrutura característica entre as variáveis na análise, é bastante semelhante à análise de agrupamentos, porém se difere pelo fato de a análise de agrupamentos ser específica para comparar objetos.

Ressalta-se que técnicas analíticas fatoriais podem atingir seus objetivos de uma perspectiva exploratória ou confirmatória. Na academia, há um debate contínuo sobre o papel apropriado da análise fatorial. Muitos pesquisadores consideram-na apenas exploratória, útil na busca da estrutura em um conjunto de variáveis, ou como método de redução de dados. Para Reis (1997, *apud* VICINI, 2005), a análise fatorial é exploratória, pois é utilizada com o objetivo de reduzir a dimensão de dados, podendo ser utilizada para testar uma hipótese inicial de distribuição de variáveis em uma determinada dimensão.

Neste estudo, a técnica análise fatorial considerou os dados que foram oferecidos e não estabeleceram restrições *a priori* sobre a estimação de componentes, nem sobre o número de componentes a serem extraídos. Após condensar com perda mínima a informação, a análise fatorial foi ajustada nos seguintes aspectos: especificação da unidade de análise; obtenção do resumo de dados e/ou a sua redução; seleção de variáveis e uso de resultados da análise fatorial com outras técnicas multivariadas como a análise de agrupamento (*Cluster analysis*).

4.7.3.2. Análise de agrupamento (Cluster Analysis)

De acordo com Linden (2009), a análise de agrupamento é uma ferramenta extremamente útil para a análise de dados em situações diversas. Pode ser utilizada para a redução da dimensão do conjunto de dados, reduzindo-o assim para um centro seleto de informações. A análise multivariada do tipo agrupamentos (*Cluster analysis*) é caracterizada por separar objetos em grupos homogêneos, baseando-se nas características que esses objetos possuem.

Em geral, as técnicas de *cluster* são baseadas em modelos probabilísticos e tratam da identificação de áreas homogêneas (LAWSON; DENISON, 2002), com base na intensidade de ocorrências de eventos no espaço ou com base em apenas uma variável de interesse (por exemplo, temperatura do ar ou o número de casos de uma doença específica por habitante).

A análise de *Cluster* ou a análise de agrupamentos é um grupo de técnicas multivariada cuja finalidade principal é agregar objetos com base nas características que eles possuem. Distingue-se pela eficiente técnica de tratamento de dados de identificação de agregados homogêneos em um todo heterogêneo. A técnica de tratamento de dados heterogêneos por meio de clusterização em grupos homogêneos é antiga, e está presente na maioria dos livros de estatística multivariada. A ideia de agrupar dados que compartilhem certas características vem desde a utilização de *Clusters* unidimensionais, cujos dados numa reta numérica são agrupados, até desenvolvimentos mais recentes na área de clusterização espacial. (BERKHIN, 2002)

O método da análise de *Clusters* pode ser descrito da seguinte forma: dado um conjunto de *n* indivíduos, para os quais existe informação sobre a forma de *p* variáveis, o método agrupa os indivíduos em função da informação existente, de modo que os indivíduos de um grupo sejam tão semelhantes quanto possível, e sempre mais semelhantes aos elementos do mesmo grupo do que a elementos dos restantes dos grupos, (HAIR *et. al.*, 2004)

Segundo Davis (1986), os diversos métodos para a análise de *Cluster* podem ser enquadrados, de forma geral, em quatro tipos:

- a) Métodos de partição: buscam classificar regiões no espaço, e são definidos em função de variáveis que sejam densamente ocupadas em termos de observações em relação àqueles métodos com ocupação mais esparsa;
- b) Métodos com origem arbitrária: classificam as observações segundo k conjuntos previamente definidos; neste caso, k pontos arbitrários servirão como centroides iniciais, e as observações irão

se agrupar, por similaridade, em torno desses centroides para formar agrupamentos;

- c) Métodos por similaridade mútua: agrupam as observações que tenham uma similaridade comum com outras observações; inicialmente, uma matriz n x n de similaridades entre todos os pares da observação é calculada; em seguida, as similaridades entre colunas são repetidamente recalculadas; colunas representando membros de um único agrupamento tenderão apresentar intercorrelações próximas a 1 e valores menores com não membros;
- d) Métodos por agrupamentos hierárquicos: a partir da matriz inicial de dados, efetua-se uma matriz simétrica de similaridades e se inicia a detecção de pares de casos com a mais alta semelhança, ou a mais baixa distância; para essa combinação, segundo níveis hierárquicos de similaridade, escolhe-se entre diversos procedimentos aglomerativos de tal modo que cada ciclo de agrupamento obedeça a uma ordem sucessiva, no sentido do decréscimo de similaridade. Esse método é comumente usado em geologia para classificação litológica, estratigráfica, dentre outros tipos de agrupamentos comuns nesta área de estudo.

O problema de clusterização de observações levou, no final do século XX, pesquisadores em estatística, matemática aplicada e ciência da computação a dedicarem-se na construção de algoritmos computacionais que pudessem realizar automaticamente o que anteriormente era analisado de forma visual. Segundo Hastie *et. al.* (2001), de maneira geral, os algoritmos de clusterização podem ser divididos em três categorias: (i) algoritmos combinatórios; (ii) misturas de modelos e (iii) busca por modas, sendo que as duas últimas têm como base modelos probabilísticos para o processo gerador de dados.

De forma geral, os algoritmos combinatórios podem ser vistos basicamente como regras heurísticas de busca dos melhores agrupamentos de observações, não existindo, assim, um algoritmo superior aos demais em todas as situações. Qual deles se aplicará melhor dependerá do processo gerador de dados, bem como da experiência do analista ou pesquisador, e da disponibilidade de *softwares* específicos.

Os métodos de *Cluster* têm como *output* os chamados dendrogramas, e a sua análise permite avaliar qual o número de *clusters* a considerar como *input* de otimização. Dendrograma é uma representação matemática e ilustrativa de todo o procedimento de agrupamento por meio de uma estrutura de árvore (EVERITT *et. al.*, 2001). Os nós do dendrograma representam agrupamentos e são compostos pelos grupos e/ou objetos (grupos formados apenas por ele mesmo) ligados ao nó. Se se corta o dendrograma em um nível de distância desejado, obtém-se uma classificação dos números de grupos existentes nesse nível e dos indivíduos que os formam. O número de grupos dos indivíduos é obtido pelo corte do dendrograma em um nível desejado e então cada componente conectado forma um grupo.

A determinação do número de grupos para uma base de dados é uma das tarefas mais difíceis no processamento de agrupamento. O reconhecimento de padrões de agrupamento, ou seja, a seleção de agrupamentos pode ser definido, *a priori*, por meio de algum conhecimento que se tenha sobre os dados, pela conveniência do pesquisador, por simplicidade ou ainda pode ser definido, *a posteriori*, com base nos resultados da análise. (HAIR *et. al.*, 2004)

De acordo com Aaker *et. al.* (2001), para se determinar o número apropriado de grupos, existem diversas abordagens possíveis: em primeiro lugar, o pesquisador pode especificar antecipadamente o número de agrupamentos. Talvez, por motivos teóricos e lógicos, esse número seja conhecido. Nesse sentido, o pesquisador terá razões práticas para estabelecer o número de agrupamentos, com base no uso que pretende fazer dele. Numa segunda possibilidade, o pesquisador pode especificar o nível de agrupamento de acordo com um determinado critério. A terceira abordagem trata-se da determinação do número de agrupamentos com base no padrão gerado pelo programa de *software* utilizado para

a análise. Uma quarta abordagem é representar, graficamente, a razão entre a variância total interna dos grupos e a variância entre os grupos, em relação ao número de agrupamentos. Assim, a identificação se dá no ponto em que surgir uma curva acentuada ou um ponto de inflexão, o qual seria a indicação do número adequado de agrupamentos.

Hair *et. al.* (2004) recomendam que, qualquer que seja a abordagem empregada, o pesquisador deve observar o padrão total de agrupamentos. Isso pode proporcionar uma medida da qualidade do processo de agrupamento e do número de agrupamentos que emerge nos vários níveis dos critérios adotados.

4.7.3.3. Clusterização hierárquica

Os métodos tradicionais de clusterização hierárquica consistem em identificar *clusters* homogêneos progressivamente, por meio da metamorfose (junção ou separação) de *clusters* anteriores na amostra. O critério para a formação progressiva de *clusters* é a medida da distância entre eles, podendo ser adotados diferentes valores para as distâncias (GOWER, 1967). A clusterização hierárquica pode ser efetivada por dois procedimentos principais:

- Forma aglomerativa: iniciando com tantos *clusters* quantos forem os objetos, que são, então, unidos em novos *clusters* (dendogramas);
- Forma divisiva: iniciando com um *cluster* apenas e dividindo-o em novos *clusters* (partição).

A metamorfose de *clusters* é definida por meio da proximidade entre objetos, fator de diferenciação entre os métodos de clusterização. A base do processo reside na construção da matriz de distâncias entre unidades observacionais ou conjuntos de unidades observacionais. No caso da

clusterização hierárquica aglomerativa, os objetos próximos são unidos em *clusters*, e a matriz de distâncias é atualizada. O processo interage até um número mínimo estabelecido de *clusters*.

O processo de desenvolvimento de análise dos dados por clusterização hierárquica adotado neste estudo foi estabelecido no fato de que cada elemento da matriz descreve o grau de semelhança ou diferença entre cada dois casos, com base nas variáveis escolhidas, tendo como intuito obter uma hierarquia de partições 1 P, 2 P, ..., n P do conjunto total dos n objetos em p grupos. O algoritmo empregado neste trabalho pode ser classificado como um algoritmo combinatório e tem uma estrutura de formação de *clusters* do tipo hierárquica aglomerativa. (KHATTREE; NAIK, 2000)

As grandes obras lineares, como as ferrovias, são caracterizadas por traçados em áreas heterogêneas em seus aspectos físicos, biológicos e sociais, o que torna a execução dos tratamentos de dados uma tarefa complexa, exigindo técnicas quantitativas e qualitativas, que forneçam uma desagregação espacial adequada para identificar, ao longo do percurso, áreas que possuem características semelhantes para a análise dos dados, seja qual for o objetivo do estudo. Nota-se que, para esse tipo de estruturas, o tratamento de dados a partir de análise de *cluster* tende a ser adequado e consistente. No caso deste estudo, foi aplicado o método hierárquico baseado na construção de uma matriz de semelhança ou diferença para a estimativa dos padrões de suscetibilidade a processos geodinâmicos da via e para a setorização geológico-geotécnica da Estrada de Ferro Carajás.



METODOLOGIA PROPOSTA

5.1. Introdução

Os problemas de origem geológico-geotécnica podem afetar as ferrovias de várias formas. Normalmente, geram instabilidades nos taludes de corte e nos aterros ao longo da via, que podem atingir, inclusive, a estrutura da plataforma ferroviária. Essas ocorrências localizam-se tipicamente em encostas naturais, em maciços de solo e rocha.

De uma maneira geral, essas questões têm origem na falta de conhecimento do meio físico, principalmente da gênese dos processos de dinâmica superficial ou processos geodinâmicos (movimentos de massa, subsidência e erosões). Essa condição é bastante comum no Brasil, em que a falta de conhecimento leva à omissão das características do meio físico local, tendo como consequência projetos inadequados, construções deficientes, agravados pela falta de manutenção de forma correta, tanto em ferrovias como em rodovias.

Essa questão é mais pertinente nas rodovias, naturalmente, devido à maior extensão deste tipo de infraestrutura no país. Dentro desse contexto, o conhecimento das características do meio físico é considerado essencial para o estabelecimento de programas criteriosos de gestão e para a manutenção de pavimentos ferroviários.

A metodologia proposta para a avaliação de riscos geológico-geotécnicos, objeto da presente pesquisa, é subdividida em duas grandes fases. A primeira consiste na obtenção de um amplo diagnóstico atualizado das condições geológico-geotécnicas ao longo do traçado da ferrovia, de forma a caracterizar o "número de ferrovias" inseridas no contexto geral da EFC, em função da setorização de domínios geológicos de referência. A segunda fase de trabalho (composta por quatro etapas) comportou o tratamento dos dados, as análises do comportamento dos elementos do meio físico e suas inter-relações, de modo a estabelecer parâmetros de

ponderação à suscetibilidade, à vulnerabilidade e à caracterização dos riscos geotécnicos associados à via.

5.2. Fase I da metodologia das análises de risco

A Fase I da metodologia proposta foi desenvolvida com base em um extenso banco de dados e de informações técnicas sobre a ferrovia, disponível e liberado pela VALE S.A. Os dados foram consolidados e sistematizados, em face do histórico das investigações geotécnicas realizadas, nos dados disponíveis do projeto original da construção da ferrovia (1977/78) e nos dados do Projeto Básico de duplicação da via permanente (2005), o que permitiu uma avaliação atualizada das condições geológico-geotécnicas locais, muitos anos após a operação da via. Vale ressaltar que o escopo deste trabalho abrange procedimentos associados à primeira e à terceira fase da Metodologia TMD (GOMES, 2009), como exposto a seguir.

Em termos gerais, a abordagem está centrada nos princípios gerais sistematizados que definem a chamada Metodologia TMD – Trecho, Modelo, Desempenho de avaliação do comportamento geotécnico de obras lineares de grande porte (Tabela 5.1).

Tabela 5.1- Princípios Gerais da Metodologia TMD aplicada a pavimentos ferroviários (GOMES, 2009)

T (Trecho)	• Prévia subdivisão da via em setores ou trechos de referência, a partir da demarcação de segmentos, com o subleito caracterizado por um mesmo domínio geológico-geotécnico.
M (Modelo)	 Especificações das características mecânicas desejáveis ou admissíveis para os materiais ou as estruturas; necessidade de cadernos de encargos com especificações de valores mínimos, valores médios e critérios de aceitação, com base no tipo e na quantidade de ensaios realizados.
D (Desempenho)	 Necessidade de estabelecer procedimentos e técnicas de controle e monitoramento da via para a aferição das características preestabelecidas; Necessidade de elaboração de análises de risco para a hierarquização das áreas de risco e consequente planejamento das medidas de manutenção.

A fase inicial da Metodologia TMD consiste na subdivisão da obra linear (no caso a ferrovia EFC) em setores ou trechos de referência (TR), a partir da demarcação de segmentos estabelecidos, com base em domínios geológico-geotécnicos regionais atravessados pela via. Esse processo é formalizado a partir dos levantamentos disponíveis em escala regional, no banco de dados consolidados da ferrovia e na aferição do comportamento geotécnico da via em termos de respostas às cargas impostas de tráfego. Esses estudos serão, posteriormente, confrontados com inspeções detalhadas de campo, histórico de eventos registrados, resultados de ensaios geotécnicos e da instrumentação geotécnica de trechos experimentais.

Os Trechos de Referência delimitados são, então, objeto de arranjos e projetos específicos de dimensionamento por modelagem analítica ou numérica, estudos que não constituem escopo deste trabalho. Uma aplicação dessa fase de abordagem da técnica TMD ao projeto ferroviário da EFC foi realizada por Pardo (2010), utilizando o método mecanicista, para o trecho da ferrovia localizado entre o km 542,850 (Locação 35) e o km 619,986 (Locação 41), designado como TR3541. O trecho, com cerca de 77km de extensão, está situado entre os municípios de Açailândia, no Maranhão, e Marabá, no estado do Pará, atravessando, em sua maior parte, os arenitos conglomeráticos estratificados com intercalações de pelitos da Formação Itapecuru, incluídos na Bacia Sedimentar do Parnaíba de idade Paleozoica.

A metodologia TMD prevê ainda a proposição de determinados procedimentos para garantir uma avaliação criteriosa do desempenho do pavimento ferroviário, em face das concepções e dos parâmetros adotados em projeto. Essas "análises de desempenho" compreendem basicamente a elaboração de análises de risco e a execução de ensaios de controle para as condições da via em operação.

Assim, a primeira fase do projeto teve como foco a obtenção de dados preliminares para subsidiar a divisão do traçado da EFC em domínios geológicos principais, e uma setorização dos aspectos geológicogeotécnicos associados a cada domínio da compartimentação. A Figura 5.1 apresenta o roteiro geral das atividades desenvolvidas na fase inicial

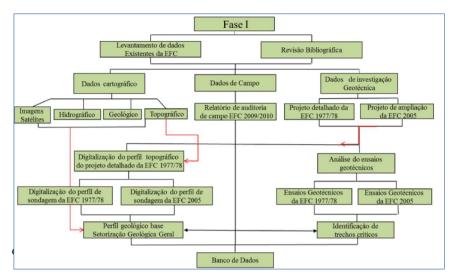


Figura 5.1- Fluxograma de atividades da Fase I da metodologia proposta

Como principal fonte de dados da primeira fase, utilizou-se o Projeto Detalhado da Construção da Ferrovia de Carajás (1977/78), que apresenta os dados da concepção do projeto da ferrovia, incluindo os dados do terreno *in situ*. O conjunto de dados disponíveis do projeto executivo da ferrovia encontrava-se em formato gráfico. Dessa forma, tornou-se necessário um processo de digitalização dos dados de concepção dos 892km da linha tronco da ferrovia para elaboração do perfil topográfico do traçado e avaliação das condições do substrato local antes da implantação da ferrovia.

Para a elaboração do perfil geológico básico do traçado da Estrada de Ferro Carajás, procedeu-se à articulação de diferentes cartas geológicas, por meio de consulta dos dados do Programa *Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil* (CPRM, 1994). Dessa forma, foram levantados os seguintes dados cartográficos para compor o perfil geológico da ferrovia: Folha São Luís, Folha Santa Inês, Folha Vitorino Freire, Folha Açailândia, Folha Marabá, Folha Serra Pelada e Folha Carajás, todas disponíveis na escala 1:250.000.

Foram utilizados os dados do Projeto Básico da Estrada de Ferro Carajás realizado em 1978/79, incluindo os dados topográficos dos 892km

do percurso da via em escala 1:2.000. Para a obtenção desses estudos detalhados, foi necessária a recuperação do levantamento topográfico original da ferrovia na escala de 1:2.000, com curvas de nível de metro a metro, e georreferenciadas a partir das imagens satélites e com uso da ferramenta *Argis* 9.3.

A finalidade proposta consistia na composição de um conjunto de dados cartográficos para auxiliar na compreensão dos dados físicos ao longo da ferrovia e dar assistência durante os trabalhos de campo, na identificação de tipos litológicos envolvidos no traçado da via, de eventos associados a eventos geodinâmicos ao longo dos taludes e da própria plataforma ferroviária da EFC. Foram levantadas as imagens de satélites ao longo de todo traçado pelo programa Google *Earth* Pro - versão profissional do Google *Earth* em alta resolução, com altura de 2.500m.

Os dados foram georreferenciados individualmente, de forma que todos os trechos foram precisamente ajustados às localizações correspondentes, o que implica a possibilidade de livres sobreposições. A ferramenta *AutoCad* 2009 foi utilizada para execução do perfil do traçado, para a inserção das unidades estratigráficas, assim como para os furos de sondagem. Nas etapas de tratamento dos dados topográficos, da vetorização dos mapas e do georreferenciamento das imagens de satélite, a ferramenta utilizada foi o Programa *Argis* 9.3. Outra frente de investigação da 1ª fase foram os dados relativos ao projeto original da via (1977/78), que se concentrou no levantamento de ensaios específicos de classificação dos solos obtidos por meio da 1ª campanha de investigação do Projeto Básico da ferrovia (1978).

A caracterização geotécnica proposta impôs a distinção dos trechos de implantação da via em termos de cortes e aterros, para a identificação de diferentes fatores associados a eventos de risco. Nesse contexto, foram analisados detalhadamente os resultados dos ensaios de plasticidade do substrato local, obtidos dos estudos iniciais (1977/78) mediante o cruzamento dos valores de LL e IP no Gráfico de Plasticidade de Casagrande. Também foram analisados os de ensaios de consistência realizados à época do projeto de Duplicação da Via (2005), aplicados aos

mesmos segmentos da campanha original, cerca de 30 anos após a implantação da ferrovia. Numa fase posterior, foi empregada a classificação de solo SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solo) com objetivo de poder estimar o provável comportamento do solo (Anexo IV).

Essas análises deram condições para que fosse possível avaliar as peculiaridades do comportamento do solo ao longo da ferrovia. Esses dados também foram utilizados como parâmetro para a setorização geológico-geotécnica determinada a partir de técnica da análise multivariada (item 4.7.3), cujo desenvolvimento é apresentado no item seguinte.

5.3 Fase II da metodologia das análises de risco

A segunda fase de trabalho comportou o tratamento dos dados, as análises do comportamento dos elementos do meio físico e suas inter-relações. Esses estudos foram desenvolvidos na RWTH-Aachen (Figura 5.2), a partir do contexto proposto de uma metodologia de diagnóstico de problemas geológico-geotécnicos para ferrovias.

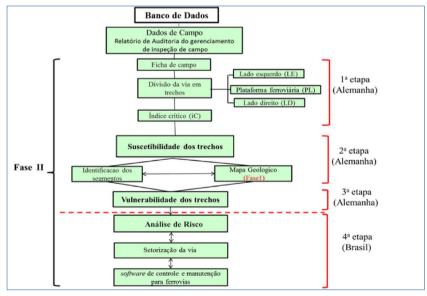


Figura 5.2 - Fluxograma de atividades da Fase II da metodologia proposta

A metodologia propicia a identificação dos trechos suscetíveis aos processos de dinâmica superficial (processos geodinâmicos) e sua magnitude ao longo da ferrovia, além do cálculo da vulnerabilidade da ferrovia em relação a esses processos, parâmetro fundamental da análise de risco para ferrovias. Como expostos anteriormente, os conceitos e os termos relativos a risco, suscetibilidade, vulnerabilidade, análise de risco, *hazard* e processos geodinâmicos estão de acordo com a terminologia proposta pelo JTC32 (2004) e JTC1 (2008).

A metodologia de diagnóstico de problemas geológico-geotécnicos para ferrovias foi aplicada ao longo dos 892km da ferrovia. Para a exposição das premissas adotadas na metodologia proposta (subdividida em quatro etapas), foram selecionados os seguintes trechos:

- km 486+150 ao km 501+350
- km 749+150 ao km 764+450

5.3.1. Fase II – 1ª Etapa: Estruturação dos dados e proposição dos índices de criticidade associados a processos geodinâmicos

Com o intuito de melhorar o controle dos processos geodinâmicos que afetam uma ferrovia e maior efetividade de suas obras e manutenção, a metodologia proposta tem como ponto de partida a determinação das características e do comportamento dos processos geodinâmicos, obtida em trabalho de campo. Essa fase dos estudos teve início com base no relatório e nas fichas de trabalho de campo integrantes do documento *Processo de Inspeção e Auditoria da Estrada de Ferro Carajás*, realizada pela VALE Mineração S.A. em 2010.

A ficha padronizada das inspeções de campo (ver Anexo V) foi aplicada ao longo de toda a extensão da Estrada de Ferro Carajás, no período de setembro de 2008 a abril de 2009, comportando um total de 914

subtrechos. O trabalho de campo e a coleta de dados foram feitos a partir da subdivisão da ferrovia em trechos, dentro da premissa da metodologia TMD (GOMES, 2009), que consiste na subdivisão da ferrovia em setores ou trechos de referência.

Os 914 trechos foram estabelecidos com diferentes extensões, conforme a setorização geológico-geotécnica da via. Assim, ao longo dos primeiros 220km da ferrovia, os subtrechos possuem extensões entre 6,0km e 17,14km. A partir do km 220, os subtrechos apresentam extensões bem inferiores (variando entre 0,12km e 2,0km), com apenas três subtrechos com extensões da ordem de 3,5km.

Cada subtrecho da ferrovia foi analisado em conjunto, comportando três segmentos distintos: lado esquerdo (LE), plataforma ferroviária (PL) e lado direito (LD), comportando sete perfis ou configurações distintas (Figura 5.3).

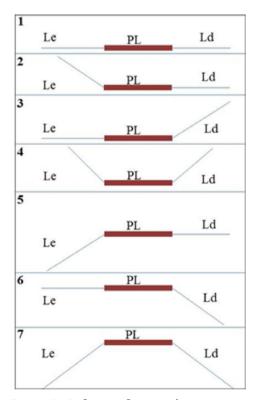


Figura 5.3 - Perfis ou configurações da via permanente

Com base nos registros das fichas de campo, foram definidas as características de cada subtrecho em termos de localização, tipo do perfil e natureza da estrutura da via (aterro, corte ou mista, envolvendo aterro/corte), além da distância da plataforma até o eixo da via (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 – Tabela de dados processados na 1ª etapa da metodologia proposta

	Tre	tho da Est	rada de Ferro Ca	Trecho da Estrada de Ferro Carajás Km 486+490 a Km 501	90 a Km 501			Trecho	da Estrad	a de Ferro Car	Trecho da Estrada de Ferro Carajás Km 749+150 a Km 764+450	0 a Km 70	24+450	
Subtrecho	ocho	Extensão					Sub	Subtrecho	Extensão					
início	ff.	(km)	DI (LD)	DI (LE)	1 1	LE PL	L início	fim	(km)	DI (LD)	DI (LE)	ED	LE	PL
486,490	487,690		DI > 10m				749,150	749,760	0,610	DI > 10m	DI > 10m			
487,690	488,100		m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td>749,760</td><td>751,100</td><td>1,340</td><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td></di></td></di></td></di>			749,760	751,100	1,340	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td></di>			
488,100	488,210		DI > 10m				751,100	752,354	1254	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m 6m < DI < 10m			
488,210	488,900		6m < DI < 10m	1m <di<3m< td=""><td></td><td></td><td>752.354</td><td>752.480</td><td>0.126</td><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m △DI < 6m</td><td></td><td></td><td></td></di></td></di<3m<>			752.354	752.480	0.126	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m △DI < 6m</td><td></td><td></td><td></td></di>	3m △DI < 6m			
488,900	489,700		3m △DI < 6m				752 480	-	0410	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td><td></td></di>				
489,700	490,070		3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td>752.890</td><td>-</td><td>0510</td><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td><td></td></di></td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td>752.890</td><td>-</td><td>0510</td><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td><td></td></di></td></di>			752.890	-	0510	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td><td></td></di>				
490,070	490,400		6m < DI < 10m 3m < DI < 6m	3m <di<6m< td=""><td></td><td></td><td>753 400</td><td>-</td><td>0300</td><td>6m < DI < 10m 3m < DI < 6m</td><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td></di></td></di<6m<>			753 400	-	0300	6m < DI < 10m 3m < DI < 6m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td></di>			
490,400	490,550	0,150	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m<di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td>753 700</td><td>-</td><td>0.300</td><td>6m < DI < 10m 3m < DI < 6m</td><td>3m<di<6m< td=""><td></td><td>ľ</td><td></td></di<6m<></td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td>753 700</td><td>-</td><td>0.300</td><td>6m < DI < 10m 3m < DI < 6m</td><td>3m<di<6m< td=""><td></td><td>ľ</td><td></td></di<6m<></td></di>			753 700	-	0.300	6m < DI < 10m 3m < DI < 6m	3m <di<6m< td=""><td></td><td>ľ</td><td></td></di<6m<>		ľ	
490,550	490,700	0,150	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m 6m < DI < 10m			754 000	-	0300	3m < DI < 6m	DI > 10m			
490,700	491,050	0,350	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 3m="" 6m="" 6m<="" <="" <di="" td=""><td></td><td></td><td>754 300</td><td>-</td><td>800</td><td>1m / DI / 2m</td><td>┸</td><td></td><td></td><td></td></di></td></di>	3m <di 3m="" 6m="" 6m<="" <="" <di="" td=""><td></td><td></td><td>754 300</td><td>-</td><td>800</td><td>1m / DI / 2m</td><td>┸</td><td></td><td></td><td></td></di>			754 300	-	800	1m / DI / 2m	┸			
491,050	491,200	0,150	3m △DI < 6m	3m \(\Omega \) < 6m \(6m < \Omega \) < 10m			754 700	-	2000	2 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 1				
491.200	491.870	0.670	3m \(\infty\) < 6m	3m <di<6m< td=""><td></td><td></td><td>74,700</td><td>-</td><td>00¢7</td><td>M > IO > III</td><td>mo in an</td><td></td><td></td><td></td></di<6m<>			74,700	-	00¢7	M > IO > III	mo in an			
491870	492,470		3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 10m<="" 6m="" <="" di="" td=""><td></td><td></td><td>757,000</td><td>\rightarrow</td><td>00,700</td><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 10m<="" 6m="" <="" di="" td=""><td></td><td></td><td></td></di></td></di></td></di></td></di>	3m <di 10m<="" 6m="" <="" di="" td=""><td></td><td></td><td>757,000</td><td>\rightarrow</td><td>00,700</td><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 10m<="" 6m="" <="" di="" td=""><td></td><td></td><td></td></di></td></di></td></di>			757,000	\rightarrow	00,700	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 10m<="" 6m="" <="" di="" td=""><td></td><td></td><td></td></di></td></di>	3m <di 10m<="" 6m="" <="" di="" td=""><td></td><td></td><td></td></di>			
402 470	402 580		3m / J / 6m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td>757,700</td><td>\rightarrow</td><td>0280</td><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>_</td><td></td><td></td><td></td></di></td></di>			757,700	\rightarrow	0280	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>_</td><td></td><td></td><td></td></di>	_			
107 5 001	400 700		3m / 1 / 6m				757,980	758,620	0,640	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td></di>			
402,700	402 870			3m / J / 6m / 6m / DI / 10m			758,620	759,000	0380	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td></di>			
001,25F	102 020		MIN (1) VIII	DIV 10m			759,000	760,200	1,200	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m \DI < 6m</td><td></td><td></td><td></td></di>	3m \DI < 6m			
492,010	000,004		1 / DI < 10m	- 1			760,200	761,470	1270	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m ⟨DI < 6m</td><td></td><td></td><td></td></di>	3m ⟨DI < 6m			
463,690	192,000		111 / DI CHI	2 - 27 - 6 - 6 - 70 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10			761,470	761,640	0.170	1m < DI <3m	1m < DI ⊰m			
495,880	104 500		3m () cm	2m / 1 / m 1m / 1/2m			761,640	\vdash	0950	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>lm < DI ⊲m</td><td></td><td></td><td></td></di>	lm < DI ⊲m			
404 500	404 000		34 /1 / 64				762,200	762,500	0300	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td></di>			
404 900	405 620		3m △DI < 6m	3m < DI < 6m 3m < DI < 6m			762,500	763,000	0500	DI > 10m	DI > 10m			
495.620	495.780		3m △I < 6m	3m <di 3m="" 6m="" 6m<="" <="" <di="" td=""><td></td><td></td><td>763,000</td><td>763,300</td><td>0300</td><td>6m < DI < 10m</td><td>6m < DI < 10m</td><td></td><td></td><td></td></di>			763,000	763,300	0300	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m			
495.780	496.180		3m △DI < 6m	DI > 10m			763,300	763,690	0330	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m $6m < DI < 10m$			
496.180	496,480		3m △DI < 6m				763,690	764,000	0,310	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m 6m < DI < 10m			
496,480	496,750	0,270	DI > 10m	DI>10m			764,000	764,450	0,450	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td></di>			
496,750	497,300	0,550	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m<di<6m< td=""><td></td><td></td><td>E</td><td>Distancia d</td><td>Distância da DI ao aivo da via</td><td>davis</td><td></td><td></td><td></td><td></td></di<6m<></td></di>	3m <di<6m< td=""><td></td><td></td><td>E</td><td>Distancia d</td><td>Distância da DI ao aivo da via</td><td>davis</td><td></td><td></td><td></td><td></td></di<6m<>			E	Distancia d	Distância da DI ao aivo da via	davis				
497,300	497,920	0,620	DI > 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td>i E</td><td>I ado direito</td><td>T T TO CT</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></di>			i E	I ado direito	T T TO CT					
497,920	498,200	0,280	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td>H</td><td>Lado esquerdo</td><td>rdo</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td>H</td><td>Lado esquerdo</td><td>rdo</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></di>			H	Lado esquerdo	rdo					
498,200	498,700	0,500	3m △DI < 6m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td>PL</td><td>Plataforma ferroviária</td><td>ferroviária</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></di>			PL	Plataforma ferroviária	ferroviária					
498,700	499,170	0,470	3m △DI < 6m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td></td><td></td><td></td><td>aterro</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></di>				aterro						
499,170	501,350	2,180	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 10m<="" 6m="" <="" di="" td=""><td></td><td></td><td></td><td>corte</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></di></td></di>	3m <di 10m<="" 6m="" <="" di="" td=""><td></td><td></td><td></td><td>corte</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></di>				corte						
								conta/ataco						

Para a identificação e a análise das feições associadas aos processos geodinâmicos (erosões, escorregamentos, rastejos, quedas, corridas de massa, recalques ou subsidência), foram utilizados princípios e abordagens amplamente divulgados na literatura técnica disponível. (RIB; LIANG, 1978; MONTGOMERY, 1992; INFANTI JR.; FORNASARI FILHO, 1998; SANDORI *et. al.*, 2001; KRAUTER, 2001; MOURA; LÁZARO, 2004; USGS, 2010)

A tabela Índice de criticidade (iC) de ocorrência de processos geodinâmicos em ferrovia (Tabela 5.3) tem como intuito auxiliar a identificação dos processos geodinâmicos em campo e a sua magnitude, com a proposta de minimizar a subjetividade dessa avaliação, além de diminuir o grau de incerteza a respeito dos problemas geológico-geotécnicos potencialmente presentes ao longo da ferrovia.

Nesse sentindo, a tabela foi elaborada a partir da análise do conjunto de sinais/feições que representa a magnitude das instabilidades potenciais. Os **índices de criticidades** (**iC**) propostos, variáveis entre 1 e 5, foram elaborados conforme o princípio da escala tipo Guttman, com base na distinção de um conjunto de características que representa um *crescendum* da presença de sinais/feições de instabilidade, desde a situação mais desfavorável até a mais favorável, estabelecendo magnitudes diferenciadas entre elas.

Para a transcrição dos dados de campo, foi elaborada uma tabela com o objetivo de apresentar, de forma sintetizada, as características, o comportamento do meio físico e suas inter-relações. A tabela identifica o trecho e a sua extensão e faz distinção entre os seus diferentes segmentos: lado esquerdo (LE), plataforma ferroviária (PL) e lado direito (LD), apresentando os seguintes dados:

- Formação geológica de cada trecho, com base em dados oriundos dos trabalhos realizados na 1ª fase dos estudos;
- Existência ou não de NA elevado;
- Ocorrência de recalques ou abatimentos na via permanente;
- Natureza da obra geotécnica em cada segmento do trecho;
- Índice de criticidade associado a cada segmento do trecho.

Tabela 5.3 – Índices de criticidade de ocorrência de processos geodinâmicos em ferrovia

Índice de criticidade (iC)	Maciço de Solo					
	Corrida de detritos ao longo do talvegue interceptando a plataforma.					
	Escorregamentos de taludes.					
	Erosão transversal invadindo a plataforma.					
	Abatimento localizado na plataforma.					
CRÍTICO = 5	Trincas na plataforma/topo do talude devido a escorregamentos.					
	'Embarrigamento' do talude.					
	Deformações de obras civis (canaletas, sistema de drenagem, etc.).					
	Inclinação de estruturas adjacentes.					
	Desnivelamento entre estruturas e terrenos adjacentes.					
	Altura do lastro (> 60cm).					
	Erosão longitudinal da plataforma com sulcos profundos.					
	Processos de rastejos aos longo dos taludes.					
	Abatimento localizado da massa de solo.					
	Formação de cavidades no talude.					
_	Existência de pontos de surgência de água.					
DESFAVORÁVEL = 4	Existência de fuga de material.					
	Quebra de alinhamento da vegetação.					
	Zonas de baixada, sujeitas a alagamentos periódicos.					
	Depósitos de tálus/colúvios com indícios/históricos de movimento.					
	Áreas encharcadas/saturadas.					
	Assoreamento/obstrução de valas e/ou canaletas de drenagem.					
	Erosão transversal próxima à plataforma.					
MODERADO = 3	Erosão transversal ao longo do talude.					
	Erosão longitudinal da plataforma com sulcos rasos.					
	Deficiência de drenagem.					

IRRELEVANTE = 2	Erosão laminar/início de erosões.
IKKELEVANTE = 2	Existência de feições antigas (erosões e rupturas).
INEXISTENTE = 1	Inexistência de feições ou sinais de processos erosivos/ruptura.

Conforme explicitado previamente, a aplicação da metodologia será ilustrada para dois trechos de referência (km 486+150 ao km 501+350 e km 749+150 ao km 764+450). Os resultados das análises dos índices de criticidade estão indicados na Tabela 5.4. As cores representam a natureza da obra geotécnica local (aterros, corte ou mista, do tipo corte/aterro), presença de surgências de água ou de instabilizações localizadas (recalques ou abatimentos).

Tabela 5.4 – Tabela de dados processados na 1ª etapa da metodologia proposta: índices críticos (iC) e eventos

		Trec	Trecho da Estrada de Ferro Carajás Km 486+490 a Km 501	Ferro Carajás I	Km 486+	490 a Km	501			L		Trecho	Trecho da Estrada de Ferro Caraiás Km 749+150 a Km 764+450	Am Caraiss K	m 749+1	50 a Km 70	64+450		
Subtr	Subtrecho	Extensão			indi	indice Crético (iC)	S	Frento	1,0	Subtrecho		Extensão							
início	ug	(km)	DI (LD)	DI (TE)	1	1.F	PI.	NA	INST	inicio	١.		DI (LD)	DI (LE)	indi	indice Crítico (iC)	(iC)	E	Evento
486 490	487 690	1200	DI > 10m	DI > 10m	4	4	2	1	100	miken		(km)			LD	LE	PL	NA	INST
487,690		0,410	E.	3m △DI < 6m	en	2	-			749,150	749,760	0,610	DI > 10m	DI > 10m	5	4	4		
488,100	488,210	0,110	DI > 10m (6m < DI < 10m	2	2	1			749,760	751,100	1,340	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>7</td><td>4</td><td></td><td></td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>7</td><td>4</td><td></td><td></td></di>	5	7	4		
488,210	488,900	069'0	6m < DI < 10m	1m < DI <3m	2	2	1			751,100	752,354	1254	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	5	2		
488,900	489,700	008'0	3m \DI < 6m	3m △DI < 6m	4	4	2			752.354	752,480	0.126	3m \(\rightarrow \text{I} < 6m	m9 > IΦ mε	5	3	3		
489,700	490,070	0,370	3m \DI < 6m	3m \(\Omega) \(< 6m\)	3	3	1			752 480	752.890	0410	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>-</td><td>2</td><td>-</td><td></td><td></td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>-</td><td>2</td><td>-</td><td></td><td></td></di>	-	2	-		
490,070	490,400	0,330	6m < DI < 10m	3m ⊄DI < 6m	. 1	2	2			752 800	753.400	0.510	3m < DI < 6m	6m < DI < 10m	-	-	-		
490,400	490,550	0,150	3m DI < 6m	3m \DI < 6m	2	2	1			752.400	752.700	0.200	6m / DI / 10m	2m / DI / 6m			-		
490,550	490,700	0,150		6m < DI < 10m	3	2	1			763 700	754,000	0000	6- 77 < 10-		4 -	4 6	,		
490,700	491,050	0,350		3m △DI < 6m	2	2	1			721,000	000,457	0000	om > DI > 10m		-	7 0	7		
491,050	491,200	0,150	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>754,000</td><td>754,300</td><td>0200</td><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>DI > 10m</td><td>-</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td></di></td></di>	6m < DI < 10m	3	3	1			754,000	754,300	0200	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>DI > 10m</td><td>-</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td></di>	DI > 10m	-	2	2		
491,200	491,870	0/9'0	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m \(\D\) < 6m</td><td>5</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>754,300</td><td>754,700</td><td>0,400</td><td>1m < DI <3m</td><td></td><td>2</td><td>-</td><td>_</td><td></td><td></td></di>	3m \(\D\) < 6m	5	2	1			754,300	754,700	0,400	1m < DI <3m		2	-	_		
491,870	492,470	009'0	3m \DI < 6m	6m < DI < 10m	3	3	2			754,700	757,000	2,300	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>Im < DI <3m</td><td>2</td><td>2</td><td>4</td><td></td><td></td></di>	Im < DI <3m	2	2	4		
492,470	492,580	0,110	3m ⟨DI < 6m	3m ⊄DI<6m	3	3	2			757,000	757,700	0,700	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 10m<="" 6m="" <="" di="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td></di></td></di>	3m <di 10m<="" 6m="" <="" di="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td></di>	2	2	2		
492,580	492,700	0,120		6m < DI < 10m	1	2	1			757,700	757,980	0280	3m ⟨DI < 6m	3m <di 10m<="" 6m="" <="" di="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td></di>	3	3	3		
492,700		0,170		6m < DI < 10m	3	7	2			757,980	758,620	0,640	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>33</td><td>3</td><td>6</td><td></td><td></td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>33</td><td>3</td><td>6</td><td></td><td></td></di>	33	3	6		
492,870		0,160	_	DI > 10m	2	2	-			758.620	759.000	0380	3m ⟨DI < 6m	3m ⟨DI < 6m	3	3	3		
493,030		0,850	1m < DI ≤3m	1m < DI <3m	4	3	2			759.000	760,200	1200	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>-</td><td></td><td></td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>-</td><td></td><td></td></di>	2	2	-		
493,880		0,480		6m < DI < 10m	-	2	1			760 200	761 470	1270	3m CDI < 6m	3m < DI < 6m	C		~		
494,360		0,140	\neg	lm <di <3m<="" td=""><td>-</td><td>2</td><td>-</td><td></td><td></td><td>761 170</td><td>761 610</td><td>0110</td><td>1 V 10 V</td><td>10 10 mg</td><td></td><td>,</td><td></td><td></td><td></td></di>	-	2	-			761 170	761 610	0110	1 V 10 V	10 10 mg		,			
494,500	494,900	0,400	3m DI < 6m	6m < DI < 10m	5	5	3			0/4/0/	(01°0)	0/1/0	IM < DI < SM	ms>10>m	2		-		
494,900	495,620	0,720	3m \DI < 6m	3m \(\Omega) \(< 6m\)	1	1	1			761,640	762,200	0560	3m OI < 6m	Im < DI <3m	-	-	-		
495,620	495,780	0,160	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m ФI<6m</td><td>3</td><td>2</td><td>. 2</td><td></td><td></td><td>762,200</td><td>762,500</td><td>0300</td><td>6m < DI < 10m</td><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>-</td><td>-1</td><td>-</td><td></td><td></td></di></td></di>	3m ФI<6m	3	2	. 2			762,200	762,500	0300	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>-</td><td>-1</td><td>-</td><td></td><td></td></di>	-	-1	-		
495,780	496,180	0070	3m \DI < 6m	DI > 10m	1	2	1			762,500	763,000	0050	DI > 10m	DI > 10m	1	1	1		
496,180	496,480	0,300	3m ∕DI < 6m	3m ⊄DI < 6m	2	2	1			763,000	763,300	0300	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	2	2	1		
496,480		0,270	\rightarrow	DI > 10m	-	-	-			763,300	763,690	0390	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	5			
496,750		0,550	я	3m △DI < 6m	3	3	-			763.690	764,000	0.310	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	5	3		
497,300		0,620	+	3m \DI < 6m	2	2	2			764.000	764,450	0.450	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td></di>	3	2			
497,920		0280	\rightarrow	3m DI<6m	~	2	-			П	- V						Г		
498,200		00500	\rightarrow	3m ⊕I<6m	2	2	2				Listatica da PL ao etxo da via	L ao etxo da	via	indice de Criticidade (iC)	riticidade	(iC)	1		
498,700		0,470	3m \DI < 6m	3m △DI < 6m	3	3	-		T	7 1	Lado direito		٠ ۲		critico				
499,170	201,350	2,180	3m (DI < 6m 6m < DI < 10m	m < DI < 10m	et	4	ro.			Т	Plataforma ferrovária	ovara	4	Ф	desfavorável	el			
											aterro		3		moderado	10.7			
										8	corte		2	.=	inrelevante				
										8	corte/aterro			To contract the Parish San Contract of the Con	do Calaka	an aimain	-		
										î.	instabilidade (INST)	NST)	_	meanstelled	de leidoes	ou single	9		
										Z	Nivel d'agua elevado (NA)	evado (NA		proc	processos erosivos	IVOS			

5.3.2. Fase II – 2ª Etapa: Identificação dos trechos com suscetibilidade de ocorrência aos processos geotécnicos

Durante o processo de análise dos índices de criticidade nos trechos, evidenciou-se um modelo de distribuição de ocorrências de sinais/ feições de instabilidade ao longo da ferrovia e da frequência de problemas geológico-geotécnicos mobilizados ao longo da Estrada de Ferro Carajás. Dessa forma, partiu-se para a identificação dos trechos suscetíveis a processos geodinâmicos ao longo da via, com o intuito de avaliar a efetividade das análises do comportamento geológico-geotécnico e suas potenciais inter-relações.

Conforme JTC32 (2004) e JTC1 (2008) da ISSMGE, a suscetibilidade refere-se à possibilidade de um escorregamento existir ou potencialmente ocorrer em uma área, com base nas condições do terreno local. A suscetibilidade não considera, de forma explícita, a probabilidade de ocorrência, que também depende da recorrência de fatores de disparo (*start*), tais como as precipitações, por exemplo.

As ferrovias ou outras obras lineares possuem a característica de grande extensão. As vias transpõem grandes distâncias, atravessando várias morfologias, formações geológicas, pedológicas e diversos tipos de cobertura vegetal. De metodologia construtiva, em que a extensão da via é muito maior que sua largura (Figura 5.4), ferrovias não podem ser analisadas no contexto de áreas, padrão dos estudos de cartografia geológico-geotécnica, demandando abordagens diferenciadas e inovadoras, capazes de representar efetivamente a complexidade da via como um todo.

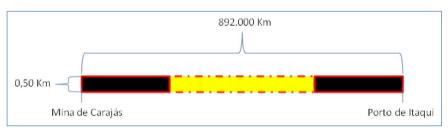


Figura 5.4 - Configuração típica de obra linear. Exemplo: Estrada de Ferro de Carajás

Esse condicionante é suportado na chamada na Metodologia TMD – (T) como "prévia subdivisão da via em setores ou trechos de referência, a partir da demarcação de segmentos, com o subleito caracterizado por um mesmo domínio geológico-geotécnico". (GOMES, 2009)

Utilizando esse conceito como base e os princípios da escala do tipo Guttman, desenvolveu-se uma matriz de hierarquia de suscetibilidade para identificar os trechos da ferrovia que possuem problemas gerados por processos de dinâmica superficial, como mostrado a seguir.

A ferrovia foi subdividida em subtrechos com extensão determinada, compartimentada em três segmentos: lado esquerdo (LE); plataforma ferroviária (PL) e lado direito (LD). Nessa concepção, o conceito de trecho (dimensão linear predominante) é associado ao conceito de área (espaço 2-D do domínio imediato da via), de tal forma que, as análises dos problemas geológico-geotécnicos, inerentes a tais áreas de domínio, possam representar a singularidade da via em seus diferentes trechos.

Dessa forma, a abordagem baseada na compartimentação da via passa a representar o conjunto de toda a sua extensão. Para o total de trechos investigados ao longo da linha-tronco da EFC, essa análise é traduzida pela seguinte relação geral 5.1:

$$ADV = \sum_{i=1}^{914} (LD + LE).L_i$$

(5.1)

sendo:

ADV - Área de Domínio da Via (total)

LD – Extensão do Lado Direito da ferrovia correspondente a cada subtrecho;

LD – Extensão do Lado Esquerdo da ferrovia correspondente a cada subtrecho;

L_i - Extensão de cada subtrecho.

Nota-se que, sob o ponto de vista do transporte, a ferrovia comporta-se como um "corpo" único. Em face da ocorrência de um processo geodinâmico, como, por exemplo, um abatimento na faixa da plataforma ferroviária, ou um escorregamento com proporções com impacto direto em qualquer um dos seus subtrechos, a consequência poderá vir a ser uma paralisação que afete severamente a condição de transporte ao longo de toda a via.

Conforme mostrado previamente (Figura 5.4), a ferrovia apresenta variações tanto na configuração do sistema como no tipo de construção. Logo, os processos geodinâmicos podem ser desencadeados de forma diferenciada em cada um dos lados e na plataforma da ferrovia. A primeira etapa da metodologia proposta buscou atribuir índices de criticidade para cada um dos segmentos de cada trecho da via, conforme apresentado na Tabela 5.4.

A avaliação geotécnica de cada subtrecho incorpora o conjunto dessas análises em seus três segmentos (LD; PL e LE) uma vez que ações geodinâmicas desencadeadas num desses elementos induzem impactos diretos no subtrecho como um todo. A consideração relativa causa-efeito nesse ambiente traduz o conceito proposto de faixa ou área de domínio da via, compartimentadas em trechos e subtrechos.

O passo seguinte consistiu na identificação dos trechos suscetíveis a eventos de ordem geodinâmica (movimento de massa, erosões e subsidência) com base nos índices de criticidade de ocorrência de processos geodinâmicos.

A escala numérica adotada para os índice de criticidade representa uma matriz hierárquica em cinco níveis: crítico (5), desfavorável (4), moderado (3), irrelevante (2) e inexistente (1), que expressam a magnitude do conjunto de sinais/feições de instabilidade associadas a cada segmento de um dado subtrecho (LE, PL, LD). Adotando-se um determinado padrão para a aferição integrada desses índices para o subtrecho correspondente, torna-se possível estabelecer a sua suscetibilidade.

Assim, a partir de ferramenta estatística de análise multivariada, utilizando como método a Análise Fatorial, foi possível identificar a estrutura dentro do grupo de variáveis de índices críticos (iC) que são fortemente inter-relacionáveis (figura 5.5).

LD	LE	PL																			
5	5	5		LD	LE	PL															
5	5	4		5	4	4		LD	LE	PL											
5	5	3		5	4	3		5	3	3		LD	LE	PL							
5	5	2		5	4	2		5	3	2		5	2	2		LD	LE	PL			
5	5	1		5	4	1		5	3	1		5	2	1		5	1	1			
					LD	LE	PL				-	-									
					4	4	4		LD	LE	PL					_					
					4	4	3	-	4	3	3		LD	LE	PL						
					4	4	2		4	3	2		4	2	2		LD	LE	PL		
					4	4	1		4	3	1	-	4	2	1		4	1	1		
										LD	LE	PL									
										3	3	3		LD	LE	PL					
indian	do Ce	itici da	de (iC)	1						3	3	2		3	2	2		LD	LE	PL	
5	Œ CI	critic								3	3	1		3	2	1		3	1	1	
4	des	favorá	ive1	7		Segme	ntos														
3	n	nodera	do		LD	Lado	Direit	0							LD	LE	PL				
2	ir	relevar	nte	╛	LE	Lado	Esque	rdo							2	2	2		LD	LE	PL
1	ir	existe	nte		PL	Plataf	rma	errovi	ária						2	2	1		2	1	1

Figura 5.5- Estrutura identificada da inter-relação entre os índices críticos

A Equação 5.2 expressa a base conceitual das inter-relações dos índices críticos, na qual a dimensão representa o índice de suscetibilidade (S) de cada subtrecho ao logo de uma via.

$$S = (iC_{LD}! + iC_{PL}! + iC_{LE}! - 3)$$
(5.2)

sendo:

S - Índice de suscetibilidade correspondente a cada trecho;

 $iC_{LD}!$ – Fatorial do índice crítico correspondente ao Lado Direito do trecho;

 $iC_{PL}!$ – Fatorial do índice crítico correspondente à Plataforma do trecho;

 $iC_{LE}!$ – Fatorial do índice crítico correspondente ao Lado Esquerdo do trecho.

Para determinar a hierarquia de suscetibilidade, usou-se a análise *Cluster*, método hierárquico como o critério *Single-Linkage Method*, utilizando a distância euclidiana, para gerar níveis hierárquicos de suscetibilidade (alto, médio, moderado, baixo e irrelevante) graficamente representado na figura 5.6.

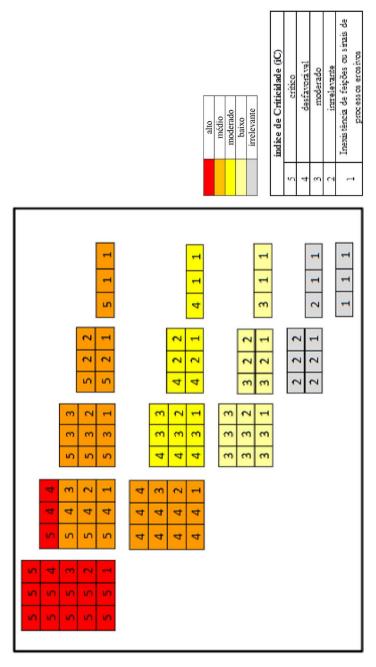


Figura 5.6 - Matriz de hierarquia de suscetibilidade aos processos geodinâmicos

As faixas de valores dos índices de suscetibilidade caracterizam os limites entre "suscetibilidade alta" e "suscetibilidade insignificante" para os diferentes trechos da via, conforme indicado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Padrões de suscetibilidade adotados com escala de cores

Suscetibilidade (S)	Nível	Cor
S ≥ 160	Alto	
40 ≤ S < 160	Médio	
20 ≤ S < 40	Moderado	
4 ≤ S < 20	Baixo	
S < 4	Insignificante	

A matriz de hierarquia proporciona a identificação de subtrechos suscetíveis aos processos da dinâmica superficial. A Tabela 5.6 apresenta a sistematização dos padrões de suscetibilidade obtidos para os dois trechos de referência adotados, e a Figura 5.7 mostra a distribuição das frequências nos processos geodinâmicos ao longo da EFC.

Tabela 5.6 – Padrões de suscetibilidade para os trechos km 486+150 ao km 501+350 e km 749+150 ao km 764+450 da EFC

			Trecho da Estra	ada de Ferro Ca	rajás Km	486+490	a Km 501			
Subtr	e cho	Extensão	DI (LD)	DI (LE)	indi	ce Crítico	(iC)	Eve	ento	s
início	fim	(km)	DI (LD)	DI (LE)	LD	LE	PL	NA	INST	.5
486,490	487,690		DI > 10m	DI > 10m	4	4	5			165
487.690	488,100	0.410	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>6</td></di>	3	2	1			6
488,100	488.210	0.110	DI > 10m	6m < DI < 10m	2	2	1			2
488.210	488.900	0.690	6m < DI < 10m	1m < DI <3m	2	2	1			2
488.900	489,700	0.800	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>4</td><td>4</td><td>2</td><td></td><td></td><td>47</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>4</td><td>4</td><td>2</td><td></td><td></td><td>47</td></di>	4	4	2			47
489,700	490,070	0.370	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td></di>	3	3	1			10
490.070	490,400	0.330	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>2</td></di>	1	2	2			2
490,400	490,550	0,150	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td></di>	2	2	1			2
490,550	490,700	0.150	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	2	1			6
490,700	491,050	0.350	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td></di>	2	2	1			2
491.050	491,200	0.150	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td></di>	6m < DI < 10m	3	3	1			10
491,200	491,870	0.670	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>120</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>120</td></di>	5	2	1			120
491.870	492,470	0.600	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td>11</td></di>	6m < DI < 10m	3	3	2			11
492,470	492,580	0.110	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td>11</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td>11</td></di>	3	3	2			11
492,580	492,700	0,120	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td></di>	6m < DI < 10m	1	2	1			1
492,700	492,870	0.170	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>3</td><td>4</td><td>2</td><td></td><td></td><td>29</td></di>	6m < DI < 10m	3	4	2			29
492,870	493.030	0.160	6m < DI < 10m	DI > 10m	2	2	1	1		2
493,030	493,880	0.850	1m≤DI≤3m	1m <di <3m<="" td=""><td>4</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td>29</td></di>	4	3	2			29
493,880	494.360	0.480	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td></di>	6m < DI < 10m	1	2	1			1
494,360	494,500	0.140	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1m < DI <3m</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td></di>	1m < DI <3m	1	2	1			1
494,500	494,900	0.400	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>5</td><td>5</td><td>3</td><td></td><td></td><td>243</td></di>	6m < DI < 10m	5	5	3			243
494,900	495.620	0.720	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td></di>	1	1	1			0
495.620	495,780	0.160	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>7</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>7</td></di>	3	2	2			7
495,780	496.180	0.400	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>DI > 10m</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td></di>	DI > 10m	1	2	1			1
496.180	496,480	0.300	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td></di>	2	2	1			2
496.480	496,750	0.270	DI > 10m	DI > 10m	1	1	1			0
496,750	497,300	0.550	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td></di>	3	3	1			10
497,300	497.920		DI > 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>3</td></di>	2	2	2			3
497.920	498,200	0.280	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td>1</td><td>6</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td>1</td><td>6</td></di>	3	2	1		1	6
498.200	498,700	0.500	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>3</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>3</td></di>	2	2	2			3
498,700	499,170	0.470	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td></di>	3	3	1			10
499,170	501.350			6m < DI < 10m	4	4	3			51

Suscetibilidade (S)
S ≥ 160	alta
40 ≤ S< 160	média
20 ≤S < 40	moderado
4 ≤ S < 20	baixo
S < 4	insignificante

		Tre	echo da Estrada	de Ferro Cara	ijás Km 7	49+150 a	Km 764+4	50		
	recho	E xte nsão	DI (LD)	DI (LE)	índ	ice Crítico	(iC)	Eve	e nto	s
início	fim	(km)			LD	LE	PL	NA	INST	
749,150	749,760	0,610	DI > 10m	DI > 10m	5	4	4			165
749,760	751,100	1,340	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>4</td><td>4</td><td></td><td></td><td>165</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>4</td><td>4</td><td></td><td></td><td>165</td></di>	5	4	4			165
751,100	752,354	1,254	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	5	2			125
752,354	752,480	0,126	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>129</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>129</td></di>	5	3	3			129
752,480	752,890	0,410	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td></di>	1	2	1			1
752,890	753,400	0,510	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td></di>	6m < DI < 10m	1	1	1			0
753,400	753,700	0,300	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td></di>	2	2	1			2
753,700	754,000	0,300	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>2</td></di>	1	2	2			2
754,000	754,300	0,300	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>DI > 10m</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>2</td></di>	DI > 10m	1	2	2			2
754,300	754,700	0,400	lm < DI <3m	DI > 10m	2	1	1			1
754,700	757,000	2,300	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>lm < DI <3m</td><td>2</td><td>2</td><td>4</td><td></td><td></td><td>25</td></di>	lm < DI <3m	2	2	4			25
757,000	757,700	0,700	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>3</td></di>	6m < DI < 10m	2	2	2			3
757,700	757,980	0,280	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td></di>	6m < DI < 10m	3	3	3			15
757,980	758,620	0,640	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td></di>	3	3	3			15
758,620	759,000	0,380	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td></di>	3	3	3			15
759,000	760,200	1,200	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td></di>	2	2	1			2
760,200	761,470	1,270	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>11</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>11</td></di>	2	3	3			11
761,470	761,640	0,170	lm < DI <3m	lm < DI <3m	3	1	1			5
761,640	762.200	0,560	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>lm < DI <3m</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td></di>	lm < DI <3m	1	1	1			0
762,200	762,500	0,300	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td></di>	1	1	1			0
762,500	763,000	0,500	DI > 10m	DI > 10m	1	1	1			0
763,000	763,300	0,300	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	2	2	1			2
763,300	763,690	0,390	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	5	3			129
763,690	764,000	0,310	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	5	3			129
764,000	764,450	0.450	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>5</td><td>3</td><td></td><td></td><td>129</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>5</td><td>3</td><td></td><td></td><td>129</td></di>	3	5	3			129

DI	Distância da PL ao eixo da via
LD	Lado direito
LE	Lado e squerdo
PL	Plataforma ferroviária
	aterro
	corte
	corte/aterro
	instabilidade (INST)
	Nivel d'água elevado (NA)

	indice de Criticidade (iC)					
5	critico					
4	desfavorável					
3	moderado					
2	inrrelevante					
1	Inexistência de feições ou sinais de processos erosivos					

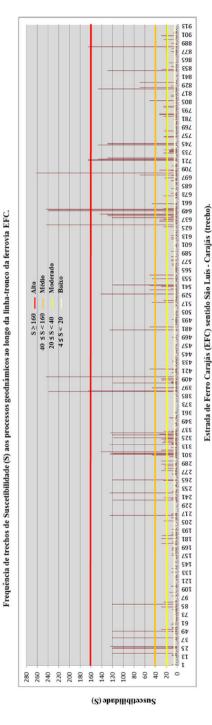


Figura 5.7 – Distribuição das frequências a processos geodinâmicos para os trechos ao longo da EFC

Com base nas informações obtidas nas duas primeiras etapas da metodologia, foram identificados e hierarquizados os subtrechos da linha da EFC em termos de:

- Suscetibilidade (S) aos processos geodinâmicos;
- Ocorrência de instabilizações (Inst): abatimentos e/ou recalque da plataforma;
- Presença de nível d'água elevado (NA), na plataforma ou nos taludes.

O tratamento dos dados e o desenvolvimento de procedimentos para a estimativa da vulnerabilidade dos trechos da ferrovia nos processos de dinâmica superficial (processos geodinâmicos) caracterizam a 3ª etapa da Metodologia proposta.

5.3.3. Fase II – 3ª Etapa: Estimativa da vulnerabilidade da ferrovia nos processos geotécnicos

Segundo as prescrições do documento JTC 32 (2004) e JTC-1 (2008), entende-se por vulnerabilidade o grau de perda associado a um determinado elemento ou conjunto de elementos dentro da área afetada pelos processos geotécnicos, dentre eles: escorregamentos, abatimentos, inundações. Essa grandeza é expressa numa escala variável entre 0 (sem perda) e 1 (perda total).

No caso, por exemplo, de uma propriedade, a perda representará o valor do dano em relação ao valor da propriedade; para pessoas, será a probabilidade de uma determinada vida (elemento em risco) ser perdida, em função de um dado processo geotécnico. No caso da ferrovia, a perda total é assumida quando envolve um evento de paralisação da via devido a um processo geodinâmico. Essa condição é particularmente dependente da condição dos taludes da via e da influência relativa da água presente num dado maciço de solo e/ou rocha.

A vulnerabilidade da via, associada a eventos de sua paralisação devido aos processos geodinâmicos, foi expressa, no presente trabalho, em termos do parâmetro chamado índice de Vulnerabilidade (iV), estimado com base nos índices de criticidade, ocorrência de instabilizações (abatimentos ou recalque das plataformas) e surgências de água (posição do NA) na plataforma ou nos taludes.

Para a quantificação dos índices de vulnerabilidade (iV) da ferrovia a processos geodinâmicos, foram atribuídos valores ponderais que incorporam as incertezas associadas ao próprio comportamento geotécnico da estrutura analisada, como também às especificidades e à natureza do modelo de interpretação adotado nas análises.

Esses valores ponderais (pesos) estão apresentados na Tabela 5.7, em termos dos índices de criticidade, presença de NA elevado na plataforma e presença de NA elevado na plataforma associado a instabilizações da própria via (abatimento ou recalques da plataforma), utilizando-se, de forma similar ao adotado previamente, o chamado método estatístico por Análise de *Clusters* método hierárquico – critério *Single-Linkage Method*. Ressalta-se que os valores ponderais (pesos) estão de acordo com as faixas de valores dos índices de suscetibilidade que caracterizam os limites entre "suscetibilidade alta" e "suscetibilidade insignificante".

Tabela 5.7 - Valores ponderais relativos aos índices de vulnerabilidade da ferrovia

Índices de Vulnerabilidade (iV)				
	Nível	Escala	Pesos (P)	
	alto	5	2,0	
Índices de	médio	4	1,0	
criticidade	moderado	3	0,25	
	baixo	2	0,01	
	irrelevante	1	0,0	
	Inst.		0,5	
	NA		1,0	

Os índices de vulnerabilidade (iV), que caracterizam os subtrechos da ferrovia quanto a uma potencial paralisação da via devido a processos geodinâmicos, são estimados com base na seguinte relação:

$$iV = \{(P)_{1F} + (P)_{1D} + [(P)_{PI} \cdot 1, 5] + (P)_{INST} + (P)_{na}\} \} / 8,5$$
(5.3)

sendo:

iV - Índice de vulnerabilidade correspondente a cada subtrecho;

 P_{LE} – Valor ponderal (peso) correspondente ao iC do Lado Esquerdo do subtrecho;

 P_{LD} – Valor ponderal (peso) correspondente ao iC do Lado Direito do subtrecho;

 P_{PL} – Valor ponderal (peso) correspondente ao iC da Plataforma do subtrecho:

 P_{INST} – Valor ponderal (peso) correspondente à presença de Instabilizações; P_{NA} – Valor ponderal (peso) correspondente à presença de NA elevado.

Os resultados obtidos a partir da aplicação da Equação (5.3) fornecem índices de vulnerabilidade entre 0 (sem perda) e 1 (perda total), estabelecendo os padrões indicados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Padrões de vulnerabilidade

Índices de Vulnerabilidade (iV)	Vulnerabilidade (V)	
$0.799 \le iV < 1.0$	Alta	
$0.6 \le iV < 0.8$	Média	
$0.4 \le iV < 0.6$	Moderada	
$0.2 \le iV < 0.4$	Baixa	
iV < 0,2	Insignificante	

Os dados obtidos em termos de índices e padrões de vulnerabilidade, para os dois trechos de referência descritos anteriormente, estão apresentados na Tabela 5.9. A Figura 5.8 mostra a distribuição das frequências da vulnerabilidade à paralisação da via, devido a processos geodinâmicos, ao longo da EFC. Esses resultados refletem a situação atual da via e, evidentemente, tendem a variar ao longo do tempo, em face de potenciais variações dos condicionantes geotécnicos locais.

A partir dessa abordagem, que estabelece uma hierarquização da vulnerabilidade dos trechos (potencial paralisação da via, em função dos processos geodinâmicos passíveis de desencadeamento ao longo da via), torna-se possível a elaboração de procedimentos de manutenção e a conservação da via, de forma a se atuar preventivamente aos potenciais processos detectados, incluindo a adoção de obras de drenagem, de retaludamento ou de estruturas de contenção. O Anexo VI apresenta os resultados gráficos da aplicação dessa fase da metodologia ao longo da extensão total da EFC.

Tabela 5.9 - Índices de vulnerabilidade para os trechos km 486+150 ao km 501+350 e km 749+150 ao km 764+450 da EFC

	Trecho da Estrada de Ferro Carajás Km 486+490 a Km 501+350										
Subtr		Extensão	DI (LD)	DI (LE)	indi	ce Crítico	(iC)	Eve	ento	s	v
iníc io	fim	(km)	/		LD	LE	PL	NA	INST		
486,490	487,690	1,200	DI > 10m	DI > 10m	4	4	5		0,5	165	0,647
487,690	488,100	0.410	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>6</td><td>0,030</td></di>	3	2	1			6	0,030
488,100	488,210	0,110	DI > 10m	6m < DI < 10m	2	2	1			2	0,002
488.210	488,900	0.690	6m < DI < 10m	lm < DI <3m	2	2	1			2	0.002
488,900	489,700	0.800	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>4</td><td>4</td><td>2</td><td></td><td></td><td>47</td><td>0,237</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>4</td><td>4</td><td>2</td><td></td><td></td><td>47</td><td>0,237</td></di>	4	4	2			47	0,237
489,700	490.070	0.370	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0.059</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0.059</td></di>	3	3	1			10	0.059
490,070	490,400	0.330	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0,025</td></di>	1	2	2			2	0,025
490,400	490,550	0,150	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0,002</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0,002</td></di>	2	2	1			2	0,002
490,550	490,700	0,150	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	2	1			6	0,030
490,700	491,050	0,350	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0,002</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0,002</td></di>	2	2	1			2	0,002
491,050	491,200	0,150	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0.059</td></di>	6m < DI < 10m	3	3	1			10	0.059
491,200	491,870	0,670	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>120</td><td>0,251</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>120</td><td>0,251</td></di>	5	2	1			120	0,251
491,870	492,470	0.600	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td>11</td><td>0.060</td></di>	6m < DI < 10m	3	3	2			11	0.060
492,470	492,580	0,110	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td>11</td><td>0,060</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td>11</td><td>0,060</td></di>	3	3	2			11	0,060
492,580	492,700	0,120	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>0,001</td></di>	6m < DI < 10m	1	2	1			1	0,001
492,700	492,870	0,170	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>3</td><td>4</td><td>2</td><td></td><td></td><td>29</td><td>0,149</td></di>	6m < DI < 10m	3	4	2			29	0,149
492,870	493,030	0.160	6m < DI < 10m	DI > 10m	2	2	1			2	0.002
493,030	493,880	0,850	lm < DI <3m	lm < DI <3m	4	3	2			29	0,149
493,880	494,360	0,480	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>0,001</td></di>	6m < DI < 10m	1	2	1			1	0,001
494,360	494,500	0,140	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>lm < DI <3m</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>0,001</td></di>	lm < DI <3m	1	2	1			1	0,001
494,500	494,900	0.400	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>5</td><td>5</td><td>3</td><td></td><td></td><td>243</td><td>0,515</td></di>	6m < DI < 10m	5	5	3			243	0,515
494,900	495,620	0,720	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td><td>0,000</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td><td>0,000</td></di>	1	1	1			0	0,000
495,620	495,780	0,160	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>7</td><td>0,032</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>7</td><td>0,032</td></di>	3	2	2			7	0,032
495,780	496,180	0,400	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>DI > 10m</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>0,001</td></di>	DI > 10m	1	2	1			1	0,001
496,180	496,480	0,300	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0,002</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0,002</td></di>	2	2	1			2	0,002
496,480	496,750	0,270	DI > 10m	DI > 10m	1	1	1			0	0,000
496,750	497,300	0,550	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>-3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0,059</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>-3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0,059</td></di>	3	-3	1			10	0,059
497,300	497.920	0,620	DI > 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>3</td><td>0,004</td></di>	2	2	2			3	0,004
497,920	498,200	0,280	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>6</td><td>0,030</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>6</td><td>0,030</td></di>	3	2	1			6	0,030
498,200	498,700	0,500	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>3</td><td>0,004</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>3</td><td>0,004</td></di>	2	2	2			3	0,004
498,700	499,170	0,470	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0,059</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0,059</td></di>	3	3	1			10	0,059
499,170	501,350	2,180	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>4</td><td>4</td><td>3</td><td></td><td></td><td>51</td><td>0,279</td></di>	6m < DI < 10m	4	4	3			51	0,279

	Trecho da Estrada de Ferro Carajás Km 749+150 a Km 764+450										
	rec ho	Extensão	DI (LD)	(LD) DI (LE)		ce Crítico	(iC)	Ev	nto	s	v
iníc io	fim	(km)	/	(/	LD	LE	PL	NA	INST		
749,150	749,760	0,610	DI > 10m	DI > 10m	5	4	4	1,0	0,5	165	0,706
749,760	751.100	1.340	3m < DI < 6m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>4</td><td>4</td><td>1,0</td><td>0,5</td><td>165</td><td>0.706</td></di>	5	4	4	1,0	0,5	165	0.706
751,100	752.354	1,254	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	5	2	1,0	0,5	125	0,443
752354	752,480	0.126	3m < DI < 6m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>129</td><td>0,309</td></di>	5	3	3			129	0,309
752,480	752,890	0,410	3m < DI < 6m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>0,001</td></di>	1	2	1			1	0,001
752,890	753,400	0,510	3m < DI < 6m	6m < DI < 10m	1	1	1			0	0,000
753,400	753,700	0,300	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0,002</td></di>	2	2	1			2	0,002
753,700	754,000	0,300	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0,003</td></di>	1	2	2			2	0,003
754.000	754.300	0.300	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>DI > 10m</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.003</td></di>	DI > 10m	1	2	2			2	0.003
754.300	754,700	0.400	1m < DI <3m	DI > 10m	2	1	1			1	0.001
754,700	757.000	2,300	3m < DI < 6m	1m < DI <3m	2	2	4	1,0		25	0,296
757.000	757,700	0,700	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>3</td><td>0.159</td></di>	6m < DI < 10m	2	2	2			3	0.159
757,700	757.980	0.280	3m < DI < 6m	6m < DI < 10m	3	3	3			15	0.103
757.980	758,620	0.640	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td><td>0.103</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td><td>0.103</td></di>	3	3	3			15	0.103
758,620	759,000	0.380	3m < DI < 6m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td><td>0,103</td></di>	3	3	3			15	0,103
759.000	760.200	1.200	3m < DI < 6m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td></di>	2	2	1			2	0.002
760200	761,470	1,270	3m < DI < 6m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>3</td><td>3</td><td>1,0</td><td>0,5</td><td>11</td><td>0,251</td></di>	2	3	3	1,0	0,5	11	0,251
761,470	761,640	0,170	1m < DI <3m	1m <di td="" ≤m<=""><td>3</td><td>1</td><td>1</td><td>1,0</td><td></td><td>5</td><td>0.000</td></di>	3	1	1	1,0		5	0.000
761,640	762.200	0,560	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1m < DI <3m</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td><td>0.000</td></di>	1m < DI <3m	1	1	1			0	0.000
762,200	762,500	0,300	$6m \le DI \le 10m$	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td><td>0,000</td></di>	1	1	1			0	0,000
762,500	763,000	0.500	DI > 10m	DI > 10m	1	1	1			0	0.000
763,000	763,300	0,300	$6m \le DI \le 10m$	6m < DI < 10m	2	2	1			2	0,001
763,300	763,690	0.390	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	5	3			129	0,309
763,690	764,000	0,310	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	5	3	1,0	0,5	129	0,485
764.000	764,450	0.450	3m < DI < 6m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>5</td><td>3</td><td></td><td></td><td>129</td><td>0,309</td></di>	3	5	3			129	0,309

Suscetibilidade (S)		
S ≥ 160	alta	
40 ≤ S< 160	média	
20 ≤S < 40	moderado	
4 ≤ S < 20	baixo	
S < 4	insignificante	

	indice Vulnera bilida de (iV)	e Vulnera bilida de (iV) Vunera bilida de (V		
١	$0.8 \le iV < 1.0$	alto		
١	$0.6 \le iV < 0.8$	media		
l	$0.4 \le iV < 0.6$	moderado		
	0.2 < iV < 0.4	baixo		
	iV ≤ 0,2	insignificante		

DI	Distância da PL ao eixo da via
LD	Lado d i reito
LE	Lado esquerdo
PL	Plataforma ferro viária
	aterro
	corte
	corte/aterro
0,5	instabilidade (INST)
1,0	Nivel d'água elevado (NA)

indice de Criticidade (iC)					
5	critico				
4	desfavorável				
3	moderado				
2	inrrelevante				
1	Inexistência de feições ou sinais de				
1	processos erosivos				

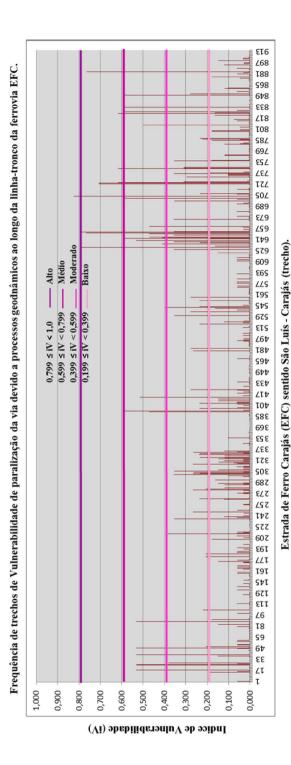


Figura 5.8 - Distribuição das frequências da vulnerabilidade à paralisação da via para os trechos ao longo da EFC

5.3.4. Fase II – 4ª Etapa: Estimativa do risco geológico-geotécnico para ferrovias

A quarta etapa dessa fase, procedimento final da metodologia proposta, consiste no desenvolvimento de uma sistemática para estimativa dos riscos geológico-geotécnicos em ferrovias, mediante a integração dos dados previamente apresentados e o contexto do domínio da via, em termos dos segmentos LE, PL e LD, sob ação de processos geodinâmicos diversos.

Conforme discutido previamente, a estrutura geral para uma análise quantitativa de risco a movimentos de massa contempla as seguintes etapas: análise da probabilidade e das características do potencial de escorregamentos; identificação dos elementos em risco; identificação da vulnerabilidade dos elementos em risco; e estimativa final do risco. Ressaltou-se também que, comumente, essas análises tendem a ser semiquantitativas, em função da problemática da disponibilidade de registros históricos com levantamento de dados representativos e medições confiáveis.

Ainda assim, não é incompatível ou despropositada a utilização da Teoria das Probabilidades para a quantificação do risco nesses casos, embora seja demandada uma concepção alternativa para o significado do termo "probabilidade". A adoção de métodos empíricos e mesmo a aplicação criteriosa do julgamento de um profissional experiente podem ser combinadas com parâmetros mensuráveis e com modelagens numéricas.

Neste trabalho, foi adotada uma abordagem denominada *Erfassungssystematik*: *Checklisten und Risikokatologe* (Seleção de parâmetros para análise de risco), proposta por Burguer e Buchhart (2002), que constitui um instrumento sistemático para um processo de seleção de parâmetros de risco (Tabela 5.10). No presente estudo, os parâmetros adotados, diretamente associados aos dados de campo e observações em termos dos potenciais processos geodinâmicos induzidos ao longo de uma via férrea, foram estabelecidos a partir dos índices críticos (iC) estimados.

Parte-se do princípio que o resultado obtido na análise de risco seja aplicável em condições meteorológicas adversas, seja de precipitação elevada, seja de acentuada variação térmica.

Tabela 5.10 – *Erfassungssystematik*: seleção de parâmetros para análise de riscos (BURGUER; BUCHHART, 2002)

Seleção (Erfassung)	Risco individual (Einzel risiken)	Risco agregado (Aggregierte Risiken)
Não sistemática	Brainstorming	
Sistemática	Sistema de prevenção Checklist	Inventário de risco Análise de cenário

Nessa abordagem, adotou-se o conceito subjetivo das probabilidades para as análises quantitativas de risco, expressas em termos do grau de confiança de um indivíduo em particular na ocorrência do evento, incorporando o modelo de análise proposto por Van Westen (2008) e do conceito dos chamados índices quantitativos de risco (IQR), propostos por Amaral e Silva (2001).

O evento de risco aqui tratado resume-se em processos naturais e induzidos pela construção de taludes de corte e aterro na implantação da via permanente, mobilizando a movimentação de massas (solos e rochas) no traçado de uma ferrovia (LE, LD e PL), capazes de resultar na interdição do seu tráfego. Assim, o processo fenomenológico para ocorrência desses eventos possui tanto uma mecânica deflagrada por chuvas intensas, como também fatores relativos à própria implantação e manutenção da via, que tendam a modificar a suscetibilidade natural dos terrenos aos processos geodinâmicos.

O processo do desenvolvimento da metodologia obedece aos dois critérios fundamentais para se estabelecer a quantificação do risco (R), previamente postulados:

• Identificação dos compartimentos geológico-geotécnicos que apresentam maior ou menor suscetibilidade (S) de ocorrência a

eventos de instabilidade de taludes, incluindo também a plataforma da via permanente;

• A maior ou a menor vulnerabilidade (V) do elemento de risco, traduzido pela paralisação da via, em decorrência de um dado evento de instabilização.

A formulação metodológica pode ser traduzida pela seguinte relação:

$$R = f(S) x f(V)$$
 (5.4)

No contexto dinâmico das análises de risco, é importante enfatizar a resposta dos parâmetros de vulnerabilidade e do risco geológico-geotécnico de uma obra linear como as ferrovias, em função das atividades de manutenção da via permanente. As ações corretivas visam solucionar os problemas com obras desde drenagem superficial até projetos de estruturas de contenção. Essas ações de benfeitorias, executadas em trechos específicos da via, devem ser incorporadas numa análise sistêmica do risco em ferrovias, minimizando as incertezas do modelo da análise adotada. Nesses termos, propõe-se a seguinte correção para o parâmetro de vulnerabilidade:

$$f_{v} = \frac{EC_{LE}}{DI} \cdot \frac{EC_{LD}}{DI} \cdot EC_{PL}$$
 (5.5)

sendo:

 f_v – Fator de correção do índice de vulnerabilidade do subtrecho

EC - Obras de estabilização/contenção/drenagem

DI – Distância horizontal do talude ao eixo da plataforma ferroviária

LE - Lado esquerdo da via

LD - Lado direito da via

PL - Plataforma ferroviária

O índice f_v expressa a correção imposta pelas obras de estabilização realizadas em cada subtrecho (LD; PL; LE), de forma a expressar a redução da vulnerabilidade da via a uma paralisação do tráfego, devido a um processo geodinâmico. Assim, foram propostos graus de ponderação para cada subtrecho, em função da natureza das diferentes obras possíveis de intervenção (RIVES *et. al.*, 1979; MAHER; MCGOEY-SMITH, 2006; COSTA *et. al.*, 2008). Para os subtrechos LD e LE, a influência das obras de intervenção executadas foram avaliadas em cinco categorias (Tabela 5.11), adotando-se uma escala de avaliação do tipo Gutman.

Tabela 5.11 - Fatores de ponderação em função das obras de intervenção (LD e LE)

Natureza das Obras de Intervenção	Peso
Obra de contenção ou talude em boas condições de estabilidade	0,1
Retaludamento + sistema de drenagem (DR) + cobertura vegetal (CV)	0,3
Retaludamento + sistema de drenagem (DR)	0,5
Retaludamento	0,7
Obras Inexistentes – trecho com necessidade de obras	1,0

A distância horizontal do talude ao eixo da plataforma ferroviária (DI) foi considerada à parte, como um fator na minimização da vulnerabilidade de paralisação da via férrea, pelo caráter óbvio de sua influência em relação aos efeitos do domínio de ação dos movimentos de massa. Similarmente, fatores de ponderação foram adotados para a aferição da influência específica do parâmetro DI (Tabela 5.12). Em se tratando de uma avaliação de um fator isolado, a escala desses pesos é pequena, admitida na faixa de valores entre 0,1 e 1,0.

Tabela 5.12 – Fatores de ponderação para a distância do talude ao eixo da via

DISTÂNCIA (DI)	Peso
DI > 10m	1,0
6m < DI ≤ 10m	0,7
3m < DI ≤ 6m	0,5
1m < DI ≤ 3m	0,3
DI ≤ 1m	0,1

No caso da plataforma ferroviária propriamente dita, as obras de intervenção possuem outra natureza e estão essencialmente associadas às ações de controle e minimização de deformações e recalques, no sentido de corrigir problemas advindos de sistemas ineficientes de drenagem, oscilações do nível local do lençol freático, variações das espessuras do lastro; defeitos da geometria na via, etc. A Tabela 5.13 apresenta os fatores de ponderação relativos à implantação de obras corretivas no âmbito da plataforma ferroviária.

Tabela 5.13 – Fatores de ponderação para as obras de intervenção executadas na PL

Obras de Intervenção	Peso
Trecho com via em boas condições geotécnicas	0,1
Trecho com via em obra de recuperação do sistema de drenagem	0,3
Trecho da via em obra de recuperação vertical (preenchimento do topo ≤ 0,6m)	0,5
Trecho da via em obra de recuperação vertical (preenchimento do topo > 0,6m)	0,7
Trecho da via com deformações/recalques e inexistência de obras de recuperação	1,0

A partir da estimativa dos parâmetros definidos anteriormente e com base nesta premissa básica da metodologia proposta neste estudo: "a vulnerabilidade e o risco geológico-geotécnico de ferrovias são fatores dinâmicos na análise de risco e a quantificação do risco geológico-geotécnico, em trechos previamente estabelecidos da via, deve estar emba-

sada num amplo acervo de dados consistentes do meio físico regional, permitindo uma efetiva aferição dinâmica dos problemas geodinâmicos e uma intervenção rápida e hierarquizada de trabalhos de mitigação ao longo da via", propõe-se a estimativa do risco geológico-geotécnico para uma ferrovia, de acordo com a seguinte relação:

$$R = S \times (iV. f_v)$$
sendo:
$$(5.4)$$

R – Índice de risco geológico-geotécnico correspondente a cada trecho;

S – Índice de suscetibilidade correspondente a cada trecho;

iV - Índice de vulnerabilidade correspondente a cada trecho;

f_v - Fator de correção do índice de vulnerabilidade do subtrecho.

Os índices de riscos geológico-geotécnicos (R) podem ser representados por um gráfico de risco (Figura 5.9), definidos em termos das coordenadas dos pontos expressos pelo índice de suscetibilidade (S), dado em ordenadas, e pelo valor da relação (iV. f_v), dado em abscissas (KPMGA, 1998 e FÜSER *et. al.*, 1999 *apud* BURGUER; BUCHHART, 2002). Nesta representação, a avaliação integrada dos resultados permite uma rápida e efetiva hierarquização dos riscos associados à extensão total da via.

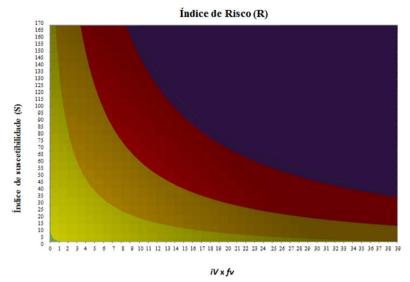


Figura 5.9 – Gráfico de riscos geológico-geotécnicos para ferrovia

Com base em critérios subjetivos (e continuamente aferidos pela prática de análise a um determinado empreendimento), faixas de valores dos índices de risco podem ser estabelecidas para caracterizar padrões de riscos variando desde "risco muito alto" a "risco insignificante" para os diferentes trechos da via (Tabela 5.14).

Tabela 5.14 – Classificação de índices de risco geológico-geotécnico para ferrovias

ÍNDICES DE RISCO (R)	
R≥1190 - MUITO ALTO	
1190 ≤ R < 550 − ALTO	
550 ≤ R < 200 – MÉDIO	
200 ≤ R < 10 - BAIXO	
R < 10 - INSIGNIFICANTE	

A Tabela 5.15 apresenta os resultados finais dos riscos geológico-geotécnicos (R) obtidos para os dois trechos de referência da EFC considerados, em termos de todas as etapas da metodologia proposta. Já a Figura 5.10 mostra a distribuição das frequências de risco à paralisação da via, devido a processos geodinâmicos, ao longo da EFC no ano de 2010 e início de 2011.

Tabela 5.15 – Índices de risco geológico-geotécnico para os trechos km 486+150 ao km 501+350 e km 749+150 ao km 764+45 da EFC

			Trecho	da Estrada de F	erro Cara	jás Km 48	6+490 a K	m 501+3	50			
Subtr	echo	Extensão	Extensão DI (LD)	DI (LD) DI (LE) indice Criti	ce Critico	(iC)	Eve	ento	s	v	R	
início	fim	(km)	DI (LD)	DI (LL)	LD	LE	PL	NA	INST	,		K
486.490	487,690	1.200	DI > 10m	DI > 10m	4	4	5		0.5	165	0,647	106,75
487,690	488,100	0.410	6m < DI < 10m	3m < DI < 6m	3	2	1			6	0.030	0.50
488,100	488 210	0.110	DI > 10m	6m < DI < 10m	2	2	1			2	0.002	0.00
488,210	488,900	0,690	6m < DI < 10m	lm <di td="" ⊰m<=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0,002</td><td>0,00</td></di>	2	2	1			2	0,002	0,00
488,900	489,700	0,800	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m < DI < 6m</td><td>4</td><td>4</td><td>2</td><td></td><td></td><td>47</td><td>0,237</td><td>44,57</td></di>	3m < DI < 6m	4	4	2			47	0,237	44,57
489,700	490.070	0.370	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m<di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0.059</td><td>2.36</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0.059</td><td>2.36</td></di>	3	3	1			10	0.059	2.36
490,070	490,400	0,330	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.025</td><td>0.00</td></di>	1	2	2			2	0.025	0.00
490.400	490,550	0.150	3m <di<6m< td=""><td>3m<di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0.00</td></di></td></di<6m<>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0.00</td></di>	2	2	1			2	0.002	0.00
490,550	490,700	0,150	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	2	1			6	0.030	0.40
490,700	491,050	0,350	3m < DI < 6m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0.00</td></di>	2	2	1			2	0.002	0.00
491,050	491,200	0.150	3m < DI < 6m	6m < DI < 10m	3	3	1			10	0.059	1,68
491,200	491,870	0,670	3m < DI < 6m	3m < DI < 6m	5	2	1			120	0.251	120,48
491,870	492.470	0.600	3m < DI < 6m	6m < DI < 10m	3	3	2			11	0.060	1.90
492,470	492,580	0.110	3m < DI < 6m	3m < DI < 6m	3	3	2			11	0.060	2,64
492,580	492.700	0.120	3m < DI < 6m	6m < DI < 10m	1	2	1			1	0.001	0.00
492,700	492,870	0.170	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>3</td><td>4</td><td>2</td><td></td><td></td><td>29</td><td>0.149</td><td>12.34</td></di>	6m < DI < 10m	3	4	2			29	0.149	12.34
492,870	493.030	0.160	6m < DI < 10m	DI > 10m	2	2	1			2	0.002	0.00
493.030	493,880	0.850	lm <di<3m< td=""><td>lm<di td="" ⊰m<=""><td>4</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td>29</td><td>0.149</td><td>48.01</td></di></td></di<3m<>	lm <di td="" ⊰m<=""><td>4</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td>29</td><td>0.149</td><td>48.01</td></di>	4	3	2			29	0.149	48.01
493,880	494,360	0,480	3m < DI < 6m	6m < DI < 10m	1	2	1			1	0.001	0.00
494.360	494,500	0.140	3m <di<6m< td=""><td>lm<di td="" ⊰m<=""><td>1.</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>0.001</td><td>0.00</td></di></td></di<6m<>	lm <di td="" ⊰m<=""><td>1.</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>0.001</td><td>0.00</td></di>	1.	2	1			1	0.001	0.00
494,500	494,900	0,400	3m < DI < 6m	6m < DI < 10m	5	5	3			243	0,515	357,56
494.900	495,620	0.720	3m <di<6m< td=""><td>3m<di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td><td>0.000</td><td>0.00</td></di></td></di<6m<>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td><td>0.000</td><td>0.00</td></di>	1	1	1			0	0.000	0.00
495.620	495,780	0.160	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m<di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>7</td><td>0.032</td><td>0.90</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>7</td><td>0.032</td><td>0.90</td></di>	3	2	2			7	0.032	0.90
495,780	496, 180	0,400	3m < DI < 6m	DI > 10m	1	2	1			1	0.001	0.00
496.180	496.480	0.300	3m < DI < 6m	3m < DI < 6m	2	2	1			2	0.002	0.00
496,480	496,750	0.270	DI > 10m	DI > 10m	1	1	1			0	0.000	0.00
496.750	497.300	0.550	3m < DI < 6m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0.059</td><td>2.40</td></di>	3	3	1			10	0.059	2.40
497,300	497,920	0,620	DI > 10m	3m < DI < 6m	2	2	2			3	0,004	0.00
497.920	498.200	0.280	3m <di<6m< td=""><td>3m<di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>6</td><td>0.030</td><td>0.70</td></di></td></di<6m<>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>6</td><td>0.030</td><td>0.70</td></di>	3	2	1			6	0.030	0.70
498.200	498.700	0.500	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m<di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>3</td><td>0.004</td><td>0,00</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>3</td><td>0.004</td><td>0,00</td></di>	2	2	2			3	0.004	0,00
498,700	499,170	0.470	3m <di<6m< td=""><td></td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0.059</td><td>2.40</td></di<6m<>		3	3	1			10	0.059	2.40
499,170	501,350	2,180	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>4</td><td>4</td><td>3</td><td></td><td></td><td>51</td><td>0.279</td><td>40.65</td></di>	6m < DI < 10m	4	4	3			51	0.279	40.65

			Trecho	da Estrada de F	erro Cara	iás Km 74	9+150 a I	Km 764+4	50			
Subt	recho	Extensão		DI (LE)	27 22	ce Crítico			ento	s	v	R
início	fim	(km)	DI (LD)	DI (LL)	LD	LE	PL	NA	INST	, ,	•	K
749.150	749,760	0.610	DI > 10m	DI > 10m	5	4	4	1.0	0.5	165	0,706	116,50
749,760	751,100	1,340	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>4</td><td>4</td><td>1,0</td><td>0,5</td><td>165</td><td>0,706</td><td>465,96</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>4</td><td>4</td><td>1,0</td><td>0,5</td><td>165</td><td>0,706</td><td>465,96</td></di>	5	4	4	1,0	0,5	165	0,706	465,96
751,100	752,354	1,254	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	5	2	1,0	0,5	125	0,443	113,01
752,354	752,480	0.126	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>129</td><td>0,309</td><td>159,44</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>129</td><td>0,309</td><td>159,44</td></di>	5	3	3			129	0,309	159,44
752,480	752,890	0.410	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>0,001</td><td>0,00</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>0,001</td><td>0,00</td></di>	1	2	1			1	0,001	0,00
752,890	753,400	0.510	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td><td>0.000</td><td>0,00</td></di>	6m < DI < 10m	1	1	1			0	0.000	0,00
753,400	753,700	0,300	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0,00</td></di>	2	2	1			2	0.002	0,00
753,700	754,000	0.300	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.003</td><td>0,00</td></di>	1	2	2			2	0.003	0,00
754,000	754,300	0,300	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>DI > 10m</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.003</td><td>0,00</td></di>	DI > 10m	1	2	2			2	0.003	0,00
754,300	754,700	0,400	lm < DI <3m	DI > 10m	2	1	1			1	0.001	0,00
754,700	757,000	2,300	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>lm < DI < 3m</td><td>2</td><td>2</td><td>4</td><td>1,0</td><td></td><td>25</td><td>0,296</td><td>29,60</td></di>	lm < DI < 3m	2	2	4	1,0		25	0,296	29,60
757,000	757,700	0,700	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>3</td><td>0.159</td><td>1.36</td></di>	6m < DI < 10m	2	2	2			3	0.159	1.36
757,700	757.980	0.280	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td><td>0.103</td><td>4.41</td></di>	6m < DI < 10m	3	3	3			15	0.103	4.41
757,980	758,620	0,640	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td><td>0,103</td><td>6,20</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td><td>0,103</td><td>6,20</td></di>	3	3	3			15	0,103	6,20
758,620	759,000	0.380	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td><td>0.103</td><td>6,20</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td><td>0.103</td><td>6,20</td></di>	3	3	3			15	0.103	6,20
759,000	760,200	1,200	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0.00</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0.00</td></di>	2	2	1			2	0.002	0.00
760,200	761,470	1,270	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>3</td><td>3</td><td>1,0</td><td>0.5</td><td>11</td><td>0,251</td><td>11,04</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>3</td><td>3</td><td>1,0</td><td>0.5</td><td>11</td><td>0,251</td><td>11,04</td></di>	2	3	3	1,0	0.5	11	0,251	11,04
761,470	761,640	0,170	lm < DI <3m	lm < DI <3m	3	1	1	1,0		5	0,000	1,00
761,640	762,200	0,560	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>lm < DI < 3m</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td><td>0.000</td><td>0,00</td></di>	lm < DI < 3m	1	1	1			0	0.000	0,00
762,200	762,500	0.300	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td><td>0.000</td><td>0.00</td></di>	1	1	1			0	0.000	0.00
762,500	763,000	0.500	DI > 10m	DI > 10m	1	1	1			0	0.000	0,00
763,000	763,300	0,300	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	2	2	1			2	0.001	0.00
763,300	763,690	0,390	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	5	3			129	0,309	81,35
763,690	764,000	0.310	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	5	3	1,0	0.5	129	0,485	127,68
764,000	764,450	0.450	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>5</td><td>3</td><td></td><td></td><td>129</td><td>0,309</td><td>159,44</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>5</td><td>3</td><td></td><td></td><td>129</td><td>0,309</td><td>159,44</td></di>	3	5	3			129	0,309	159,44

Suscetibilidade (S)				
S ≥ 160	alta			
40 ≤ S< 160	média			
20 ≤S < 40	moderado			
4 ≤ S < 20	baixo			
S < 4	insignificante			

indice Vulnerabilidade (iV)	Vune rabilidade (V)		
$0.8 \le iV < 1.0$	alto		
$0.6 \le iV < 0.8$	me dia		
$0.4 \le iV < 0.6$	moderado		
0,2< iV < 0,4	baixo		
iV ≤ 0,2	insignificante		

RISCO(R)	
R≥1190 - MUITO ALTO	
1190 ≤ R < 550 - ALTO	
550 ≤ R <200 - MEDIO	
200 ≤ R < 10 - BAIXO	
10 > R - INSIGNIFIC ANTE	

DI	Distância da PL ao eixo da via
LD	Lado direito
LE	Lado esquerdo
PL	Plataforma ferroviária
	aterro
	corte
	core/aterro
	instabilidade (INST)
	Nivel d'água elevado (NA)

	indice de Criticidade (iC)
5	critico
4	des favoráve1
3	modera do
2	inrrelevante
1	Inexistência de feições ou sinais de processos erosivos

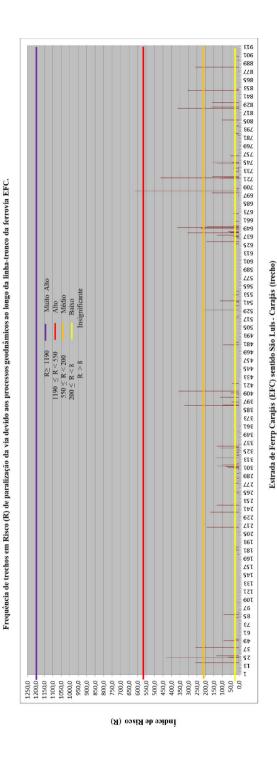


Figura 5.10 - Distribuição do trechos com risco de paralisação da via (ano 2010/2011), devido a processos geodinâmicos ao longo da linha-tronco da ferrovia EFC

A metodologia descrita foi aplicada ao longo de toda extensão da EFC, com base na determinação dos parâmetros de referência e dos índices de riscos geológico-geotécnicos, para cada um dos 914 subtrechos previamente definidos. Os resultados refletem a situação da via na atualidade e, evidentemente, tendem a variar ao longo da vida útil do empreendimento, em face de potenciais variações dos condicionantes geotécnicos locais e de intervenções diversas, conforme a dinâmica própria de operação da via.

5.4. Setorização geológico-geotécnica da EFC

Com base no princípio geral da Metodologia TMD aplicada a pavimentos ferroviários (GOMES, 2009): "prévia subdivisão da via em setores ou trechos de referência, a partir da demarcação de segmentos, com o subleito caracterizado por um mesmo domínio geológico-geotécnico" e nas técnicas estatísticas da análise multivariada, procedeu-se à compartimentação da Estrada de Ferro Carajás em diferentes domínios geológico-geotécnicos.

Para a aplicação da técnica de *Cluster* (agrupamento), foram adotadas as seguintes premissas conceituais (HAIR *et. al.*, 2004):

- A análise de agrupamento deve ser aplicada a partir de um modo confirmatório, usando-a para identificar grupos que já têm uma fundamentação conceitual estabelecida quanto à sua existência;
- O pesquisador sempre deve lembrar que apenas achar agrupamentos não necessariamente valida a sua existência; suportes conceituais, além da validação dos agrupamentos, **são potencialmente significantes**;

• A solução de agrupamento não é passível de ampla generalização, característica de qualquer técnica estatística. Porém, ela é considerada mais dependente das medidas usadas para caracterizar os objetos do que outras técnicas, e sua representatividade vai depender, em larga escala, da consistência das variáveis usadas na análise.

O banco de dados da Estrada de Ferro Carajás (projeto básico da ferrovia de 1978, duplicação da via em 2005, procedimentos de inspeção realizados neste trabalho e os resultados de suscetibilidade) possibilitou a compartimentação da via em 914 subtrechos ao longo da linha-tronco de 892km da EFC, que foram correlacionados com base em dados de litologias, das unidades geomorfológicas e da classificação dos solos tipo SUCS.

Um software específico (Software R) foi utilizado para o processamento dos dados pela análise multivariada pelo método de Cluster (agrupamento dos dados), no qual foi realizada a análise de classificação a partir da análise multivariada e medidas de semelhança definindo o método de agregação de classes. O método hierárquico adotado foi o de vizinho mais próximo (Single-Linkage Method), baseado na distância euclidiana entre os pontos de cada subgrupo. Dessa forma, foi obtido o enquadramento dos trechos em função das suas estruturas litoestratigráficas, unidades geomorfológicas, ambiente deposicional e sistema de classificação dos solos SUCS. Tais induções são resultado de conhecimento de especialista prévio (as unidades litoestratigráficas se repetem ao longo da extensão da linha; predomínio de ambiente deposicional sedimentar ao longo do percursos, etc.).

Os dendrogramas gerados pelo *software* foram aplicados para as seguintes unidades litoestratigráficas: Cobertura Dentrítica Laterítica, Formação Itaperucu, Depósitos Aluvionares e Formação Couto Magalhães, que contemplam aproximadamente 750 quilômetros da Estrada de Ferro Carajás e comportam cerca de 84% dos dados da via. A figura 5.11 ilustra o dendograma gerado para o domínio litoestratigráfico Formação Couto Magalhães. No dendrograma, a escala vertical indica

o nível de similaridade e, no eixo horizontal, são marcadas as variáveis (trechos), na ordem em que são agrupadas.

As demais unidades litoestratigráficas (Formação Paredão, Formação Codó, Suíte Metamórfica Bacajá, Grupo Buritanos, Sequência Metavulcanossedimentar, Complexo Xingu, Granito Cigano e Grupo Rio Novo) foram analisadas como comportando, cada uma, um determinado compartimento geológico-geotécnico. Nessa concepção, a correspondente setorização em trechos foi estabelecida com base na correlação entre os valores dos parâmetros de suscetibilidade e de classificação dos solos locais.

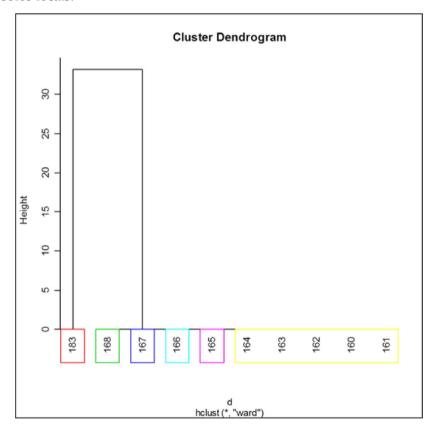


Figura 5.11– Dendograma gerado pelo *Software* R para o domínio litoestratigráfico Formação Couto Magalhães na Estrada de Ferro Carajás (EFC)

A Tabela 5.16 apresenta a aplicação da setorização nos dois trechos de referência (km 486+150 ao km 501+350 e km 749+150 ao km 764+450). Finalizando o processo de setorização, a tabela 5.17 apresenta o resultado obtido para a setorização geológico-geotécnica da Estrada de Ferro Carajás. A abordagem sistêmica dos dados, dos parâmetros e dos resultados finais desses estudos está apresentada no Anexo VII deste trabalho.

Tabela 5.16- Setorização Geológico-Geotécnica (SGG) nos dois trechos de referência km 486+150 ao km 501+350 e km 749+150 ao km 764+450 da EFC

	Subtr	b.	Extensão	Tiecho da Esti	ada de Ferro Ca	najas ikin	400 490	a Ivili co i	7320				
SGG		2014	Extens ao	DI (LD)	DI (LE)	indi	e Crítico	(iC)	Ev	ento	s	v	R
200	mkio	fim	(km)	DI (LD)	DI(LL)	LD	LE	PL	NA	INST	1 -		••
	485.490	487.690	1200	DI > 10m	DI > 10m	4	4	5		0,5	165	0.647	106,7
	487.690	488.100	0.410	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>6</td><td>0.030</td><td>0.5</td></di>	3	2	1			6	0.030	0.5
	488,100	488,210	0110	DI > 10m	6m < DI < 10m	2	2	1			2	0.002	0.0
	488.210	488.900	0.690	6m <di <10m<="" td=""><td>lm≤DI≤m</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0.0</td></di>	lm≤DI≤m	2	2	1			2	0.002	0.0
	488,900	489,700	0.800	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>4</td><td>4</td><td>2</td><td></td><td></td><td>47</td><td>0.237</td><td>44.5</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>4</td><td>4</td><td>2</td><td></td><td></td><td>47</td><td>0.237</td><td>44.5</td></di>	4	4	2			47	0.237	44.5
	489,700	490,070	0370	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0.059</td><td>2.3</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0.059</td><td>2.3</td></di>	3	3	1			10	0.059	2.3
	490,070	490,400	0,330	6m <di <10m<="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0,025</td><td>0,0</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0,025</td><td>0,0</td></di>	1	2	2			2	0,025	0,0
	490,400	490,550	0150	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0.9</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0.9</td></di>	2	2	1			2	0.002	0.9
	490.550	490,700	0150	6m <di <10m<="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>6</td><td>0.030</td><td>0.</td></di>	6m < DI < 10m	3	2	1			6	0.030	0.
	490,700	491.050	0350	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0.</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0.</td></di>	2	2	1			2	0.002	0.
m	491.050	491.200	0150	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0.059</td><td>1.</td></di>	6m < DI < 10m	3	3	1			10	0.059	1.
	491,200	491.870	0.670	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>120</td><td>0.251</td><td>120.</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>120</td><td>0.251</td><td>120.</td></di>	5	2	1			120	0.251	120.
-	491.870	492.470	0.500	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td>11</td><td>0.060</td><td>1.</td></di>	6m < DI < 10m	3	3	2			11	0.060	1.
퓔	492,470	492.580	0110	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td>11</td><td>0.060</td><td>2.</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td>11</td><td>0.060</td><td>2.</td></di>	3	3	2			11	0.060	2.
Cobertura destrítica lateritica	492.580	492,700	0120	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>0.001</td><td>0.</td></di>	6m < DI < 10m	1	2	1			1	0.001	0.
1	492,700	492.870	0170	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>3</td><td>4</td><td>2</td><td></td><td></td><td>29</td><td>0.149</td><td>12.</td></di>	6m < DI < 10m	3	4	2			29	0.149	12.
1	492,870	493.030	0160	6m <di <10m<="" td=""><td>DI > 10m</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0.</td></di>	DI > 10m	2	2	1			2	0.002	0.
-	493.030	493.880	0.850	lm <di gm<="" td=""><td>lm≤DI≤3m</td><td>4</td><td>3</td><td>2</td><td></td><td></td><td>29</td><td>0.149</td><td>48</td></di>	lm≤DI≤3m	4	3	2			29	0.149	48
	493.880	494.360	0.480	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>0.001</td><td>0</td></di>	6m < DI < 10m	1	2	1			1	0.001	0
Ē	494,360	494,500	0,140	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>lm≤DI≤m</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>0,001</td><td>0</td></di>	lm≤DI≤m	1	2	1			1	0,001	0
3	494,500	494,900	0.400	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>5</td><td>5</td><td>3</td><td></td><td></td><td>243</td><td>0.515</td><td>357</td></di>	6m < DI < 10m	5	5	3			243	0.515	357
7	494,900	495.620	0.720	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td><td>0.000</td><td>0.</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td><td>0.000</td><td>0.</td></di>	1	1	1			0	0.000	0.
	495,620	495,780	0160	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>7</td><td>0.032</td><td>0.</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>7</td><td>0.032</td><td>0.</td></di>	3	2	2			7	0.032	0.
	495.780	496.180	0.400	3m < DI < 6m	DI > 10m	1	2	1			1	0.001	0.
	496.180	496,480	0300	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0.</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0.</td></di>	2	2	1			2	0.002	0.
	496,480	496,750	0270	DI > 10m	DI > 10m	1	1	1			0	0.000	0.
	496,750	497,300	0,550	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0,059</td><td>2</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0,059</td><td>2</td></di>	3	3	1			10	0,059	2
	497,300	497,920	0.620	DI > 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>3</td><td>0.004</td><td>0.</td></di>	2	2	2			3	0.004	0.
	497,920	498.200	0280	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>6</td><td>0.030</td><td>0.</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>6</td><td>0.030</td><td>0.</td></di>	3	2	1			6	0.030	0.
	498,200	498,700	0.500	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>3</td><td>0.004</td><td>0</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>3</td><td>0.004</td><td>0</td></di>	2	2	2			3	0.004	0
	498.700	499.170	0.470	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0.059</td><td>2.</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td>10</td><td>0.059</td><td>2.</td></di>	3	3	1			10	0.059	2.
	499.170	501.350	2180	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>4</td><td>4</td><td>3</td><td></td><td></td><td>51</td><td>0.279</td><td>40.</td></di>	6m < DI < 10m	4	4	3			51	0.279	40.

				Trecho da Est	rada de Ferro C	arajas Kn	1 749+150	a Km 76	4+450				
SGG	Subti	re cho	Extensão	DI (LD)	DI (LE)	índi	ce Crîrico	(iC)	Ev	ento	s	v	R
300	início	1m	(km)	DI (LD)	DI (LL)	LD	LE	PL	NA	INST	,		K
Cobertura	749.150	749.760	0.610	DI > 10m	DI > 10m	5	4	4	1.0	0.5	165	0.706	116.5
	749,760	751.100	1.340	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>4</td><td>4</td><td>1.0</td><td>0.5</td><td>165</td><td>0.706</td><td>465.9</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>4</td><td>4</td><td>1.0</td><td>0.5</td><td>165</td><td>0.706</td><td>465.9</td></di>	5	4	4	1.0	0.5	165	0.706	465.9
	751.100	752,354	1.254	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	- 5	2	1.0	0.5	125	0.443	113,0
de ntritic a	752354	752,480	0.126	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>129</td><td>0,309</td><td>159.4</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>5</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>129</td><td>0,309</td><td>159.4</td></di>	5	3	3			129	0,309	159.4
	752,480	752.890	0.410	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>0.001</td><td>0.0</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>0.001</td><td>0.0</td></di>	1	2	1			1	0.001	0.0
laterítica 1	752.890	753,400	0.510	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td><td>0.000</td><td>0.0</td></di>	6m < DI < 10m	1	1	1			0	0.000	0.0
	753,400	753,700	0,300	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0,002</td><td>0,0</td></di>	2	2	1			2	0,002	0,0
	753,700	754.000	0.300	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.003</td><td>0.0</td></di>	1	2	2			2	0.003	0.0
	754,000	754,300	0.300	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>DI > 10m</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.003</td><td>0.0</td></di>	DI > 10m	1	2	2			2	0.003	0.0
	754,300	754,700	0.400	lm < DI <3m	DI > 10m	2	1	1			1	0.001	0.0
	754,700	757,000	2,300	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>lm < DI < 3m</td><td>2</td><td>2</td><td>4</td><td>1,0</td><td></td><td>25</td><td>0,296</td><td>29,6</td></di>	lm < DI < 3m	2	2	4	1,0		25	0,296	29,6
	757,000	757,700	0.700	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td></td><td></td><td>3</td><td>0.159</td><td>1.3</td></di>	6m < DI < 10m	2	2	2			3	0.159	1.3
=	757,700	757.980	0.280	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>6m < DI < 10m</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td><td>0.103</td><td>4.4</td></di>	6m < DI < 10m	3	3	3			15	0.103	4.4
Couto Magalhäes 1	757,980	758.620	0.640	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td><td>0.103</td><td>6.2</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td><td>0.103</td><td>6.2</td></di>	3	3	3			15	0.103	6.2
2	758,620	759,000	0,380	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td><td>0,103</td><td>6,2</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>3</td><td>3</td><td></td><td></td><td>15</td><td>0,103</td><td>6,2</td></di>	3	3	3			15	0,103	6,2
ď	759.000	760,200	1.200	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>- 1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0.0</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>2</td><td>- 1</td><td></td><td></td><td>2</td><td>0.002</td><td>0.0</td></di>	2	2	- 1			2	0.002	0.0
5	760,200	761.470	1.270	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>3</td><td>3</td><td>1.0</td><td>0.5</td><td>11</td><td>0.251</td><td>11.0</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>2</td><td>3</td><td>3</td><td>1.0</td><td>0.5</td><td>11</td><td>0.251</td><td>11.0</td></di>	2	3	3	1.0	0.5	11	0.251	11.0
7	761,470	761,640	0.170	lm≤DI≤m	lm < DI < 3m	3	1	1	1.0		5	0,000	1.0
2	761.640	762.200	0.560	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>lm < DI <3m</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td><td>0.000</td><td>0.0</td></di>	lm < DI <3m	1	1	1			0	0.000	0.0
	762.200	762,500	0.300	6m < DI < 10m	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>0</td><td>0.000</td><td>0.0</td></di>	1	1	1			0	0.000	0.0
	762.500	763.000	0.500	DI > 10m	DI > 10m	1	1	1			0	0.000	0.0
	763,000	763,300	0,300	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	2	2	1			2	0,001	0,0
	763,300	763,690	0.390	6m < DI < 10m	6m <di 10m<="" <="" td=""><td>3</td><td>5</td><td>3</td><td></td><td></td><td>129</td><td>0.309</td><td>81.3</td></di>	3	5	3			129	0.309	81.3
	763.690	764.000	0.310	6m < DI < 10m	6m < DI < 10m	3	5	3	1.0	0.5	129	0.485	127.6
	764,000	764,450	0.450	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>5</td><td>3</td><td></td><td></td><td>129</td><td>0.309</td><td>159,4</td></di></td></di>	3m <di 6m<="" <="" td=""><td>3</td><td>5</td><td>3</td><td></td><td></td><td>129</td><td>0.309</td><td>159,4</td></di>	3	5	3			129	0.309	159,4

Suscetibilidade (S)				
S ≥ 160	alta	indice V	ulnerabilidade (iV)	Vunerabilida	ade (V)
40 ≤ S< 160	média		$,8 \le iV < 1,0$	alto	
20 <s 40<="" <="" td=""><td>moderado</td><td></td><td>$,6 \le iV < 0,8$</td><td>media</td><td></td></s>	moderado		$,6 \le iV < 0,8$	media	
4 < S < 20	baixo		$4 \le iV < 0.6$	moderado	
· -		(),2 <iv<0,4< td=""><td>baixo</td><td></td></iv<0,4<>	baixo	
S < 4	insignificante		iV ≤ 0,2	insignificante	
		SGG	Setorização Geológi	ica Geotécnica	
		DI	Distância da PL ao	eixo da via	
		LD	Lado d i reito		
RISCO(R)		LE	Lado esquerdo		
R≥1190 - MUITO ALTO		PL	Plataforma ferroviár	ia	
1190 ≤ R < 550 - ALTO			aterro		
550 ≤ R <200 - MEDIO			corte		
200 ≤ R < 10 - BAIXO			core/aterro		_
10 > R - INSIGNIFIC ANTE			instabilidade (INST)	-

$\overline{}$
ب
EEC
$\overline{}$
ás
·Æ
araj
٣
0
Ξ
تة
ш.
) da Estrada de Fe
Ö
ū
₹
ŭ
Ö
<u>.</u>
9
\sim
٠,
æ
.≌
⋍
γ
₹
Geotéci
9
ò
ológico
0.0
<u> </u>
0
'n
\sim
ırização
$\dot{\mathbf{r}}$
29
.⊑
ā
S
1
15.17 - Seto
٦)
Tabela
96
╼
$\overline{}$

	Trecho (km)	SUCS Material de cobertura	Aspectos Geomorfológicos Ambiente Deposicional	Suscetibilidade
SGG Depósitos Aluvionares 1	km 0 a km 9	Areia siltosa	Relevo plano em aberturas detríticas com latossolos arenosos ou siltosos, podem ocorrer intercalações em camadas horizontalizadas	Insignificante
SGG Depósitos Aluvionares 2	km 337 a km 348 km 248 a km 297	Solo argiloso com baixa com- pessibilidade	Bem selecionados, quando de origem fluvial	Insignificante Baixa (272 a km 297) Média (km 346 a km 347)
SGG Cobertura dentrítica laterítica l	km 10 a km 119	Solo argiloso com baixa com- pessibilidade	Depósitos marinhos, flúvio-aluviais e solos lateríticos. Predominantemente argilosos ou argilo-siltosos	Insignificante Média (km 35; km 47 a 51; km76,5)
	km 743 a km 753		Sedimentos terrigenos.Vales pouco profundos com declividade das vertentes medianas a suaves	Alta (km 749 a 753) Baixa (km 757 a 762)
SGG Cobertura dentrítica laterí- tica 2	km 120 a km 144 km 298 a km 336	Areia siltosa	Sedimentos terrígenos. Solos siltosos, com depósitos arenosos	Baixa Média (km 336)
SGG Cobertura dentrítica laterítica 3	km 448 a km 551	Areia argilosa	Sedimentos terrígenos. Solos predominantemente argilosos; con- têm depósitos arenosos	Média a alta
SGG Itaperucu 1	km 145 a km 247	Solo argiloso com baixa com- pessibilidade	Sistema fluvial c/ contribuição lacustre, lagunar ou estuarino	Insignificante Média (km 175 a 177)
SGG Itaperucu 2	km 349 a km 447	Areia siltosa	Superfície rampeada em direção ao rio Gurupi, talhada em siltitos e argilitos com intercalações de arenitos argilosos, modelada nos siltitos, argilitos e por vezes arenitos argilosos	Média a alta (km 388 ao km 416)
SGG Itaperucu 3	km 552 a km 647 km 672 a km 682	Areia siltosa e Areia argilosa	Apresentam vales pouco profundos com declividade das vertentes medianas a suaves, modelada nos siltitos, argilitos e por vezes arenitos argilosos	Média a alta (km 673 a km 678; km 722 a km 740)

SGG Couto Magalhaes 1	km 683a km 743 km 753 a km 784	Areia argilosa	Ocorrem, geralmente, sob forma de solo residual maduro (maioria de filito quartzoso ou sericítico), com estruturas reliquiares (foliação e fraturas), causando planos preferenciais de escorregamento. Nos leitos dos cursos dágua podem ocorrer sob a forma de rocha sã ou pouco alterada.	Insignificante Moderada a baixa (km 714 a km 729) Alto (km 732 a 734)
SGG Couto Magalhães2	km 785 a km 807	Areia siltosa	Faixa de transição com a morfologia da Serra dos Carajás. Solo residual maduro de textura silto-arenosa (areia fina)	Média (km788 a km 791)
SGG Formação Codó,	km 647 a km 671	Areia siltosa	Relevos modelados por dissecação fluvial. Solo residual maduro de textura silto-arenosa (areia fina) ou solos argilosos.	Média a alta
SGG Suíte Met Bacajá,	km 807 a km 818	Solo argiloso com baixa com- pessibilidade	Faixa de transição com a morfologia da Serra dos Carajás. Relevos modelados por dissecação fluvial. Solo residual maduro de textura argilosa (solos argilosos).	Insignificante
SGG Formação Paredão	km 808a km 827	Areia siltosa	Faixa de transição com a morfologia da Serra dos Carajás. Solo residual maduro, de textura silto-arenosa (areia fina) ou solos argilosos.	Insignificante Média a baixa (km 819 a km 823)
SGG Grupo Buritanos	km 827 a km 840	Areia siltosa	Faixa de transição com a morfologia da Serra dos Carajás. Solo residual maduro de textura silto-arenosa (areia fina) ou solos argilosos.	Insignificante Média a baixa (km 839 a 842)
SGG Sequência Metavulcanosse- dimentar	km 841 a km 845	Solo argiloso com alta com- pressibilidade	Faixa de transição com a morfologia da Serra dos Carajás. Solo residual maduro de textura argilosa (solos argilosos).	Insignificante
SGG Complexo Xingu	km 846 a km 859 km 876 a km 892	Solo argiloso com alta com- pressibilidade	Faixa de transição com a morfologia da Serra dos Carajás. Solo residual maduro de textura argilosa (solos argilosos).	Insignificante
SGG Granito Cigano	km 860 a km 867	Areia siltosa	Faixa de transição com a morfologia da Serra dos Carajás. Solo residual maduro de textura silto-arenosa (areia fina) ou solos argilosos.	Alta
SSG Grupo Rio Novo	km 868 a km 875	Solo argiloso com alta com- pressibilidade	Faixa de transição com a morfologia da Serra dos Carajás. Solo residual maduro de textura argilosa (solos argilosos).	Insignificante



DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA

6.1. INTRODUÇÃO

A metodologia proposta contempla análises e correlações diversas, distribuídas em diferentes etapas. Apesar de simples, demanda a determinação de diferentes fatores até a obtenção dos índices finais de risco. Nesse sentido, buscou-se, ainda no escopo do trabalho, o desenvolvimento de um *software* específico para uma rápida aplicação dos princípios, das correlações e dos cálculos inseridos no contexto da metodologia proposta neste estudo.

Essa ferramenta proporciona a subdivisão da ferrovia em trechos fixos, mediante cruzamentos das bases geológicas e litológicas ao longo do percurso da via, permitindo a identificação dos segmentos da via com suscetibilidade a processos geodinâmicos, a sua vulnerabilidade e, por fim, os índices do risco geológico-geotécnico de cada trecho associados à interdição da via. Além disso, constitui dispositivo prático para inspeções de campo durante vistorias de manutenção, proporcionando o contínuo monitoramento de integridade da via a partir de um banco de dados variável.

O desenvolvimento do software denominado GEOVIA – Sistema de Análise de Riscos Geológico-Geotécnicos de Ferrovias – será descrito a seguir. Inicialmente, apresenta-se o programa computacional de maneira geral, em termos da plataforma computacional e da linguagem de programação adotada para, em seguida, expor, de forma resumida, a sistemática dos procedimentos para a utilização do programa.

6.2. PROGRAMA GEOVIA

O Programa GEOVIA - Sistema de Análise de Riscos Geológico-Geotécnicos de Ferrovias foi desenvolvido na plataforma Microsoft Visual Studio, versão 2010. Essa plataforma permite desenvolver uma ampla gama de ferramentas para elaboração de *softwares* dentro das mais diversas linguagens como, por exemplo, *C*++, *C*#, .NET ou Visual Basic, que proporcionam a conexão com diversos outros projetos do gênero de banco de dados.

A interface permite ao usuário inserção de dados, análise elaborada, e acesso dinâmico aos dados, utilizando os recursos disponibilizados pelo Visual Studio. Dessa forma, os elementos gráficos adotados comportam diversas funções no sistema como, por exemplo, a filtração, a inserção e a atualização dos registros, permitindo análises sistemáticas e dinâmicas do fluxo dos dados disponíveis.

O desenvolvimento do *software* foi feito em linguagem *C#* (*C sharp*), caracterizada como uma linguagem de programação criada para o desenvolvimento de uma variedade de aplicações que podem ser executadas em ambiente .*NET Framework*. Trata-se de uma linguagem orientada a eventos, derivada da tradicional linguagem *C++*. A linguagem *C#* une recursos importantes das linguagens *C++* e Java, permitindo que a programação se dê a partir de chamadas a eventos do sistema. É considerada como uma linguagem simples, poderosa, segura e orientada ao tratamento de objetos. As várias inovações no *C#* permitem o desenvolvimento rápido de aplicações, mantendo as bases operacionais e o estilo geral das linguagens *C*. Na formulação da linguagem, toda vez que o usuário assume uma determinada ação, o programa executa um determinado conjunto de códigos intrinsecamente relacionados àquela ação.

A proposição do *software* buscou uma interação bastante simples e direta com o usuário, de forma a proporcionar não apenas o código de aplicação da metodologia proposta, mas também uma ferramenta de fácil atuação para a aquisição, para o tratamento e para a alteração dos dados disponíveis. Tal premissa permite a sua utilização direta nas próprias inspeções de campo.

Ao se executar o *software* GEOVIA, o usuário tem acesso imediato à tela inicial do programa, chamada de *Control Painel* (Figura 6.1), que inclui o nome do programa e o traçado geral da EFC. Esse módulo permite o acesso do usuário às funções do programa por meio de sua identificação

e respectivos comandos de *login* e de senha. Inserindo esses dados e clicando em OK, o usuário tem acesso ao programa.



Figura 6.1- Tela de acesso ao programa GEOVIA

Ao acessar o programa, o usuário abre a tela principal (Figura 6.2). Esse módulo permite o gerenciamento das principais funções do programa.

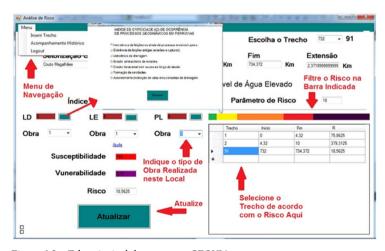


Figura 6.2 - Tela principal do programa GEOVIA

A opção fechada de acesso ao programa tem o intuito de não só proteger os dados, mas também a gestão do histórico e da sequência dos registros efetuados, auxiliando o controle das vistorias e das intervenções realizadas ao longo da ferrovia.

Na tela principal, na coluna à esquerda (alto da tela), localiza-se o Menu. O usuário ao posicionar o *mouse* sobre esse comando, acionará a linha de *status* com os comandos existentes e uma descrição sucinta sobre a função de cada um deles. O comando Inserir Trecho permite ao usuário identificar e cadastrar informações predeterminadas, referentes ao trecho escolhido, para a estimativa do risco geológico-geotécnico associado a ele. Em relação aos subtrechos indicados por LD, LE e PL, ao acionar a tecla "ajuda" (Figura 6.3), pode-se acessar a opção "Relações de Obras de Contenção e Retenção", sendo indicadas às correspondentes ao trecho, por meio de uma listagem prévia, apresentada na tela auxiliar.

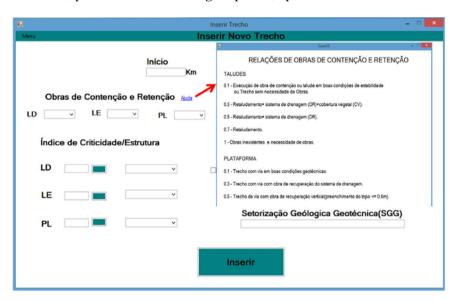


Figura 6.3 - Tela para a entrada de dados para estimativa do tipo de obras de intervenção

Na sequência, o programa apresenta uma tela auxiliar para a estimativa dos índices de criticidade, listando as feições de instabilidade que foram detectadas a partir das observações de campo. (Figura 6.4)

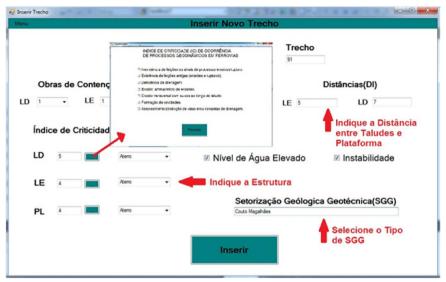


Figura 6.4 - Tela para a entrada de dados para estimativa dos índices de criticidade

Nessa tela auxiliar, são selecionados os principais aspectos e fatores que podem estar associados às causas, isto é, às condições em relação à existência de processos geodinâmicos que podem proporcionar riscos de interdição da ferrovia. A determinação do índice crítico (iC) é feita para os subtrechos lado direito (LD), lado esquerdo (LE) e plataforma (PL). A correlação das feições/magnitudes existentes e os correspondentes índices de criticidade, base de referência adotada pelo programa, está apresentada no Anexo VIII deste trabalho.

À medida que são inseridos os trechos, com suas respectivas informações fixas (localização, distância da plataforma ao eixo da via, tipo de obra de implantação, se corte ou aterro), os dados são armazenados no programa, e o trecho fica automaticamente cadastrado. As informações podem ser consultadas de forma isolada, assim como a atualização das condições locais da via.

A seguir, são computados os valores dos parâmetros de suscetibilidade, vulnerabilidade e de risco, correspondentes ao trecho analisado. (Figura 6.5)

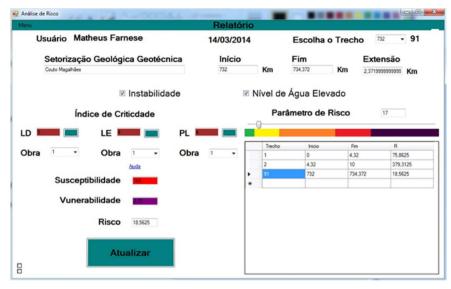


Figura 6.5 – Tela para as estimativas da suscetibilidade, vulnerabilidade e risco.

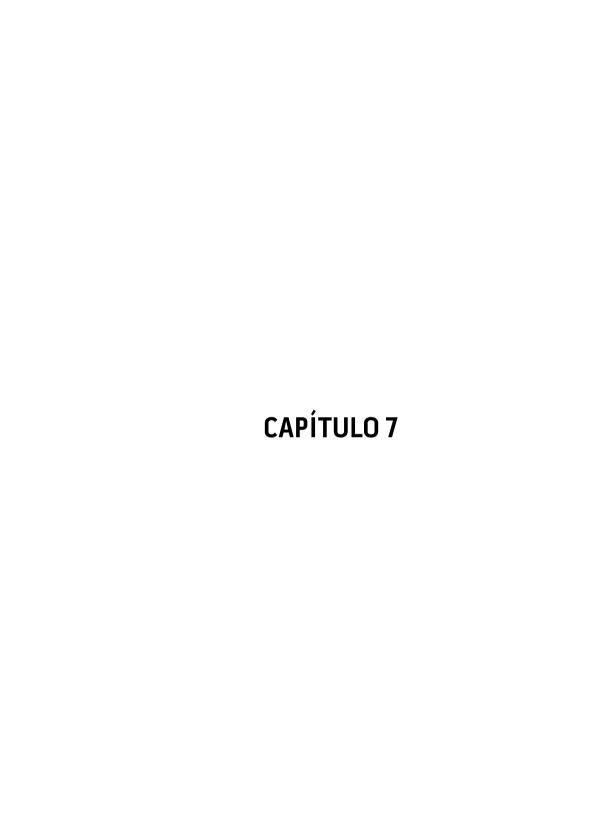
O índice de risco do trecho é caracterizado diretamente na barra "Parâmetro de Risco" pela respectiva cor. A tabela imediatamente abaixo não apenas identifica o valor desse índice para o trecho analisado, como permite uma correlação imediata com os índices de risco de outros trechos da via.

Por meio do comando "Acompanhamento Histórico" (Figura 6.6), essa análise passa a ter um caráter de controle e monitoramento sistemático da via ao longo do tempo, mediante o acompanhamento dinâmico dos registros de riscos de diferentes trechos da via, durante toda a vida útil do empreendimento. Esse acompanhamento é fundamental para os trabalhos de logística e de manutenção periódica da via.

- Acompanhamento Histórico	00 00 52-		Total College	-	- 0 X
1	Acompanha	mento	Histórico		
	Escolha Trecho	14/03			
	Nome Matheus Famese				
	LD	LE 4	PL 4		
Suscep	ibilidade 🌃	Vunera	bilidade 135		
	Risco	18,5625	Baixo		
Obra Realiz	ada : Obra Inexis	tente - Trec	ho com precis	ão de Ol	bra

Figura 6.6 – Tela correspondente ao comando "Acompanhamento Histórico"

A cada vistoria e/ou implantação de uma obra de intervenção no trecho cadastrado, o usuário poderá atualizar as informações relativas à situação da via, resultando em um novo índice de risco geológico-geotécnico para o trecho analisado e, em síntese, para todo o traçado da EFC.



CONCLUSÕES

7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da estimativa dos parâmetros de suscetibilidade e de vulnerabilidade, tornou-se possível quantificar o risco geológico-geotécnico associado ao traçado de uma ferrovia, com base na metodologia proposta neste trabalho, fundamentada no seguinte princípio geral: a vulnerabilidade e o risco geológico-geotécnico de ferrovias são fatores dinâmicos na análise de risco, e a quantificação do risco geológico-geotécnico, em trechos previamente estabelecidos da via, deve estar embasada num amplo acervo de dados consistentes do meio físico regional, permitindo uma efetiva aferição dinâmica dos problemas geodinâmicos e uma intervenção rápida e hierarquizada de trabalhos de mitigação ao longo da via.

O desenvolvimento da presente pesquisa foi motivado pelo propósito de se promover melhor prevenção e monitoramento dos movimentos de massa potencialmente passíveis de serem mobilizados ao longo de uma obra linear de grande extensão, como são, por exemplo, as ferrovias. Tais eventos são particularmente deletérios, na medida em que podem ocasionar a paralisação do tráfego e a própria interdição da via, com graves ônus financeiros para o empreendimento, quando não acarretando perdas de vidas humanas.

Nesse contexto, um amplo programa de estudos integrados permitiu a proposição de uma metodologia para diagnóstico e quantificação do risco associado a problemas geológico-geotécnicos no âmbito de uma ferrovia. A premissa básica da proposta consiste em considerar a ferrovia como um todo, como um corpo "único", que é, então, submetido a um processo de compartimentação em trechos de referência, associados a domínios geológico-geotécnicos comuns. Mediante a caracterização de trechos, subtrechos e segmentos, a via foi discretizada em termos de

áreas, incorporando domínios associados ao Lado Esquerdo (LE), à Plataforma (PL) e ao Lado Direito (LD) da via.

Desenvolvida em diferentes etapas, a metodologia compreende a determinação dos valores de índices de criticidade (iC), de índices e padrões de suscetibilidade (S) e de índices e padrões de vulnerabilidade (V), correspondentes aos diferentes trechos de uma ferrovia, tomados como referência. A integração desses dados permite estabelecer sistemáticas para a aferição e a hierarquização dos trechos da ferrovia em termos de riscos geológico-geotécnicos, parte integrante da 4ª etapa da proposta.

A partir dos resultados dos padrões de suscetibilidade (S) e de vulneravilidade (V), torna-se possível a quantificação do risco geológico-geotécnico, associado ao trecho analisado, considerando as influências relativas da distância da plataforma ao eixo da via (DI) e as obras de intervenção (EC) realizadas. Essas influências são incorporadas à estimativa do risco final por meio da inserção nos cálculos de um parâmetro adicional, designado como fator de correção do índice de vulnerabilidade (f,) do subtrecho.

O desenvolvimento da metodologia permitiu estabelecer as bases para uma análise e hierarquização das ocorrências de processos geodinâmicos potencialmente mobilizados ao longo da linha-tronco da Estrada de Ferro Carajás. A proposição foi aplicada ao longo de toda via, que comporta uma extensão total de 892km de extensão, subdividida em 914 subtrechos de referência. Os procedimentos dessa metodologia e os resultados obtidos para este estudo de caso constituem o escopo deste trabalho.

7.2. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS ADICIONAIS

A funcionalidade da metodologia proposta mostrou-se eficaz ao ajustar a disposição dos dados a partir de uma sistemática pensada especificamente para obras lineares como ferrovias. O método proporcionou a identificação de parâmetros utilizados na estimativa de riscos

geológico-geotécnicos de ferrovias, por meio de índices críticos, parâmetros de suscetibilidade e parâmetros de vulnerabilidade, com base em uma abordagem analítica simples, consistente e prática, subsidiada por ferramentas estatísticas baseadas em análises multivariadas e que permitiram determinar um plano de setorização geológico-geotécnico da via, o que constitui a síntese de qualquer programa de gestão de empreendimentos dessa natureza.

A aplicação da metodologia constitui um subsídio inovador ao planejamento e à operação da ferrovia, pois garante às equipes de manutenção uma efetiva atuação preventiva, e não emergencial como atualmente é a prática corrente em empreendimentos ferroviários (e em obras lineares, em geral). Com efeito, a hierarquia dos riscos geotécnicos discriminada ao longo de toda a extensão da via permite uma efetiva antecipação das ações mitigadoras e de minimização de eventos que acarretem efeitos de paralisação das atividades de tráfego.

A estruturação da metodologia em termos de um programa computacional de fácil interação com o usuário garante uma elevada praticidade e imediata aplicação da metodologia proposta a obras reais e às inspeções técnicas de campo. Além do amplo controle e gerenciamento da via, as equipes técnicas de logística e de manutenção passam a contar com um instrumento capaz de antecipar problemas, projetar soluções mitigadoras e avaliar previamente o impacto proporcionado por uma determinada obra de estabilização ou de contenção, a ser realizada num dado trecho da via.

Nesse sentido, a melhor conclusão é aquela a ser dada pela efetiva prática de campo pela aplicação da metodologia exposta, mediante a validação ou não das premissas adotadas, pela correlação entre as projeções do *software* GEOVIA e as realidades dos subtrechos analisados, realizados pelos seus potenciais usuários: profissionais vinculados às equipes técnicas de logística e de manutenção de ferrovias.

Os impactos esperados são muito grandes, no sentido de que, no âmbito das estruturas lineares de grande porte, a manutenção se assenta sobre a realidade de obras ligeiras e de natureza essencialmente

emergencial. Propõe-se a aplicação da proposta em caráter permanente à EFC, comparando-se resultados, formulando-se correlações, antecipando problemas. Numa fase seguinte, recomenda-se extrapolar as análises para os ramais e pátios ferroviários da EFC, utilizando-se o próprio banco de dados disponível. Em escala maior, sugere-se a implementação dessa metodologia a outras ferrovias e, com as devidas adaptações, a outras obras lineares em geral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI, H. *Guttman Scaling*. In SALKIND, N.J. (Ed.): *Encyclopedia of Research Design*. Thousand Oaks (CA): Sage. p. 651-657, 2010.

ABGE. BRITO, S. N; OLIVEIRA, A M. S. (editores), São Paulo, ABGE/ Oficina de Textos, 586p., 1998.

ABNT NBR ISO 31.000 . Gestão de Riscos – Princípio e Diretrizes. ABNT NBR ISO 31.000, 24p. 2009.

AGS. Practice Note Guidelines for Landslide Risk Management. Australian Geomechanics Society Landslide Taskforce Landslide Zoning Working Group. Australian Geomechanics 42 (1), p. 63–114, 2007.

AMARAL, C. P.; CERRI, L. E. S. Riscos Geológicos. In: BRITO, S. N. A.; OLIVEIRA, A.M.S. (Ed). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, p.303-310, 1998.

AMARAL, C.; SILVA, F. M. Risco quantitativo a escorregamento: proposta de índice no Rio de Janeiro. In: Conferência Brasileira sobre estabilidade de encostas, # COBRAE, Rio de Janeiro. Anais..., Rio de Janeiro: ABMS. 2001,

AMARAL, R.; SANTORO, J.; TOMINAGA, L. K. *Desastres naturais*: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico. 196 p.,2009.

AMARO, A. *Consciência e cultura do risco nas organizações*. Territorium, Coimbra, n. 12, p. 5-9, 2005.

AMENOMORI, C.J; AUGUSTO FILHO, O.; CERRI, L.E.S.;. Riscos geológicos: aspectos conceituais. In: Simpósio Latino-Americano Sobre Risco Geológico Urbano, 1, São Paulo. Anais... São Paulo: ABGE, p.334-341, 1990.

ANASTASI, A. Psychological testing. New-York: MacMillan. 1990.

ANDERSON, L. W. Guttman scales. In: WALBERG, H. J.; HAERTEL, G. D. (Eds.), *The International Encyclopedia of Educational Evaluation*. Oxford: Pergamon, p 333-334, 1990.

ANDERSON, R.E; BABIN, B.J.; BLACK, W.C.; HAIR, J. F; TATHAM, R.L. *Análise multivariada de dados*. 6. Ed. Bookman, p. 100 -148; 427-481, 2009.

ANDRADE, D.; BUSSAB, W. D. E. O.; MIAZAKI, E. S. *Introdução à análise de agrupamentos*. São Paulo: Associação Brasileira de Estatística, 1990. 105p.,1990.

ANTIA, H.E.; MOHAMED, M.O. Geoenvironmental engineering, Londo, Elsevier. (Eds 1998) cap. 10, p. 249-279. 1998.

ANTT. Evolução recente do transporte ferroviário – até o ano de 2008. Relatório. Brasília-DF, 2009. Acesso em fevereiro de 2013.

ANTT. *Transporte Ferroviário*. Disponível em: http://www.antt.gov.br/carga/ferroviário/ferroviário.asp. Acesso em fevereiro de 2013.

APOSTEL, L. *Le Problème Formel des Classifications Empiriques*. In: Centre National de Recherche de Logique / Société Belge de Logique et Philosophie des Sciences (ed.), La Classification dans les Sciences. Bruxelles: Éditions J. Duculot S.A. Gembloux, p. 157- 230, 1963.

AUGUSTO FILHO, O.; CERRI, L.E.S. Riscos geológicos associados à ocupação de encostas no Brasil: um roteiro metodológico para a ação da Defesa civil e de urbanistas. In: Simpósio Latino-Americano Sobre Risco Geológico Urbano, 1. São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABGE, p.457-468, 1990.

BAECHER, G. B.; CHRISTIAN, J. T.; *Unresolved Problems in Geotechnical Risk and Reliability, Geotechnical Risk Assessment and Management*, Proc. GeoRisk 2011, Ed: C H Juang, K KPhoon, A J Puppala, R A Green and G A Fenton, Geo-Institute, A.S.C.E. 2011.

BAECHER, G.B.; CHRISTIAN, J.T.; LADD, C.C.; Reliability applied to slope stability analysis. Journal of Geotechnical Engineering Division. New York: ASCE, v,120, n 12, p. 2180-2207, 1994.

BERKHIN, P. Survey of clustering data mining techniques. Technical report, Accrue Software, San Jose, CA. 2002.

BHATTACHARYA, G.; CHOWDHURY, R..; FLENTJE, P. Geotechnics in the 21st Century, uncertainties and other challenges, with particular references to landslide hazard and risk assessment. Journal of Life Cycle Reliability and Safety Engineering, 1 (2), p. 27-43, 2012.

BIRKMANN, J. *Measuring Vulnerability to Natural Hazards*. Towards Disaster Resilient Societies. Tokyo, New York, Paris: UNU-Press. 2006.

BONNARD, C.; COROMINAS, J.; CASCINI, L.; FELL, R.; LEROI, E.; SAVAGE, W.Z. Guidelines for landslide susceptibility,hazard and risk zoning for land use planning. Engineering Geology 102, p. 85-98, 2008.

BOVIS, M. JAKOB, M. e HUNGR, O. Debris-Flow Hazards and Related Phenomena. Eds. Praxis-Springer, Berlin Heidelberg. Cap 7. 2005.

BOWLES, J.B. An assessment of RPN prioritization in a failure modes effects and criticality analysis. In: *IEEE* Proceedings annual Reliability and Maintainability Symposium, California, p. 380-386, 2003.

BRUMUND,F. Geo –Risks in the Business Environment, Geotechnical Risk Assessment and Management. Proc.GeoRisk . Ed.: JUANG, C H; KPHOON, K; PUPPALA, A J R A Green and GA Fenton, Geo-Institute, A.S.C.E. 2011.

BRUNNER, E.; PURI, M. L. *Nonparametric Methodos in Factorial Designs*. Statistical Papers, 42, p. 1-52, 2001.

BURGUER, A; BUCHHART, A. *Risiko – Controlling*. Universität Eichstätt/Ingolstadt. Müchen; Wien: Oldebourg, p. 67-108, 2002.

CAMPOS, M. O. Limites e formas de representação das informações estatísticas sobre o agronegócio: abordagem pela classificação nacional de atividades econômicas. Tese de Doutorado em Ciências. Instituto de Ciências Humanas e Sociais. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2008.

CARDONA, O.D. Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo: elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo. In: MASKREY, A. (Org.) Los desastres no son naturales. Bogotá: La Red, 1993. Disponível em:http://www.lared.org.pe/publicaciones/libros/2042/cap3.htm. Acesso em fevereiro de 2013.

CARPI JR, S.; DAGNINO, R. S. *Risco ambiental*: conceitos e aplicações. CLIMEP - Climatologia e Estudos da Paisagem, Rio Claro/SP, 2:2, p. 50-87, julho/dezembro 2007. Disponível em: http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/climatologia/article/view/1026/958>. Acesso em: fevereiro de 2013.

CARSON, M. A.; KIRKBY, M. J. Hillslope form and process. London: Cambridge University Press. 475 p., 1972.

CARVALHO, C.S. Gerenciamento de riscos geotécnicos em encostas urbanas: uma proposta baseada na análise de decisão. Tese (Doutorado em Engenharia de Solos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 192p, 1996.

CARVALHO, C.S. *Risco geotécnico em Favelas*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 11., COBRANSEG, Brasília, 1998. Anais... Brasília, v.4, p.123-141, 1998.

CASAGRANDE, A. The role of the, calculated risk in earth work and foundation engineering. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.91, Issue p.4, 1-40, 1965.

CASTELLANOS, A. E. A.; SEKHAR, L.K.; VAN WESTEN, C. J. Spatial data for landslide susceptibility, hazard and vulnerability assessment: and overview. Engineering Geology 102, (3-4), p.112-131, 2008.

CERRI, L.; FERNANDES, F. Elaboração da Carta Geotécnica de Suscetibilidade de um Trecho Da Rodovia Marechal Rondon - SP-300 (SP, Brasil). Geosciences Geociências, Brasil, v. 30, n. 3,. p.457-465, 2011. Disponível em: http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/5562. Acesso em: janeiro de 2013.

CERRI, L.E.S. Riscos geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para a prevenção de acidentes. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 197p, 1993.

CETESB. Ações da CETESB na gestão de risco ambientais em ferrovias. Setor de Operações emergenciais. Disponível em: www.cetesb.sp.gov.br/gerenciamento-de-riscos/.../151-atendimento. Acesso fevereiro 2013.

CHISNALL, P. Marketing Research: Analysis and Measurement. McGraw -Hill, p.176-177, 1973.

CHRISTIAN, J.T. *Geotechnical Engineering Reliability: How Well Do We Know What We Are Doing?*. ASCE-Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.130, Issue 10, p. 985-1003, 2004.

CJALOV R.S.; MALJAZOVA, S.M. Los procesos antropógeno-naturales y los riesgos ecológicos. Tomo IV, Faculdad de Geografía, Universidad Estatal de Moscú. Moscú: Editorial Gorodets, 2004.

CLAYTON, C. R. I. Managing Geotechnical Risk: Improving Productivity in UK building and construction. Thomas Telford Ltd, London, 80p., 2001.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. O sistema ferroviário brasileiro. Brasília, 58p., 2013.

COPONS, R. e VILAPLANA, J. M. Rockfal susceptibility zoning at a large scale: from geomorphological inventotory to preliminary land use planning. Engineering Geology Journal. n102: p 142 -151, 2008.

CORNELL, C. A.; BENJAMIN, J. R. "Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers", McGraw-Hill Book Company, USA. 1970.

COSTA (2008) Fundamentos para a Avaliação de Riscos Sísmicos e Geotécnicos em Linhas Ferroviárias de Alta Velocidade em Portugal. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós graduação em Engenharia Civil na Especialidade de Geotecnia e Fundações. Departamento de Engenharia Civil. FCTUC, Coimbra. 79p., 2008.

CPRM. Mapeamento geológico-geotécnico e delimitação das áreas de risco geológico ao longo do traçado da via do Trem de Alta Velocidade (TAV). Serviço Geológico do Brasil – SGB / CPRM. Brasília.164p., 2009.

CPRM. *Programa de Levantamentos Geológico Básicos do Brasil*. Serra dos Carajás. Folha SB SB-22-Z-A. Estado do Pará, esc. 1:250.000. Brasília, 164p., 1991.

CPRM. *Programa de Levantamentos Geológico Básicos do Brasil.* Serra Pelada. Folha SB SB-22-X-C. Estado do Pará, esc. 1:250.000. Brasília, 248p., 1994.

CROZIER, M.J.; GLADE, T. A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. In: Glade, T., Anderson, M., Crozier, M.J. (Eds.), Landslide Hazard and Risk. John Wiley and Sons Ltd, West Sussex, England, p.75–138, 2005.

DA COSTA, E A. Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes. Dissertação (Mestrado). Escola de engenharia. Pós graduação em engenharia civil. UFGRS. Porto alegre, 160p.,2005.

DA CUNHA (2007). *Modelos Rasch e Escalas de Likert e Thurstone na medição de atitudes*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós graduação em Probabilidades e Estatística. Departamento de Estatística e Investigação Operacional. Universidade de Lisboa. Lisboa. 78p., 2007.

DAVIS, T.R.H.. Large debris flows: a macroviscous phenomena. Acta Mechanica, 63: p.161-178, 1986.

DENISON, D. G. T.; LAWSON, A. B.; *Spatial cluster modelling*. Chapman and Hall/CRC. 2002.

DINIS DA GAMA, C. *Geotechnical risk map of a railway in a slide*. ARMA// USRMS, 05-866, Alaska, p.25-29, 2005.

DNIT. Ações e Obras. Disponível em: http://www.dnit.gov.br/ferrovias/acoes-e-obras. Acesso em fevereiro de 2013.

EBER, W.; ZIMMERMAN, J. *Knowledge Based Risk Controlling*. Bundesanstalt fürWasserbau. ISGRS. Vogt, Schuppener, Straub & Räu (*eds*), p 259-268, 2011.

EINSTEIN, H. H. Landslide risk - systematic approaches to assessment and management. In: International Workshop On Landslide Risk Assessment, 1. Honolulu. *Proceedings...* Rotterdam: Balkema, p. 25-49, 1997.

EINSTEIN, H. *The Kimballton Underground Research Facility*.2005. Disponível em http://www.kimballton.org/s2pfull/. Acesso em janeiro de 2013.

EINSTEIN, H.H.; TANG, W.H.; WU, T.H. Landslide hazard and risk assessment. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), Landslides: Investigation and Mitigation, Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington, DC, p.106–120, 1999.

EINSTEIN; H. H.; BAEYCHER. G. B. Probabilistic and statistical methods in engineering geology: I problem statement and introduction to solution. Rock mechanics. Wien: Springer – Verlag, v.12, p 47-61, 1982.

EL-RAMLY, H. *Probabilistic analyses of landslide hazards and risk bridging theory and practice*. Thesis (Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering. Faculty of Graduate Studies and Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Edmonton, Alberta Canadá, Jan. 391p., 2001.

FELL, R. .*Landslide risk assessment*. In: Geotechnical Society Of Edmonton Annual One-Day Symposium, 2. Edmonton *Proceedings...* Edmonton: GSA, p.1-18, 1996.

FELL, R.. *Landslide risk assessment and acceptable risk*. Canadian Geotechinical Jornal. Canadá, v.31, p261-272, 1994.

FELL, R.;HO, K.K.S.; LACASSE, S.; LEROI, E. *A framework for landslide risk assessment and management*. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (Eds.), Landslide Risk Management. Taylor and Francis, London, p.3–26, 2005

FERREIRA A.B.; GARCIA, R.; OLIVEIRA, S.; REIS, E.; RODRIGUES. M.L.; VIEIRA, G.; ZÊZERE, J.L. Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). Natural Hazards and Earth System Sciences, 4: p.133-146, 2004.

FERREIRA, R. L. C.; SOUZA, A. L.; XAVIER, A. Análise de agrupamento aplicada à ciência florestal. Viçosa: SIF, 109 f. (Documento SIF, 16).1997.

FORNASARI FILHO, N; INFANTI JUNIOR, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE). cap. 9, p.131-152, 1998.

FRIEDMAN, J.; HASTIE, T., TIBSHIRANI, R.; The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction. Springer, New York. Cap3. 2001.

FÜSER, K., GLEIßNER, W., MEIER, G. Risikomanagement (kotraG) – Erfahrungen aus der Praxis, in: DB, s. 753-7758, 1999.

GLADE, T. Vulnerability assessment in landslide risk analysis. Die Erde 134, p.121–138, 2003.

GOMES, R.C.: Avaliação estrutural do pavimento ferroviário da EFC com base no método mecanicista. Vale, 30p, 2009.

GOWER, J. C. A comparison of some methods of cluster analysis. Biometrics, 23, p.623–628, 1967

GUIDICINI, G. & NIEBLE, C. M. 1984. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. São Paulo: 2a ed. Edgard Blücher, 194p

GUTTMAN, L.A.: A basis for scaling qualitative data. *American Sociological Review*, 91, p.139-150. 1944.

IAEG. Commission on Landslides. Suggested nomenclature for landslides. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 41, p.13–16.1990.

ISSMGE JTC-1. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning, for land use planning. Engineering Geology 103. p.85–98 (this volume), 2008.

ISSMGE TC32. Technical Committee on Risk Assessment and Management Glossary of Risk Assessment Terms. Version 1. 2004.

IUGS-WGL. Quantitative risk assessment for slopes and landslides - the state of the art. In: CRUDEN, D.; FELL, R. (Ed.) Landslide risk assessment. Rotterdam: Balkema, p.3-12, 1997.

JAISWAL, P., JETTEN, V.G.; VAN WESTEN, C.J. Quantitative assessment of landslide hazard along transportation lines using historical records. In: Landslides: journal of the International Consortium on Landslides, 8 (2011)3, p.279-291, 2011.

KHATTREE, R.; NAIK, D.N. Multivariate data reduction and discrimination with SAS software. Cary, NC: SAS Institute, 588p, 2000.

KPGM. Integriertes Risikomanagement, o.O. 1998.

KRAUTER, E. Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegungen. In: Smoltczyk, U. (Ed.): Grundbautaschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen, 6. Auflage, Berlin (Ernst & Sohn), p.613-665, 2001.

LACASSE, S.; NADIN, F. *Uncertainties in characterizing soil pro pertier*. In: Uncertainty"96, Uncertainty in the geological environment: from the oryto pratice, New York. Proceedings. New York: ASCE. Geotechnical Special Publication. N58, v1, p.49-75, 1996.

LACASSE, S; NADIM,F. Learning to Live with Geohazards: From Research to Practice Geotechnical Risk Assessment and Management, Proc.GeoRisk 2011, Ed.: C H Juang, K KPhoon, A J Puppala, R A Green and G A Fenton, Geo-Institute, A.S.C.E. 2011.

LAVELL, A. *Gestión de riesgos ambiental es urbanos*. Lima: FLACSO/La Red, 13p 2001. Disponível em http://www. desenredando. Org /public/articulos/ index.html>.Acesso em fevereiro de 2013.

LAZARO; MOURA. Sistemática utilizada na inspeção geológico-geotécnica de dutos da Transpetro e de empresas conveniadas. In: Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, 5, São Carlos, SP. Anais. v. 1, 7p., 2004.

LIANG, T.; RIB; H. T. Recognition and identification. In: Landslide Analysis and Control, edited by: Schuster, R. L. and Krizek, R. J. ,National Academy of Sciences, Transportation Research Board Special Report 176, Washington, p.34–80, 1978.

LINDEN, R. Técnicas de agrupamento. Revista de sistemas de informação da FSMA n. 4. p 18-36, 2009.

LUCE, R.D. E SUPPES, P. Representation al measurement theory. In: H. Pashler & J. Wixted (Eds.), Stevens' Handbookof Experimental Psychology (3rd Edition), New-York: Wiley. v.4, p.1-41. 2001.

MAHER, M.L.J.; MCGOEY-SMITH, A.D. Risk-Based Cost and Schedule Estimation for Large Transportation Project. Association for European Transport and Contributors. European transport conference - cd-rom Edition-; 83 .83p. 2006.

MORGENSTERN, N.R. *Managing risk in Geotechnical Engineering*. In: Pan -American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 10. Guadalajara. *Proceedings...* Mexico: ISSMEF, v.4, p.250- 252. 1995.

MORGENSTERN, N.R. *Toward landslide risk assessment in practice*. In: CRUDEN, D.; FELL,R. (Ed.) Landslide risk assessment. Rotterdam: Balkema, p.15-23, 1997.

NETO, M. M. J. *Estatística multivariada*. Revista de Filosofia e Ensino. 9 maio 2004. Disponível em: http://www.criticanarede.com/cien_estatistica.html. Acesso em: Março, 2014.

NOGUEIRA, F.R. *Gerenciamento de riscos ambientais associados a escorregamentos*: contribuição às políticas públicas para áreas de ocupação subnormal. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – Unesp., Rio Claro, 253p., 2002.

PERELMAN, CH. Réflexions Philosophiques sur la Classification. In Centre National de Recherche de Logique / Société Belge de Logique et Philosophie des Sciences (Ed.), La Classification dans les Sciences. Bruxelles: Éditions J. Duculot S.A. Gembloux, p.231- 236, 1963.

PITA, A.L.; PUENTE, M.J.M.; RIVES, F.O. *Tratado de Ferrocarriles I* – Via. Ed. Rueda. Madrid. 690p., 1977.

PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES. Relatório Executivo. Brasília, 385p, 2007.

POMBO, O. *Da classificação dos seres à classificação dos saberes*. Revista da Biblioteca Nacional de Lisboa, nº 2, p.19-33, 1998.

REIS, E. Estatística multivariada aplicada. Lisboa, 180p,1997.

RODRIGUES-CARVALHO, J.A. Perigos geológicos, cartografia geotécnica e proteção civil. In: Simpósio Brasileiro De Cartografia Geotécnica, 3, Florianópolis. *Anais...*Florianópolis: ABGE/UFSC/LAMGEO (cd), 1998.

SANTOS, S. *Um estudo sobre a participação do modal ferroviário no transporte de cargas no Brasil*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2005.

SOBREIRA, F. G. Suscetibilidade a Processos Geológicos e suas Consequências na Área Urbana de Mariana, MG. Geo.br 1, 43-60. 2001. G.IS-SN1519-5708 http://www.degeo.ufop.br/geobr.

SOETERS, R.; VAN ASCH, T.W.J.; VAN WESTEN, C.J. Landslide hazard and risk zonation; why is it still so difficult? Bulletin of Engineering geology and the Environment 65 (2), p.167–184, 2005.

STEVENS, S. S. Le quantitatif et la perception. Bulletin de Psychologie, p. 696-715, 1968.

STOPATTO, S. *Via permanente ferroviária*: conceitos e aplicações. Ed. da Universidade de São Paulo. São Paulo. 251p. 1987.

SUGUIO, K. *Geologia do Quaternário e mudanças ambientais*. São Paulo: Paulo's Comunicação e Artes Gráficas. 366p., 1999

USGS. *The landslide handbook* – A guide to understanding landslides. Highland, L.M., and Bobrowsky, P. (versão em português): Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular. GFDRR/World Bank. 1325, 129p., 2008.

VALE. Amazônia Mineração S. A. Projeto Carajás. Projeto detalhado da infra-estrutura e pátios intermediários, 1979.

VALE. Projeto Básico da Duplicação da Estrada de Ferro Carajás, 2005.

VALE. Relatório de Auditoria da Estrada de Ferro Carajás (EFC), 2010.

VAN WESTEN, C.J.; SOETERS, R. *Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation*. In: TURNER, A.K. & SCHUSTER, R.L. (Eds.), Landslides, investigation and mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247. Washington, DC, EUA: National Academy Press, p.129-177, 1996.

VARNES, D.J. Internacional Association of Engineering Geology Commission on Landslides and other Mass Movements on Slopes. Landslides hazard zonation: a reviewofteheprinciplesandpratice. Natural Hazards, Series. Paris: United NationsEconomic, Scientificand cultural organization. UNESCO. N3. 63p., 1984.

VELLEN, P.; WILKINSON. *Nominal, ordinal, interval and ratio typologies are mis-leading*. The American Statistician, 47, (1), p.65-72,1993.

VICINI, L. Análise multivariada da teoria à prática. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, CCNE – Santa Maria, 215. p, 2005.

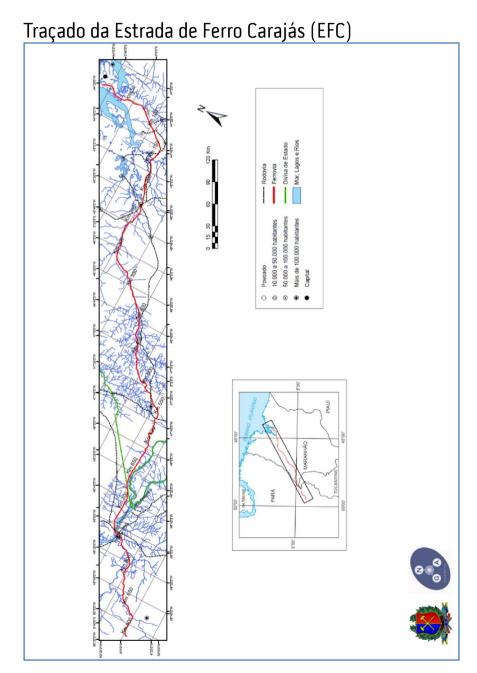
VICKERY, B. C. Faceted Classification: A guide to construction and use of special schemes. London: Aslib, 1960.

ZIEGLER, M. Risk simulation calculations in geotechnical and constructional practice. Disponível em: http://www.geotechnik.rwth-aachen.de/forschung/Risikosimulationsrechnungen em.pdf. Acesso em fevereiro de 2010.

ZIEGLER, M.. *Project calculation by means of risk simulations*. In: International Conference on Probabilistics in Geotechnics, Technical and Economic Risk Estimation, 15 – 19 September 2002, Graz, Austria / Ed. Rudolf Pöttler. Essen, p.529-538, 2002.

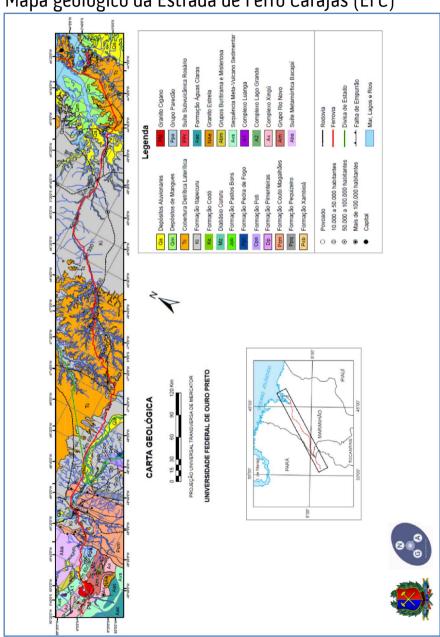
ZUQUETTE, L.V. Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamento e guia para elaboração. 2v. Tese (Livredocência em Geotecnia) – Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos. 368p.,1993

ANEXO I



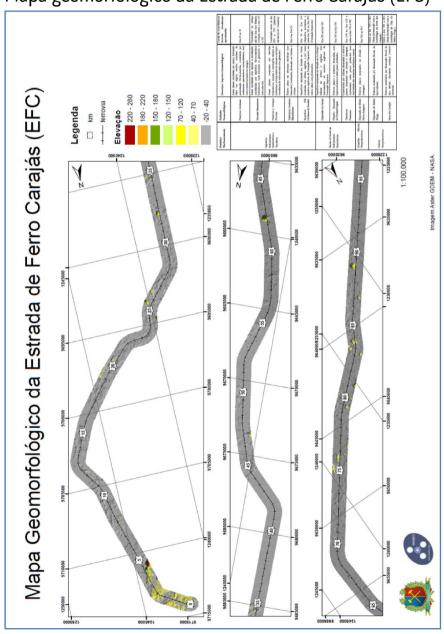
ANEXO II

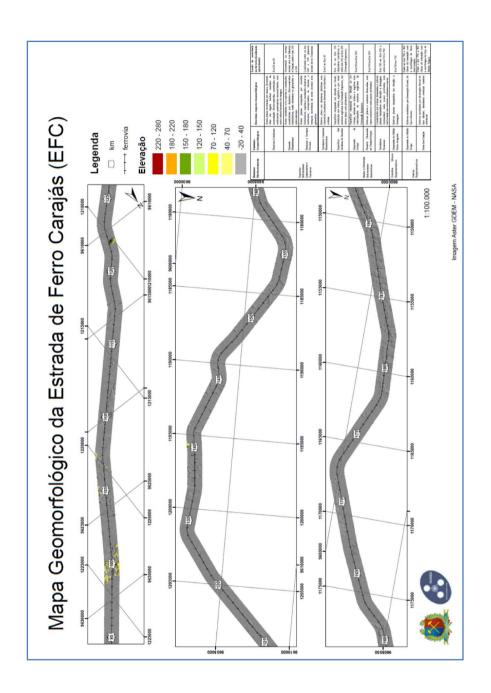
Mapa geológico da Estrada de Ferro Carajás (EFC)

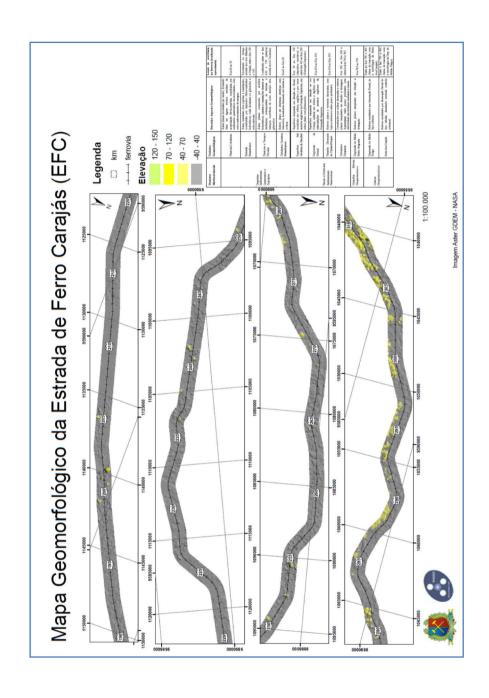


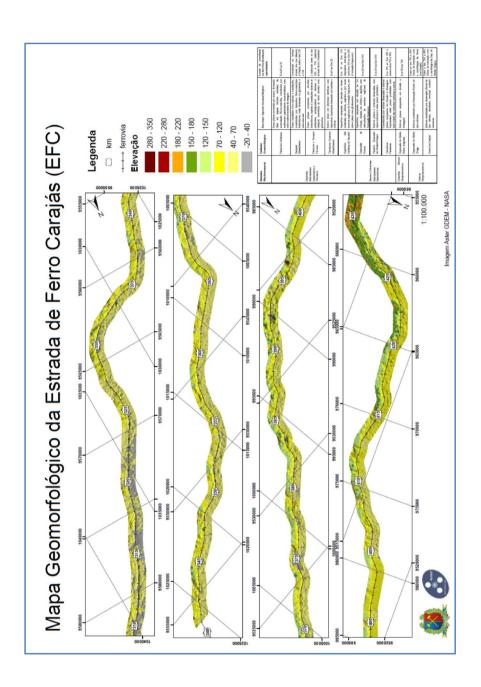
ANEXO III

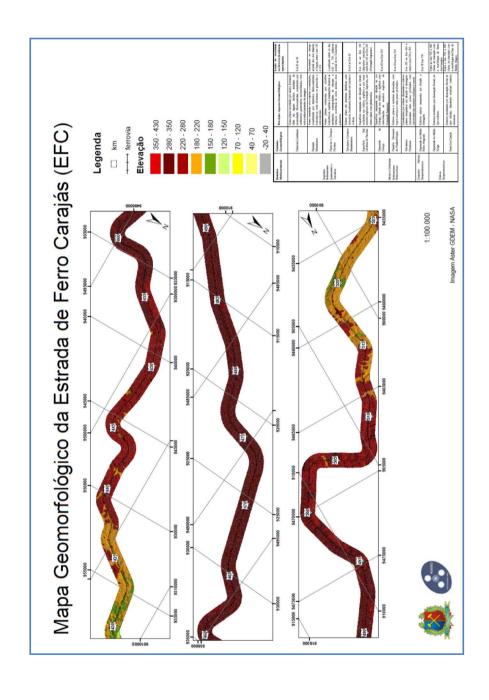
Mapa geomorfológico da Estrada de Ferro Carajás (EFC)

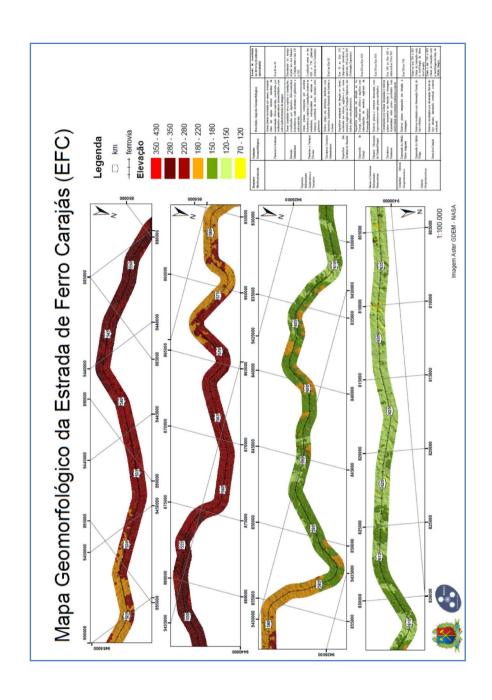


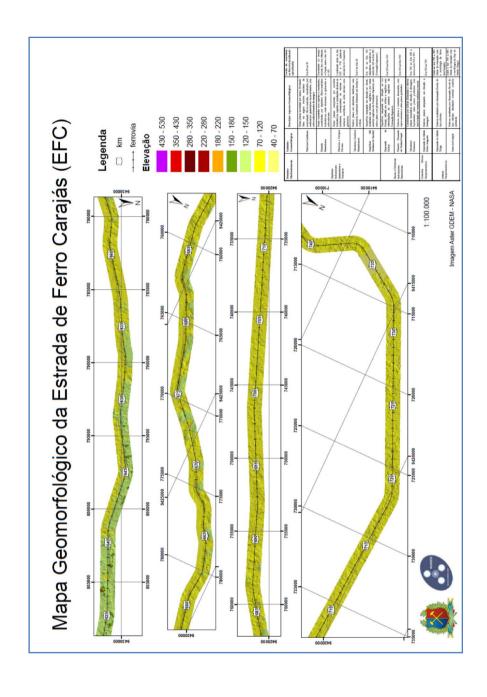


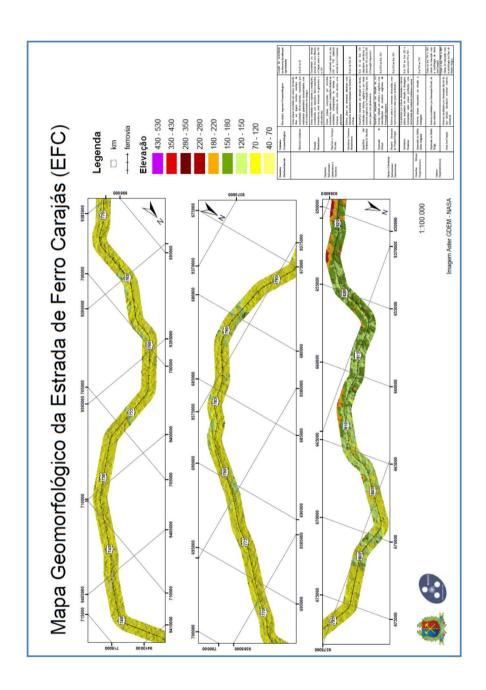


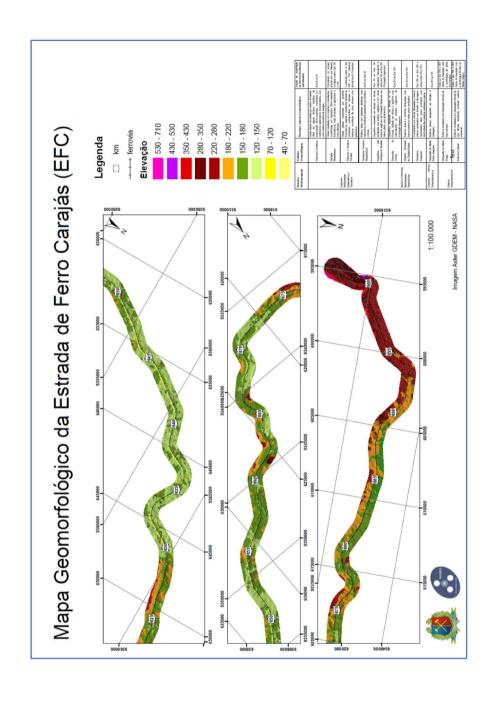












ANEXO IV

Análise de caracterização do solo e classificação da Estrada de Ferro Carajás (EFC)

TRECHO		Ex- tensão	ÍND. FÍSICOS		CLASSII	F. DE SOLO	Granul	ometria
Início	Término	(km)	LL	IP	TRB	SUCS	#40	#200
9,890	12,800	2,910	0,0	0,0	A3	SM	82,0	12,2
12,800	13,230	0,430	0,0	0,0	A24	SM	87,0	21,5
39,060	42,553	3,493	35,0	14,0	A6	CL	75,0	57,0
111,600	114,870	3,270	38,9	19,1	A6	CL	93,6	86,9
114,870	115,560	0,690	32,3	14,3	A6	CL	98,2	93,2
115,560	116,450	0,890	37,5	17,4	A6	CL	98,2	86,7
116,450	119,700	3,250	25,6	12,2	A6	CL	97,7	86,3
119,700	123,000	3,300	37,5	18,0	A6	CL	97,5	87,8
145,180	147,360	2,180	0,0	0,0	A2-4	SM	94,3	31,3
147,360	147,920	0,560	45,6	22,0	A7-6	CL	96,9	89,4
147,920	149,080	1,160	43,3	17,0	A7-6	CL	96,8	83,0
177,900	180,000	2,100	0,0	0,0	A-4	CL	98,0	86,5
180,000	181,890	1,890	31,0	11,0	A-6	CL	96,8	89,2
181,890	183,870	1,980	31,7	12,0	A-6	CL	97,2	86,1
193,050	194,000	0,950	34,0	12,0	A-6	CL	98,0	50,0
194,000	197,100	3,100	32,0	12,1	A-6	CL	92,6	83,9
214,850	215,765	0,915	0,0	0,0	A2-4	SM	96,7	42,9
215,765	216,85	1,085	0,0	0,0	A2-4	SM	98,3	47,6
231,520	232,030	0,510	25,3	8,3	A-4	CL	95,3	49,3
232,030	232,640	0,610	0,0	0,0	A-4	CL	89,5	57,5
232,640	232,750	0,110	0,0	0,0	A-4	CL	96,0	56,5
232,750	233,250	0,500	27,5	9,5	A-4	CL	95,3	84,3
248,040	251,800	3,760	0,0	0,0	A2-4	SM	78,7	25,6

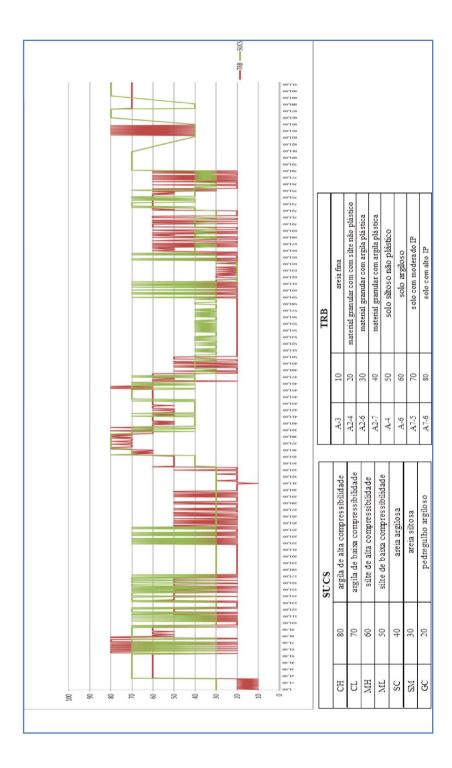
251,800 253,020 1,220 30,6 12,0 A-6 CL 92,8 49,6 262,340 263,000 0,660 0,0 0,0 A-4 CL 87,8 59,8 263,000 263,160 0,160 0,0 0,0 A-4 CL 87,0 72,3 263,160 264,150 0,990 22,0 7,5 A-4 CL 81,5 52,8 277,260 280,000 2,740 0,0 0,0 A2-4 SM 87,7 31,3 295,500 297,000 1,500 0,0 0,0 A2-4 SM 94,8 25,8 297,600 298,000 0,400 0,0 0,0 A2-4 SM 91,3 29,8 313,070 314,100 1,030 0,0 0,0 A2-4 SM 84,0 23,3 336,450 336,450 0,680 0,0 0,0 A2-4 SM 57,7 18,0 348,590 349,530			
263,000 263,160 0,160 0,0 0,0 A-4 CL 87,0 72,3 263,160 264,150 0,990 22,0 7,5 A-4 CL 81,5 52,8 277,260 280,000 2,740 0,0 0,0 A2-4 SM 87,7 31,3 295,500 297,000 1,500 0,0 0,0 A2-4 SM 94,8 25,8 297,600 298,000 0,400 0,0 0,0 A2-4 SM 91,3 29,8 313,070 314,100 1,030 0,0 0,0 A2-4 SM 84,0 23,3 335,770 336,450 0,680 0,0 0,0 A2-4 SM 57,7 18,0 348,590 349,530 0,940 0,0 0,0 A2-4 SM 70,8 23,3 369,840 370,540 0,700 0,0 A2-4 SM 86,6 34,4 387,200 387,780 0,580	51,800	92,8 49,	6
263,160 264,150 0,990 22,0 7,5 A-4 CL 81,5 52,8 277,260 280,000 2,740 0,0 0,0 A2-4 SM 87,7 31,3 295,500 297,000 1,500 0,0 0,0 A2-4 SM 94,8 25,8 297,600 298,000 0,400 0,0 0,0 A2-4 SM 91,3 29,8 313,070 314,100 1,030 0,0 0,0 A2-4 SM 84,0 23,3 335,770 336,450 0,680 0,0 0,0 A2-4 SM 57,7 18,0 336,450 336,750 0,300 0,0 0,0 A-4 CL 81,6 43,5 348,590 349,530 0,940 0,0 0,0 A2-4 SM 70,8 23,3 368,900 369,840 0,940 0,0 0,0 A2-4 SM 86,6 34,4 387,200 387,780	52,340	87,8 59,	8
277,260 280,000 2,740 0,0 0,0 A2-4 SM 87,7 31,3 295,500 297,000 1,500 0,0 0,0 A2-4 SM 94,8 25,8 297,600 298,000 0,400 0,0 0,0 A2-4 SM 91,3 29,8 313,070 314,100 1,030 0,0 0,0 A2-4 SM 84,0 23,3 335,770 336,450 0,680 0,0 0,0 A2-4 SM 57,7 18,0 348,590 349,530 0,940 0,0 0,0 A2-4 SM 70,8 23,3 368,900 369,840 0,940 0,0 0,0 A2-4 SM 70,8 23,3 382,180 387,200 5,020 18,2 6,6 A4 SM 89,5 38,5 387,780 388,070 0,290 13,0 5,0 A24 SM 79,7 37,5 388,070 388,600	53,000	87,0 72,	3
295,500 297,000 1,500 0,0 0,0 A2-4 SM 94,8 25,8 297,600 298,000 0,400 0,0 0,0 A2-4 SM 91,3 29,8 313,070 314,100 1,030 0,0 0,0 A2-4 SM 84,0 23,3 335,770 336,450 0,680 0,0 0,0 A2-4 SM 57,7 18,0 336,450 336,750 0,300 0,0 0,0 A-4 CL 81,6 43,5 348,590 349,530 0,940 0,0 0,0 A2-4 SM 70,8 23,3 368,900 369,840 0,940 0,0 0,0 A2-4 SM 86,6 34,4 369,840 370,540 0,700 0,0 A-4 SM 89,5 38,5 382,180 387,200 5,020 18,2 6,6 A4 SM 71,2 40,5 387,780 388,600 0,580	53,160	81,5 52,	8
297,600 298,000 0,400 0,0 0,0 A2-4 SM 91,3 29,8 313,070 314,100 1,030 0,0 0,0 A2-4 SM 84,0 23,3 335,770 336,450 0,680 0,0 0,0 A2-4 SM 57,7 18,0 336,450 336,750 0,300 0,0 0,0 A-4 CL 81,6 43,5 348,590 349,530 0,940 0,0 0,0 A2-4 SM 70,8 23,3 368,900 369,840 0,940 0,0 0,0 A2-4 SM 86,6 34,4 369,840 370,540 0,700 0,0 A-4 SM 89,5 38,5 382,180 387,200 5,020 18,2 6,6 A4 SM 79,7 37,5 387,780 388,070 0,290 13,0 5,0 A24 SM 78,0 34,5 388,070 388,600 0,530	77,260	87,7 31,	3
313,070 314,100 1,030 0,0 0,0 A2-4 SM 84,0 23,3 335,770 336,450 0,680 0,0 0,0 A2-4 SM 57,7 18,0 336,450 336,750 0,300 0,0 0,0 A-4 CL 81,6 43,5 348,590 349,530 0,940 0,0 0,0 A24 SM 70,8 23,3 368,900 369,840 0,940 0,0 0,0 A2-4 SM 86,6 34,4 369,840 370,540 0,700 0,0 0,0 A-4 SM 89,5 38,5 382,180 387,200 5,020 18,2 6,6 A4 SM 71,2 40,5 387,780 388,070 0,290 13,0 5,0 A24 SM 78,0 34,5 388,070 388,600 0,530 5,4 2,0 A24 SM 82,7 26,8	95,500	94,8 25,	8
335,770 336,450 0,680 0,0 0,0 A2-4 SM 57,7 18,0 336,450 336,750 0,300 0,0 0,0 A-4 CL 81,6 43,5 348,590 349,530 0,940 0,0 0,0 A2-4 SM 70,8 23,3 368,900 369,840 0,940 0,0 0,0 A2-4 SM 86,6 34,4 369,840 370,540 0,700 0,0 0,0 A-4 SM 89,5 38,5 382,180 387,200 5,020 18,2 6,6 A4 SM 71,2 40,5 387,200 387,780 0,580 21,3 8,0 A4 SM 79,7 37,5 387,780 388,070 0,290 13,0 5,0 A24 SM 78,0 34,5 388,070 388,600 0,530 5,4 2,0 A24 SM 82,7 26,8	97,600	91,3 29,	8
336,450 336,750 0,300 0,0 0,0 A-4 CL 81,6 43,5 348,590 349,530 0,940 0,0 0,0 A24 SM 70,8 23,3 368,900 369,840 0,940 0,0 0,0 A2-4 SM 86,6 34,4 369,840 370,540 0,700 0,0 0,0 A-4 SM 89,5 38,5 382,180 387,200 5,020 18,2 6,6 A4 SM 71,2 40,5 387,200 387,780 0,580 21,3 8,0 A4 SM 79,7 37,5 387,780 388,070 0,290 13,0 5,0 A24 SM 78,0 34,5 388,070 388,600 0,530 5,4 2,0 A24 SM 82,7 26,8	13,070	84,0 23,	3
348,590 349,530 0,940 0,0 0,0 A24 SM 70,8 23,3 368,900 369,840 0,940 0,0 0,0 A2-4 SM 86,6 34,4 369,840 370,540 0,700 0,0 0,0 A-4 SM 89,5 38,5 382,180 387,200 5,020 18,2 6,6 A4 SM 71,2 40,5 387,200 387,780 0,580 21,3 8,0 A4 SM 79,7 37,5 387,780 388,070 0,290 13,0 5,0 A24 SM 78,0 34,5 388,070 388,600 0,530 5,4 2,0 A24 SM 82,7 26,8	35,770	57,7 18,	0
368,900 369,840 0,940 0,0 0,0 A2-4 SM 86,6 34,4 369,840 370,540 0,700 0,0 0,0 A-4 SM 89,5 38,5 382,180 387,200 5,020 18,2 6,6 A4 SM 71,2 40,5 387,200 387,780 0,580 21,3 8,0 A4 SM 79,7 37,5 387,780 388,070 0,290 13,0 5,0 A24 SM 78,0 34,5 388,070 388,600 0,530 5,4 2,0 A24 SM 82,7 26,8	36,450	81,6 43,	5
369,840 370,540 0,700 0,0 0,0 A-4 SM 89,5 38,5 382,180 387,200 5,020 18,2 6,6 A4 SM 71,2 40,5 387,200 387,780 0,580 21,3 8,0 A4 SM 79,7 37,5 387,780 388,070 0,290 13,0 5,0 A24 SM 78,0 34,5 388,070 388,600 0,530 5,4 2,0 A24 SM 82,7 26,8	18,590	70,8 23,	3
382,180 387,200 5,020 18,2 6,6 A4 SM 71,2 40,5 387,200 387,780 0,580 21,3 8,0 A4 SM 79,7 37,5 387,780 388,070 0,290 13,0 5,0 A24 SM 78,0 34,5 388,070 388,600 0,530 5,4 2,0 A24 SM 82,7 26,8	58,900	86,6 34,	4
387,200 387,780 0,580 21,3 8,0 A4 SM 79,7 37,5 387,780 388,070 0,290 13,0 5,0 A24 SM 78,0 34,5 388,070 388,600 0,530 5,4 2,0 A24 SM 82,7 26,8	59,840	89,5 38,	5
387,780 388,070 0,290 13,0 5,0 A24 SM 78,0 34,5 388,070 388,600 0,530 5,4 2,0 A24 SM 82,7 26,8	32,180	71,2 40,	,5
388,070 388,600 0,530 5,4 2,0 A24 SM 82,7 26,8	37,200	79,7 37,	,5
	37,780	78,0 34,	,5
388,600 389,400 0,800 4,5 1,7 A24 SM 84,8 29,7	38,070	82,7 26,	8
	38,600	84,8 29,	7
389,400 389,830 0,430 0,0 0,0 A24 SM 87,0 18,3	39,400	87,0 18,	,3
389,830 390,940 1,110 9,2 3,3 A24 SM 84,8 33,0	39,830	84,8 33,	,0
392,180 393,600 1,420 0,0 0,0 A24 SM 72,0 32,8	92,180	72,0 32,	,8
393,600 394,340 0,740 9,7 3,3 A24 SM 72,0 27,0	93,600	72,0 27,	,0
394,340 395,200 0,860 8,3 3,0 A24 SM 85,5 27,3	94,340	85,5 27,	,3
395,200 395,520 0,320 0,0 0,0 A24 SM 77,5 14,0	95,200	77,5 14,	,0
395,520 395,800 0,280 0,0 0,0 A3 SM 83,0 10,0	95,520	83,0 10,	,0
395,800 396,350 0,550 0,0 0,0 A24 SM 83,0 26,5	95,800	83,0 26,	,5
396,350 396,620 0,270 0,0 0,0 A24 SM 81,5 28,0	96,350	81,5 28,	,0
396,620 396,820 0,200 0,0 0,0 A24 SM 84,0 28,5	96,620	84,0 28,	,5
396,820 399,200 2,380 5,7 2,1 A26 SM 84,0 27,4	96,820	84,0 27,	,4
399,200 399,870 0,670 0,0 0,0 A24 SM 81,8 20,0	99,200	81,8 20,	,0
399,870 401,800 1,930 0,0 0,0 A24 SM 76,3 25,3	99,870	76,3 25,	,3
401,800 402,000 0,200 0,0 0,0 A24 SM 82,6 30,0	01,800	82,6 30,	,0
402,000 403,550 1,550 0,0 0,0 A24 SM 76,2 24,6	02,000	76,2 24,	,6

403,550	404,000	0,450	0,0	0,0	A24	SM	82,0	26,0
408,700	409,700	1,000	0,0	0,0	A24	SM	84,5	29,4
409,700	410,000	0,300	14,5	5,0	A24	SM	88,0	28,5
410,000	411,900	1,900	5,7	2,1	A24	SM	77,6	29,9
411,900	412,360	0,460	0,0	0,0	A24	SM	79,6	19,8
412,360	413,110	0,750	0,0	0,0	A24	SM	88,0	15,3
413,110	413,820	0,710	11,4	4,4	A4	SM	92,5	35,4
413,820	414,020	0,200	0,0	0,0	A24	SM	92,0	32,5
414,020	416,000	1,980	6,6	2,3	A24	SM	89,4	30,1
416,000	416,430	0,430	9,3	3,3	A24	SM	88,5	27,7
416,430	418,200	1,770	14,7	5,4	A24	SM	88,0	34,5
418,200	419,000	0,800	17,4	6,2	A6	SM	90,2	36,8
423,450	424,320	0,870	26,7	9,6	A4	SC	77,7	40,0
424,320	425,030	0,710	26,0	9,0	A4	SC	85,5	44,0
440,520	441,000	0,480	34,5	15,3	A6	CL	97,5	89,3
441,000	441,515	0,515	38,3	17,5	A6	CL	96,8	86,5
441,515	443,170	1,655	50,9	23,0	A75	CL	90,9	85,0
443,170	443,480	0,310	47,0	21,5	A76	CL	94,0	89,1
443,480	443,780	0,300	55,0	25,8	A76	СН	98,3	95,0
443,780	444,100	0,320	55,3	25,5	A76	СН	92,0	92,0
444,100	446,000	1,900	56,1	26,1	A75	СН	95,4	90,5
446,000	446,510	0,510	56,7	25,9	A75	СН	98,5	96,0
446,510	446,800	0,290	55,0	24,9	A75	СН	96,1	92,9
446,800	446,960	0,160	51,0	22,5	A75	СН	93,8	89,8
446,960	447,400	0,440	50,3	21,7	A76	СН	94,5	91,0
447,400	447,640	0,240	50,5	22,3	A75	СН	90,8	86,0
447,640	448,560	0,920	54,0	25,7	A75	СН	85,0	79,6
448,560	449,450	0,890	55,9	24,8	A75	СН	95,8	91,5
449,450	449,890	0,440	55,0	25,2	A76	СН	93,6	90,9
449,890	450,540	0,650	53,7	22,9	A75	СН	98,1	94,7
450,540	464,000	13,460	56,0	27,3	A75	СН	97,3	94,4
484,630	485,560	0,930	55,5	26,5	A75	СН	85,3	82,4
485,560	485,760	0,200	37,5	15,1	A6	CL	62,6	51,8

				,				
485,760	485,910	0,150	37,0	13,9	A6	CL	69,4	58,5
486,120	486,310	0,190	41,5	16,5	A76	CL	61,0	54,4
486,490	487,690	1,200	37,1	15,6	A6	CL	70,9	57,6
487,690	488,100	0,410	28,5	12,3	A6	SC	74,7	48,7
488,210	488,900	0,690	42,5	21,0	A76	CL	90,9	70,0
494,900	495,620	0,720	30,4	14,0	A6	SC	77,8	44,6
495,780	496,180	0,400	33,7	15,1	A6	SC	79,5	49,8
496,180	496,480	0,300	28,0	12,2	A6	CL	82,6	65,3
496,480	496,750	0,270	23,4	10,2	A6	SC	86,6	45,9
496,750	497,300	0,550	17,7	6,3	A4	SC	90,5	42,5
497,300	497,920	0,620	21,6	8,4	A4	SC	81,0	33,2
497,920	498,200	0,280	24,1	8,9	A4	SC	80,2	33,8
498,200	498,700	0,500	24,6	11,3	A6	SC	89,0	48,7
498,700	499,170	0,470	23,1	9,6	A4	SC	97,4	38,9
499,170	501,350	2,180	22,7	9,2	A4	SC	84,0	37,7
515,400	516,300	0,900	30,9	11,0	A6	SC	88,5	47,6
516,300	516,500	0,200	27,4	10,1	A6	SC	80,8	37,2
517,630	518,600	0,970	33,0	16,0	A6	CL	87,7	56,2
518,600	520,050	1,450	30,9	14,2	A6	CL	88,6	51,3
520,050	520,800	0,750	35,7	17,5	A6	CL	78,2	56,0
520,800	521,520	0,720	37,1	17,7	A6	CL	89,8	64,7
521,520	522,040	0,520	34,6	16,2	A6	CL	92,8	63,6
522,040	522,330	0,290	30,0	17,1	A6	CL	92,3	55,7
522,330	523,440	1,110	32,5	15,1	A6	CL	87,7	51,6
523,440	524,650	1,210	30,1	14,2	A6	CL	47,0	51,1
524,650	525,680	1,030	32,4	15,8	A6	CL	89,0	49,8
525,680	526,200	0,520	30,2	13,4	A6	CL	85,3	49,4
526,200	526,640	0,440	30,7	14,9	A6	CL	85,4	54,1
526,640	527,410	0,770	38,8	18,6	A6	CL	92,3	69,8
527,410	527,605	0,195	30,0	14,5	A6	CL	58,4	94,1
527,605	527,760	0,155	40,0	19,6	A6	SC	58,4	34,9
527,760	528,010	0,250	40,3	19,6	A76	SC	86,7	45,6
528,010	528,090	0,080	40,6	19,5	A76	CL	86,7	56,3

528,090	529,100	1,010	30,9	10,7	A6	CL	94,9	51,6
529,420	530,000	0,580	28,5	10,6	A6	CL	94,3	54,7
532,420	532,770	0,350	27,3	13,4	A6	SC	77,8	40,7
532,770	533,210	0,440	20,6	8,6	A24	SC	80,0	34,7
533,210	533,330	0,120	25,5	11,6	A6	SC	82,0	40,3
533,330	533,850	0,520	24,4	11,1	A6	SC	83,7	38,3
533,850	534,050	0,200	20,7	8,1	A4	SC	88,1	41,2
534,050	534,200	0,150	19,8	8,1	A4	SC	89,6	42,8
534,200	534,520	0,320	23,9	10,2	A6	SC	89,8	42,9
534,520	535,135	0,615	32,2	13,9	A6	CL	90,2	50,6
535,135	536,000	0,865	27,6	11,7	A6	SC	71,3	43,5
536,000	536,090	0,090	30,4	11,8	A6	CL	86,5	72,0
536,090	536,600	0,510	26,8	12,4	A6	SC	93,5	40,5
536,600	536,950	0,350	30,5	14,6	A6	SC	83,5	42,4
536,950	537,070	0,120	29,6	12,6	A6	SC	87,2	44,8
537,070	537,550	0,480	0,0	0,0	A24	SM	83,8	24,6
537,550	538,150	0,600	0,0	0,0	A24	SM	86,8	37,4
538,150	538,950	0,800	0,0	0,0	A24	SM	86,8	34,5
538,950	539,600	0,650	21,7	9,1	A4	SC	82,7	42,7
539,600	540,000	0,400	22,0	7,9	A24	SC	82,8	26,0
540,000	540,850	0,850	0,0	0,0	A24	SM	82,8	26,0
542,400	542,800	0,400	20,3	7,3	A24	SC	89,2	27,1
546,925	547,215	0,290	20,1	7,6	A24	SC	75,0	32,4
547,215	547,350	0,135	10,0	2,7	A24	SM	72,9	15,8
547,350	547,600	0,250	18,7	5,7	A24	SM	61,4	22,4
547,740	548,180	0,440	22,2	9,6	A4	SM	76,5	37,0
548,180	548,900	0,720	21,5	8,3	A4	SC	83,6	38,4
548,900	549,370	0,470	22,3	8,9	A4	SC	76,7	37,8
549,370	549,950	0,580	16,3	7,4	A24	SC	74,2	29,1
549,950	550,360	0,410	20,0	7,2	A24	SC	60,4	20,3
552,920	554,100	1,180	0,0	0,0	A24	SM	67,0	23,1
554,100	554,410	0,310	0,0	0,0	A24	SM	66,0	24,1
554,410	554,700	0,290	0,0	0,0	A24	SM	64,1	19,1

591,900 592,520 0,620 0,0 0,0 A24 SM 90,2 26,4 592,520 593,080 0,560 0,0 0,0 A24 SM 91,3 24,6 593,080 593,450 0,370 0,0 0,0 A24 SM 93,4 26,7 692,260 692,900 0,640 25,6 12,4 A6 SC 89,6 37,9 692,900 694,240 1,340 26,1 11,5 A24 SC 85,0 34,1 694,240 697,355 3,115 21,3 12,0 A24 SC 84,7 33,7 697,355 703,700 6,345 21,3 8,6 A24 SC 82,8 33,4 713,300 714,200 0,900 22,4 8,3 A4 SC 91,5 47,3 714,800 716,600 1,800 0,0 0,0 A24 SM 82,6 32,5 716,600 717,200									,
593,080 593,450 0,370 0,0 0,0 A24 SM 84,8 30,7 593,450 594,700 1,250 0,0 0,0 A24 SM 93,4 26,7 692,260 692,900 0,640 25,6 12,4 A6 SC 89,6 37,9 692,900 694,240 1,340 26,1 11,5 A24 SC 85,0 34,1 694,240 697,355 3,115 21,3 12,0 A24 SC 84,7 33,7 697,355 703,700 6,345 21,3 8,6 A24 SC 82,8 33,4 713,300 714,200 0,900 22,4 8,3 A4 SC 91,5 47,3 714,800 716,600 1,800 0,0 0,0 A24 SM 82,6 32,5 716,600 717,200 0,600 0,0 0,0 A24 SM 89,6 28,6 743,630 744,100	591,900	592,520	0,620	0,0	0,0	A24	SM	90,2	26,4
593,450 594,700 1,250 0,0 0,0 A24 SM 93,4 26,7 692,260 692,900 0,640 25,6 12,4 A6 SC 89,6 37,9 692,900 694,240 1,340 26,1 11,5 A24 SC 85,0 34,1 694,240 697,355 3,115 21,3 12,0 A24 SC 84,7 33,7 697,355 703,700 6,345 21,3 8,6 A24 SC 82,8 33,4 713,300 714,200 0,900 22,4 8,3 A4 SC 91,5 47,3 714,200 714,800 0,600 29,2 12,3 A6 SC 89,0 49,6 714,800 716,600 1,800 0,0 0,0 A24 SM 82,6 32,5 716,600 717,200 0,600 0,0 0,0 A24 SM 89,6 28,6 743,630 744,100	592,520	593,080	0,560	0,0	0,0	A24	SM	91,3	24,6
692,260 692,900 0,640 25,6 12,4 A6 SC 89,6 37,9 692,900 694,240 1,340 26,1 11,5 A24 SC 85,0 34,1 694,240 697,355 3,115 21,3 12,0 A24 SC 84,7 33,7 697,355 703,700 6,345 21,3 8,6 A24 SC 82,8 33,4 713,300 714,200 0,900 22,4 8,3 A4 SC 91,5 47,3 714,200 714,800 0,600 29,2 12,3 A6 SC 89,0 49,6 714,800 716,600 1,800 0,0 0,0 A24 SM 82,6 32,5 716,600 717,200 0,600 0,0 0,0 A24 SM 89,6 28,6 743,630 744,100 0,470 11,8 4,5 A24 SM 29,6 744,100 746,200 1,100	593,080	593,450	0,370	0,0	0,0	A24	SM	84,8	30,7
692,900 694,240 1,340 26,1 11,5 A24 SC 85,0 34,1 694,240 697,355 3,115 21,3 12,0 A24 SC 84,7 33,7 697,355 703,700 6,345 21,3 8,6 A24 SC 82,8 33,4 713,300 714,200 0,900 22,4 8,3 A4 SC 91,5 47,3 714,200 714,800 0,600 29,2 12,3 A6 SC 89,0 49,6 714,800 716,600 1,800 0,0 0,0 A24 SM 82,6 32,5 716,600 717,200 0,600 0,0 0,0 A24 SM 89,6 28,6 743,630 744,100 0,470 11,8 4,5 A24 SM 29,6 744,100 745,100 1,000 0,0 A24 SM 24,4 745,100 746,200 1,100 7,7 3,2	593,450	594,700	1,250	0,0	0,0	A24	SM	93,4	26,7
694,240 697,355 3,115 21,3 12,0 A24 SC 84,7 33,7 697,355 703,700 6,345 21,3 8,6 A24 SC 82,8 33,4 713,300 714,200 0,900 22,4 8,3 A4 SC 91,5 47,3 714,200 714,800 0,600 29,2 12,3 A6 SC 89,0 49,6 714,800 716,600 1,800 0,0 0,0 A24 SM 82,6 32,5 716,600 717,200 0,600 0,0 0,0 A24 SM 88,3 23,3 717,200 720,000 2,800 19,4 5,8 A24 SM 89,6 28,6 743,630 744,100 0,470 11,8 4,5 A24 SM 29,6 744,100 746,200 1,100 7,7 3,2 A24 SM 26,3 747,300 747,838 0,538 0,0	692,260	692,900	0,640	25,6	12,4	A6	SC	89,6	37,9
697,355 703,700 6,345 21,3 8,6 A24 SC 82,8 33,4 713,300 714,200 0,900 22,4 8,3 A4 SC 91,5 47,3 714,200 714,800 0,600 29,2 12,3 A6 SC 89,0 49,6 714,800 716,600 1,800 0,0 0,0 A24 SM 82,6 32,5 716,600 717,200 0,600 0,0 0,0 A24 SM 88,3 23,3 717,200 720,000 2,800 19,4 5,8 A24 SM 89,6 28,6 743,630 744,100 0,470 11,8 4,5 A24 SM 29,6 744,100 745,100 1,000 0,0 0,0 A24 SM 27,5 746,200 747,300 1,100 0,0 0,0 A24 SM 26,3 747,838 748,150 0,312 0,0 0,0 <td< td=""><td>692,900</td><td>694,240</td><td>1,340</td><td>26,1</td><td>11,5</td><td>A24</td><td>SC</td><td>85,0</td><td>34,1</td></td<>	692,900	694,240	1,340	26,1	11,5	A24	SC	85,0	34,1
713,300 714,200 0,900 22,4 8,3 A4 SC 91,5 47,3 714,200 714,800 0,600 29,2 12,3 A6 SC 89,0 49,6 714,800 716,600 1,800 0,0 0,0 A24 SM 82,6 32,5 716,600 717,200 0,600 0,0 0,0 A24 SM 88,3 23,3 717,200 720,000 2,800 19,4 5,8 A24 SM 89,6 28,6 743,630 744,100 0,470 11,8 4,5 A24 SM 29,6 744,100 745,100 1,000 0,0 0,0 A24 SM 24,4 745,100 746,200 1,100 7,7 3,2 A24 SM 26,3 747,300 747,838 0,538 0,0 0,0 A24 SM 22,6 748,150 749,150 1,000 0,0 0,0 A24 S	694,240	697,355	3,115	21,3	12,0	A24	SC	84,7	33,7
714,200 714,800 0,600 29,2 12,3 A6 SC 89,0 49,6 714,800 716,600 1,800 0,0 0,0 A24 SM 82,6 32,5 716,600 717,200 0,600 0,0 0,0 A24 SM 88,3 23,3 717,200 720,000 2,800 19,4 5,8 A24 SM 89,6 28,6 743,630 744,100 0,470 11,8 4,5 A24 SM 29,6 744,100 745,100 1,000 0,0 0,0 A24 SM 29,6 744,100 746,200 1,100 7,7 3,2 A24 SM 27,5 746,200 747,300 1,100 0,0 0,0 A24 SM 26,3 747,838 748,150 0,312 0,0 0,0 A24 SM 26,9 748,150 749,760 0,610 0,0 0,0 A24 SM 24,	697,355	703,700	6,345	21,3	8,6	A24	SC	82,8	33,4
714,800 716,600 1,800 0,0 0,0 A24 SM 82,6 32,5 716,600 717,200 0,600 0,0 0,0 A24 SM 88,3 23,3 717,200 720,000 2,800 19,4 5,8 A24 SM 89,6 28,6 743,630 744,100 0,470 11,8 4,5 A24 SM 29,6 744,100 745,100 1,000 0,0 0,0 A24 SM 24,4 745,100 746,200 1,100 7,7 3,2 A24 SM 26,3 747,300 747,300 1,100 0,0 0,0 A24 SM 26,3 747,838 748,150 0,312 0,0 0,0 A24 SM 22,6 749,150 749,760 0,610 0,0 0,0 A24 SM 24,2 749,760 751,100 1,340 29,9 11,8 A6 SC 49,5 <	713,300	714,200	0,900	22,4	8,3	A4	SC	91,5	47,3
716,600 717,200 0,600 0,0 0,0 A24 SM 88,3 23,3 717,200 720,000 2,800 19,4 5,8 A24 SM 89,6 28,6 743,630 744,100 0,470 11,8 4,5 A24 SM 29,6 744,100 745,100 1,000 0,0 0,0 A24 SM 24,4 745,100 746,200 1,100 7,7 3,2 A24 SM 27,5 746,200 747,300 1,100 0,0 0,0 A24 SM 26,3 747,300 747,838 0,538 0,0 0,0 A24 SM 22,6 747,838 748,150 0,312 0,0 0,0 A24 SM 25,7 749,150 749,760 0,610 0,0 0,0 A24 SM 24,2 749,760 751,100 1,340 29,9 11,8 A6 SC 49,5 754,70	714,200	714,800	0,600	29,2	12,3	A6	SC	89,0	49,6
717,200 720,000 2,800 19,4 5,8 A24 SM 89,6 28,6 743,630 744,100 0,470 11,8 4,5 A24 SM 29,6 744,100 745,100 1,000 0,0 0,0 A24 SM 24,4 745,100 746,200 1,100 7,7 3,2 A24 SM 27,5 746,200 747,300 1,100 0,0 0,0 A24 SM 26,3 747,300 747,838 0,538 0,0 0,0 A24 SM 22,6 747,838 748,150 0,312 0,0 0,0 A24 SM 26,9 748,150 749,150 1,000 0,0 0,0 A24 SM 24,2 749,760 751,100 1,340 29,9 11,8 A6 SC 49,5 751,100 752,354 1,254 25,4 8,3 A4 SC 35,5 754,700 766	714,800	716,600	1,800	0,0	0,0	A24	SM	82,6	32,5
743,630 744,100 0,470 11,8 4,5 A24 SM 29,6 744,100 745,100 1,000 0,0 0,0 A24 SM 24,4 745,100 746,200 1,100 7,7 3,2 A24 SM 27,5 746,200 747,300 1,100 0,0 0,0 A24 SM 26,3 747,300 747,838 0,538 0,0 0,0 A24 SM 22,6 747,838 748,150 0,312 0,0 0,0 A24 SM 26,9 748,150 749,150 1,000 0,0 0,0 A24 SM 25,7 749,150 749,760 0,610 0,0 0,0 A24 SM 24,2 749,760 751,100 1,340 29,9 11,8 A6 SC 49,5 751,100 752,354 1,254 25,4 8,3 A4 SC 35,5 754,700 757,000 2	716,600	717,200	0,600	0,0	0,0	A24	SM	88,3	23,3
744,100 745,100 1,000 0,0 0,0 A24 SM 24,4 745,100 746,200 1,100 7,7 3,2 A24 SM 27,5 746,200 747,300 1,100 0,0 0,0 A24 SM 26,3 747,300 747,838 0,538 0,0 0,0 A24 SM 22,6 747,838 748,150 0,312 0,0 0,0 A24 SM 26,9 748,150 749,150 1,000 0,0 0,0 A24 SM 25,7 749,150 749,760 0,610 0,0 0,0 A24 SM 24,2 749,760 751,100 1,340 29,9 11,8 A6 SC 49,5 751,100 752,354 1,254 25,4 8,3 A4 SC 35,5 754,700 757,000 2,300 28,1 10,5 A6 CL 86,0 51,4 766,500 766,	717,200	720,000	2,800	19,4	5,8	A24	SM	89,6	28,6
745,100 746,200 1,100 7,7 3,2 A24 SM 27,5 746,200 747,300 1,100 0,0 0,0 A24 SM 26,3 747,300 747,838 0,538 0,0 0,0 A24 SM 22,6 747,838 748,150 0,312 0,0 0,0 A24 SM 26,9 748,150 749,150 1,000 0,0 0,0 A24 SM 25,7 749,150 749,760 0,610 0,0 0,0 A24 SM 24,2 749,760 751,100 1,340 29,9 11,8 A6 SC 49,5 751,100 752,354 1,254 25,4 8,3 A4 SC 35,5 754,700 757,000 2,300 28,1 10,5 A6 CL 86,0 51,4 766,500 766,600 0,100 69,8 28,8 A75 CL 88,6 76,2 766,7	743,630	744,100	0,470	11,8	4,5	A24	SM		29,6
746,200 747,300 1,100 0,0 0,0 A24 SM 26,3 747,300 747,838 0,538 0,0 0,0 A24 SM 22,6 747,838 748,150 0,312 0,0 0,0 A24 SM 26,9 748,150 749,150 1,000 0,0 0,0 A24 SM 25,7 749,150 749,760 0,610 0,0 0,0 A24 SM 24,2 749,760 751,100 1,340 29,9 11,8 A6 SC 49,5 751,100 752,354 1,254 25,4 8,3 A4 SC 35,5 754,700 757,000 2,300 28,1 10,5 A6 CL 86,0 51,4 766,500 766,600 0,150 38,5 15,7 A26 SC 56,2 32,6 766,750 768,100 1,350 35,3 13,2 A6 SC 60,8 44,8	744,100	745,100	1,000	0,0	0,0	A24	SM		24,4
747,300 747,838 0,538 0,0 0,0 A24 SM 22,6 747,838 748,150 0,312 0,0 0,0 A24 SM 26,9 748,150 749,150 1,000 0,0 0,0 A24 SM 25,7 749,150 749,760 0,610 0,0 0,0 A24 SM 24,2 749,760 751,100 1,340 29,9 11,8 A6 SC 49,5 751,100 752,354 1,254 25,4 8,3 A4 SC 35,5 754,700 757,000 2,300 28,1 10,5 A6 CL 86,0 51,4 766,500 766,600 0,100 69,8 28,8 A75 CL 88,6 76,2 766,750 768,100 1,350 35,3 13,2 A6 SC 56,2 32,6 766,750 787,000 2,000 53,7 20,4 A75 CL 77,7 <td< td=""><td>745,100</td><td>746,200</td><td>1,100</td><td>7,7</td><td>3,2</td><td>A24</td><td>SM</td><td></td><td>27,5</td></td<>	745,100	746,200	1,100	7,7	3,2	A24	SM		27,5
747,838 748,150 0,312 0,0 0,0 A24 SM 26,9 748,150 749,150 1,000 0,0 0,0 A24 SM 25,7 749,150 749,760 0,610 0,0 0,0 A24 SM 24,2 749,760 751,100 1,340 29,9 11,8 A6 SC 49,5 751,100 752,354 1,254 25,4 8,3 A4 SC 35,5 754,700 757,000 2,300 28,1 10,5 A6 CL 86,0 51,4 766,500 766,600 0,100 69,8 28,8 A75 CL 88,6 76,2 766,600 766,750 0,150 38,5 15,7 A26 SC 56,2 32,6 766,750 768,100 1,350 35,3 13,2 A6 SC 60,8 44,8 785,000 787,000 2,000 53,7 20,4 A75 CL <	746,200	747,300	1,100	0,0	0,0	A24	SM		26,3
748,150 749,150 1,000 0,0 0,0 A24 SM 25,7 749,150 749,760 0,610 0,0 0,0 A24 SM 24,2 749,760 751,100 1,340 29,9 11,8 A6 SC 49,5 751,100 752,354 1,254 25,4 8,3 A4 SC 35,5 754,700 757,000 2,300 28,1 10,5 A6 CL 86,0 51,4 766,500 766,600 0,100 69,8 28,8 A75 CL 88,6 76,2 766,600 766,750 0,150 38,5 15,7 A26 SC 56,2 32,6 766,750 768,100 1,350 35,3 13,2 A6 SC 60,8 44,8 785,000 787,000 2,000 53,7 20,4 A75 CL 77,7 67,8 805,530 806,000 0,470 47,7 17,6 A75	747,300	747,838	0,538	0,0	0,0	A24	SM		22,6
749,150 749,760 0,610 0,0 0,0 A24 SM 24,2 749,760 751,100 1,340 29,9 11,8 A6 SC 49,5 751,100 752,354 1,254 25,4 8,3 A4 SC 35,5 754,700 757,000 2,300 28,1 10,5 A6 CL 86,0 51,4 766,500 766,600 0,100 69,8 28,8 A75 CL 88,6 76,2 766,600 766,750 0,150 38,5 15,7 A26 SC 56,2 32,6 766,750 768,100 1,350 35,3 13,2 A6 SC 60,8 44,8 785,000 787,000 2,000 53,7 20,4 A75 CL 77,7 67,8 805,530 806,000 0,470 47,7 17,6 A75 CL 84,9 62,4 833,600 834,710 1,110 41,9 15,1	747,838	748,150	0,312	0,0	0,0	A24	SM		26,9
749,760 751,100 1,340 29,9 11,8 A6 SC 49,5 751,100 752,354 1,254 25,4 8,3 A4 SC 35,5 754,700 757,000 2,300 28,1 10,5 A6 CL 86,0 51,4 766,500 766,600 0,100 69,8 28,8 A75 CL 88,6 76,2 766,600 766,750 0,150 38,5 15,7 A26 SC 56,2 32,6 766,750 768,100 1,350 35,3 13,2 A6 SC 60,8 44,8 785,000 787,000 2,000 53,7 20,4 A75 CL 77,7 67,8 805,530 806,000 0,470 47,7 17,6 A75 CL 84,9 62,4 833,000 833,600 0,600 44,4 16,3 A27 SC 50,3 34,1 833,600 834,710 1,110 41,9	748,150	749,150	1,000	0,0	0,0	A24	SM		25,7
751,100 752,354 1,254 25,4 8,3 A4 SC 35,5 754,700 757,000 2,300 28,1 10,5 A6 CL 86,0 51,4 766,500 766,600 0,100 69,8 28,8 A75 CL 88,6 76,2 766,600 766,750 0,150 38,5 15,7 A26 SC 56,2 32,6 766,750 768,100 1,350 35,3 13,2 A6 SC 60,8 44,8 785,000 787,000 2,000 53,7 20,4 A75 CL 77,7 67,8 805,530 806,000 0,470 47,7 17,6 A75 CL 84,9 62,4 833,000 833,600 0,600 44,4 16,3 A27 SC 50,3 34,1 833,600 834,710 1,110 41,9 15,1 A76 SC 57,9 41,9	749,150	749,760	0,610	0,0	0,0	A24	SM		24,2
754,700 757,000 2,300 28,1 10,5 A6 CL 86,0 51,4 766,500 766,600 0,100 69,8 28,8 A75 CL 88,6 76,2 766,600 766,750 0,150 38,5 15,7 A26 SC 56,2 32,6 766,750 768,100 1,350 35,3 13,2 A6 SC 60,8 44,8 785,000 787,000 2,000 53,7 20,4 A75 CL 77,7 67,8 805,530 806,000 0,470 47,7 17,6 A75 CL 84,9 62,4 833,000 833,600 0,600 44,4 16,3 A27 SC 50,3 34,1 833,600 834,710 1,110 41,9 15,1 A76 SC 57,9 41,9	749,760	751,100	1,340	29,9	11,8	A6	SC		49,5
766,500 766,600 0,100 69,8 28,8 A75 CL 88,6 76,2 766,600 766,750 0,150 38,5 15,7 A26 SC 56,2 32,6 766,750 768,100 1,350 35,3 13,2 A6 SC 60,8 44,8 785,000 787,000 2,000 53,7 20,4 A75 CL 77,7 67,8 805,530 806,000 0,470 47,7 17,6 A75 CL 84,9 62,4 833,000 833,600 0,600 44,4 16,3 A27 SC 50,3 34,1 833,600 834,710 1,110 41,9 15,1 A76 SC 57,9 41,9	751,100	752,354	1,254	25,4	8,3	A4	SC		35,5
766,600 766,750 0,150 38,5 15,7 A26 SC 56,2 32,6 766,750 768,100 1,350 35,3 13,2 A6 SC 60,8 44,8 785,000 787,000 2,000 53,7 20,4 A75 CL 77,7 67,8 805,530 806,000 0,470 47,7 17,6 A75 CL 84,9 62,4 833,000 833,600 0,600 44,4 16,3 A27 SC 50,3 34,1 833,600 834,710 1,110 41,9 15,1 A76 SC 57,9 41,9	754,700	757,000	2,300	28,1	10,5	A6	CL	86,0	51,4
766,750 768,100 1,350 35,3 13,2 A6 SC 60,8 44,8 785,000 787,000 2,000 53,7 20,4 A75 CL 77,7 67,8 805,530 806,000 0,470 47,7 17,6 A75 CL 84,9 62,4 833,000 833,600 0,600 44,4 16,3 A27 SC 50,3 34,1 833,600 834,710 1,110 41,9 15,1 A76 SC 57,9 41,9	766,500	766,600	0,100	69,8	28,8	A75	CL	88,6	76,2
785,000 787,000 2,000 53,7 20,4 A75 CL 77,7 67,8 805,530 806,000 0,470 47,7 17,6 A75 CL 84,9 62,4 833,000 833,600 0,600 44,4 16,3 A27 SC 50,3 34,1 833,600 834,710 1,110 41,9 15,1 A76 SC 57,9 41,9	766,600	766,750	0,150	38,5	15,7	A26	SC	56,2	32,6
805,530 806,000 0,470 47,7 17,6 A75 CL 84,9 62,4 833,000 833,600 0,600 44,4 16,3 A27 SC 50,3 34,1 833,600 834,710 1,110 41,9 15,1 A76 SC 57,9 41,9	766,750	768,100	1,350	35,3	13,2	A6	SC	60,8	44,8
833,000 833,600 0,600 44,4 16,3 A27 SC 50,3 34,1 833,600 834,710 1,110 41,9 15,1 A76 SC 57,9 41,9	785,000	787,000	2,000	53,7	20,4	A75	CL	77,7	67,8
833,600 834,710 1,110 41,9 15,1 A76 SC 57,9 41,9	805,530	806,000	0,470	47,7	17,6	A75	CL	84,9	62,4
	833,000	833,600	0,600	44,4	16,3	A27	SC	50,3	34,1
858,100 860,070 1,970 47,1 17,5 A75 SC 55,5 42,7	833,600	834,710	1,110	41,9	15,1	A76	SC	57,9	41,9
	858,100	860,070	1,970	47,1	17,5	A75	SC	55,5	42,7



ANEXO V

Modelo de ficha de campo adotado

VALE	ESTRADA DE FERRO CARAJÁS		
TÍTULO	N° VALE	PÁGINA	
GERAL GERENCIAMENTO DE INSPEÇÃO DE CAMPO - AUDITORIA PLANILHA FINAL DE INSPEÇÃO - PFI TRECHO KM 494+500 A 494+900	RI-200K-X-22352	2/4 REV.	

1 - LOCALIZAÇÃO TRECHO GERAL: km 494+500 a 494+900 MUNICÍPIO: Córrego Novo PONTO (S) COM PROBLEMA (S): LD: km 494+500 a 494+900 TEMPO: Bom com sol LE: km 494+500 a 494+900 RESP.: XXXXXXXXX PL: km 494+500 a 494+900 DATA DA INSPEÇÃO: 23/11/2009

Trecho em talude de corte em ambos os lados da ferrovia, com erosões e escorregamentos ativos.

FOTO 1 (km 494+500): Vista geral do início do trecho (Sentido Carajás)

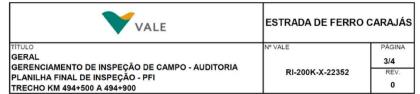


3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO LADO DIREITO DA FERROVIA					
TIPO DE ESTRUTURA:	Talude de corte				
GEOMETRIA:	Altura máx: -	Inclinação: -			
CARACT.DO MATERIAL:	Solo residual de arenito, areia siltosa, compacta e facilmente erodível				
PRESENÇA DE ÁGUA:	Não ocorre				
DRENAGEM SUPERFICIAL:	Canaleta de pé e de b	Canaleta de pé e de berma em solo			
DRENAGEM INTERNA:	Não observada				
ESTRUTURAS ASSOCIADAS:	Não observadas				

3.1 - OBSERVAÇÕES RELEVANTES DA ÁREA - LADO DIREITO DA FERROVIA

- a) Trecho com talude negativo, onde o material proveniente do processo erosivo obstruiu o sistema de drenagem superficial da berma, causando erosão no talude abaixo da mesma;
- b) km 494+600: presença de estrutura de contenção no pé e na primeira berma do talude;
- c) Presença de escorregamentos/erosões generalizadas em quase toda a extensão do trecho com sulcos erosivos profundos.

3.2 - MEDIDAS DE CONTROLE/CORRETIVAS - LADO DIREITO DA FERROVIA



- a) Como ação imeditada recomenda-se executar a limpeza das canaletas corrigindo a profundidade, tomando o cuidado para que o material de limpeza seja destinado corretamente;
- b) A curto prazo recomenda-se a elaboração e implantação de projeto para estabilização dos processos erosivos, adequação do sistema de drenagem superficial e implantação da cobertura vegetal na face do talude.

FOTO 2 (km 494+500): Vista parcial do talude - LD



4 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁRE	A DO LADO ESQUERDO	DA FERROVIA			
TIPO DE ESTRUTURA:	Talude de corte				
GEOMETRIA:	Altura máx: -	Inclinação: -			
CARACT.DO MATERIAL:	Solo residual de arenito, areia siltosa, compacta e facilmente erodíve				
PRESENÇA DE ÁGUA:	Não ocorre				
DRENAGEM SUPERFICIAL:	Canaleta de pé e de b	Canaleta de pé e de berma em solo			
DRENAGEM INTERNA:	Não observada				
ESTRUTURAS ASSOCIADAS:	Não observadas				
ESTRUTURAS ASSOCIADAS:	Não observadas				

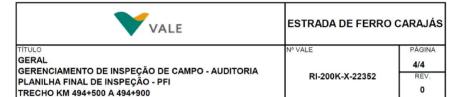
4.1 - OBSERVAÇÕES DA ÁREA - LADO ESQUERDO DA FERROVIA

- a) Presença de estrutura de contenção de dormentes, que encontra-se rompida no talude;
- b) Presença de escorregamentos/erosões generalizadas e quase toda a extensão do trecho com sulcos erosivos profundos, associados à deficiência da drenagem superficial, ausência de proteção vegetal e às características do material.

4.2 - MEDIDAS DE CONTROLE/CORRETIVAS - LADO ESQUERDO DA FERROVIA

- a) Como ação imeditada recomenda-se executar a limpeza das canaletas corrigindo a profundidade, tomando o cuidado para que o material de limpeza seja destinado corretamente;
- b) A curto prazo recomenda-se a elaboração e implantação de projeto para estabilização dos processos erosivos, adequação do sistema de drenagem superficial e implantação da cobertura vegetal na face do talude.

FOTO 3 (km 494+500): Vista parcial do talude - LE





5 - PLATAFORMA LARGURA DA PLATAFORMA A PARTIR DO EIXO: LD = 5 m LE = 9 m PRESENÇA DE ÁGUA: Não ocorre DRENAGEM SUPERFICIAL: Canaleta de pé em solo DRENAGEM INTERNA: Não observada 5.1 - OBSERVAÇÕES DA ÁREA - PLATAFORMA DA FERROVIA

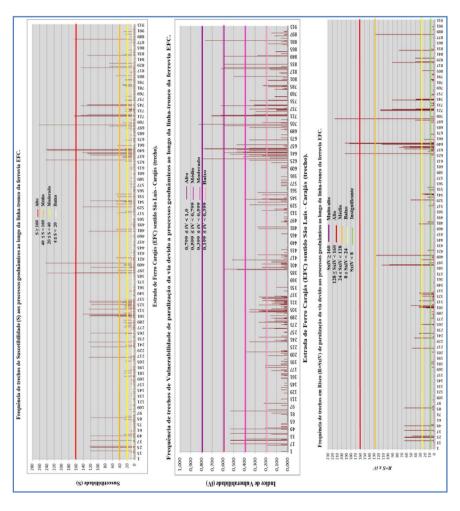
a) O material proveniente dos processos erosivos (escorregamentos/erosões) obstruiram a drenagem da plataforma. O volume de material solto (solo) pode vir a atingir a plataforma.

5.2 - MEDIDAS DE CONTROLE/CORRETIVAS - PLATAFORMA DA FERROVIA

- a) Monitoramento da plataforma;
- b) Manutenção e limpeza das canaletas de drenagem.

ANEXO VI

Análise gráfica da metodologia para diagnóstico de problemas geológico-geotécnicos de ferrovia, aplicada em toda a extensão da Estrada de Ferro Carajás (EFC)

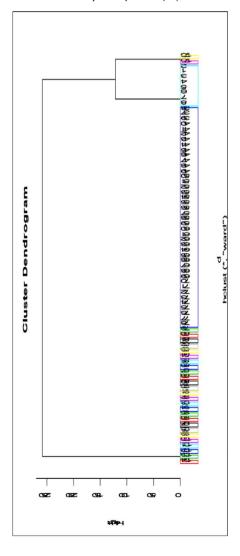


ANEXO VII

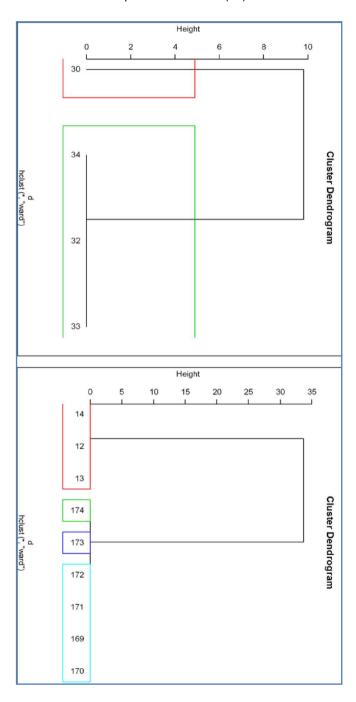
Dados e Dendogramas de referência da Análise Multivariada

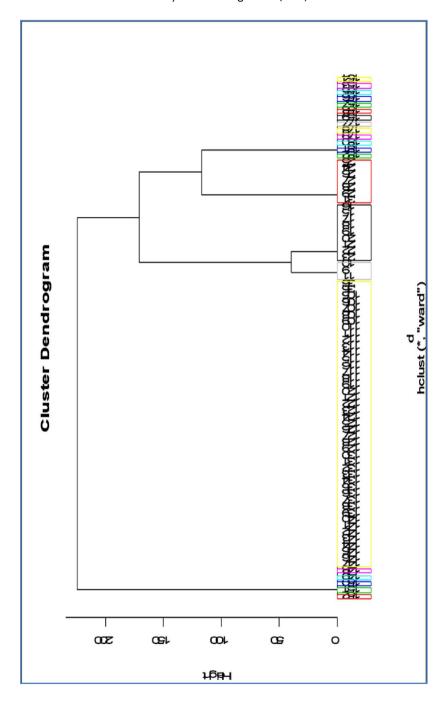
Setorização geológico-geotécnica

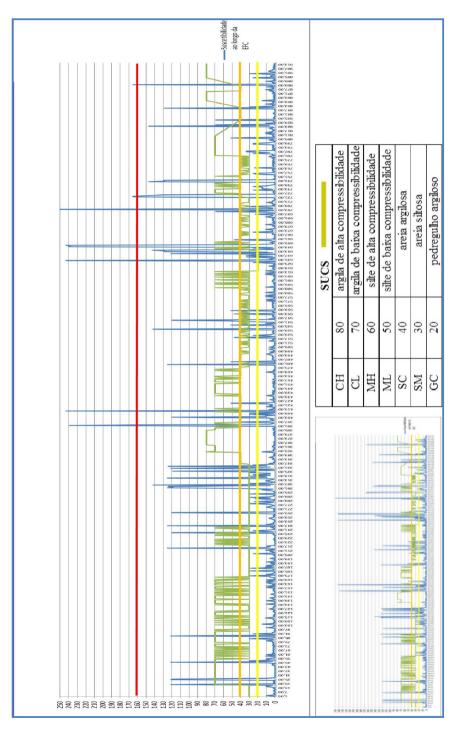
Cobertura Dentrítica Laterítica (Tc) Formação Itaperucu (Ki)



Depósitos Aluvionares (Qa)







ANEXO VIII

Método ad-hoc utilizando a dinâmica de Brainstorming. Especialistas: Eng. Roberto Filgueiras, Eng. Lucas Deleon Ferreira, Eng. Bruno de Oliveira Costa Couto e Engª Rosyelle Corteletti (autora do estudo). Correlações entre feições/magnitude existentes e a criticidade quanto ao sistema de manutenção de ferrovias.

ÍNDICE DE CRITICIDADE (iC) DE OCORRÊNCIA DE PROCESSOS GEODINÂMICOS EM FERROVIAS					
TALUDE	Maciço de Solo				
	Corrida de detritos ao longo do talvegue interceptando a plataforma.				
CRÍTICO = 5	Escorregamentos de taludes.				
CRITICO = 3	Erosão transversal invadindo a plataforma.				
	Trincas no topo associados a processos de escorregamentos.				
	Existência de embarrigamento.				
	Deformações de obras civis (canaletas, sistema de drenagem, etc.).				
	Inclinação de estruturas adjacentes, ou árvores.				
	Abatimento localizado da massa de solo.				
	Existência de pontos de surgência de água.				
	Existência de fuga de material.				
DESFAVORÁVEL = 4	Processo de rastejo.				
	Quebra de alinhamento da vegetação.				
	Depósitos de tálus/colúvios com indícios ou históricos de movimentação próximos à plataforma.				
MODERADO = 3	Assoreamento/obstrução de valas e/ou canaletas de drenagem.				
	Formação de cavidades.				
	Erosão transversal ao longo do talude.				

	Erosão laminar/início de erosões.	
BAIXO = 2	Deficiência de drenagem.	
	Existência de feições antigas (erosões e rupturas).	
INEXISTENTE = 1	Inexistência de feições ou sinais de processos erosivos/ruptura.	

tura.					
ÍNDICE DE CRITICIDADE (iC) DE OCORRÊNCIA DE PROCESSOS GEODINÂMICOS EM FERROVIAS					
	TALUDE - Maciço de Solo				
CRÍTICO = 5	20) Corrida de detritos ao longo do talvegue interceptando a plataforma.				
Qualquer item (14 a 20)	19) Escorregamentos de taludes.				
	18) Erosão transversal invadindo a plataforma.				
	17) Trincas no topo associados a processos de escorregamentos.				
	16) Existência de embarrigamento.				
	15) Deformações de obras civis (canaletas, sistema de drenagem, etc.).				
	14) Inclinação de estruturas adjacentes, ou árvores.				
DESFAVORÁVEL = 4	13) Abatimento localizado da massa de solo.				
Mínimo 2 itens. (9 a 13) Se corte item nº 8.	12) Existência de pontos de surgência de água.				
Mínimo item nº 5 + nº 11	11) Existência de fuga de material.				
Mínimo item nº 5 + nº 12	10) Processo de rastejo.				
Mínimo item nº 6 + nº 13	9) Quebra de alinhamento da vegetação.				
	8) Depósitos de tálus/colúvios com indícios ou históricos de movimentação próximos à plataforma.				
MODERADO = 3 Qualquer item (5 a 6)	7) Assoreamento/obstrução de valas e/ou canaletas de drenagem.				
	6) Formação de cavidades.				
	5) Erosão transversal com sulcos ao longo do talude.				
BAIXO = 2	4) Erosão laminar/início de erosões.				
Qualquer item (2 a 4)	3) Deficiência de drenagem.				
	2) Existência de feições antigas (erosões e rupturas).				
INEXISTENTE = 1 Marcação do item	1) Inexistência de feições ou sinais de processos erosivos/ruptura.				

ÍNDICE DE CRITICIDADE (¡C) DE OCORRÊNCIA DE PROCESSOS GEODINÂMICOS EM FERROVIAS	
PLATAFORMA	Maciço de Solo
CRÍTICO = 5	Abatimento localizado na plataforma.
	Trincas na plataforma associados a processos de escorregamentos.
	Deformações de obras civis (canaletas, sistema de drenagem, etc.).
	Desnivelamento entre estruturas e terrenos adjacentes.
	Altura do lastro (> 60cm).
	Aparador de lastro.
DESFAVORÁVEL = 4	Erosão longitudinal à plataforma com sulcos profundos.
	Erosão transversal invadindo a plataforma.
	Existência de pontos de surgência de água.
	Existência de fuga de material.
	Zonas de baixada, sujeitas a alagamentos periódicos.
	Áreas encharcadas.
MODERADO = 3	Assoreamento/obstrução de valas e/ou canaletas de drena- gem.
	Erosão transversal próxima à plataforma.
	Erosão longitudinal na plataforma com sucos rasos.
BAIXO = 2	Deficiência de drenagem.
	Erosão laminar/início de erosões.
	Existência de feições antigas (erosões e rupturas).
INEXISTENTE = 1	Inexistência de feições ou sinais de processos erosivos/ruptura.

ÍNDICE DE CRITICIDADE (iC) DE OCORRÊNCIA DE PROCESSOS GEODINÂMICOS EM FERROVIAS

PLATAFORMA - Maciço de Solo

19) Abatimento localizado na plataforma.18) Trincas na plataforma associados a processos de escorregamentos.
17) Deformações de obras civis (canaletas, sistema de drenagem, etc.).
16) Desnivelamento entre estruturas e terrenos adjacentes.
15) Altura do lastro (> 60cm).
14) Aparador de lastro.
13) Erosão longitudinal à plataforma com sulcos pro- fundos.
12) Erosão transversal com sulcos profundos invadindo a plataforma.
11) Existência de pontos de surgência de água.
10) Existência de fuga de material.
9) Áreas encharcadas.
8) Assoreamento/obstrução de valas e/ou canaletas de drenagem.
7) Zonas de baixada, sujeitas a alagamentos periódicos.
6) Erosão transversal com sulcos rasos próxima à plataforma.
5) Erosão longitudinal na plataforma com sucos rasos.
4) Deficiência de drenagem.
3) Erosão laminar/início de erosões.
2) Existência de feições antigas (erosões e rupturas).
1) Inexistência de feições ou sinais de processos erosivos/ruptura.

SOBRE A AUTORA

Rosyelle Cristina Corteletti possui Doutorado e Mestrado em Geotecnia pelo Nucleo de Geotecnia (NUGEO/UFOP), Graduação em Geologia e Engenharia de Minas (UFOP/UFMG). Como doutoranda e bolsista do Deutsche Akademische austauschdienst (DAAD) e CNPq foi pesquisadora na Republica Federal da Alemanha (2011-2013), no Geotechnik im Bauwesen, Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule (RWTH) - Aachen, Alemanha. Atualmente é pesquisadora e professora de Análise de Risco Geotécnico da pós-graduação em Geotecnia do NUGEO no Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada CTGA/UFOP.

