

**Levantamentos de Condição Estrutural do
Pavimento da BR-290, Visando o Estabelecimento
de Modelos de Previsão de Desempenho a serem
Incorporados ao Sistema de Gerência de
Pavimentos da Rodovia**

Fevereiro, 2005

ANEXO IV

LEVANTAMENTOS DE CONDIÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO DA BR-290, VISANDO O ESTABELECIMENTO DE MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO A SEREM INCORPORADOS AO SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS DA RODOVIA.

INTRODUÇÃO

A presente pesquisa teve como objetivo a determinação da condição estrutural do pavimento a partir de levantamentos defletométrico e de georadar (GPR) e estabelecer modelos de previsão de desempenho. Neste estudo pode obter os resultados da interpretação dos levantamentos defletométricos com o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) sobre o pavimento da BR-290/RS, trecho entre o km 0,000 e o km 86,000, abrangendo as faixas de tráfego 2 (central) e 3 (externa) no sentido Osório - Porto Alegre (Lado Direito). Os resultados obtidos serão posteriormente analisados à luz dos resultados obtidos com a interpretação dos sinais registrados com o Georadar (Relatório apresentado no Anexo 02), o qual será utilizado principalmente para fornecer a espessura total do pavimento (camadas acima do subleito), a fim de se definir melhor as espessuras médias das camadas do pavimento em cada Subtrecho Homogêneo do banco de dados do SGP.

A partir dos dados levantados, avaliados e retroanalizados pode-se obter resultados das propriedades estruturais e funcionais do pavimento mais próximas a realidade de campo, possibilitando assim gerar dados mais confiáveis obtidos no programa de gerência de pavimento, na medida que uma maior gama de dados incorporados ao sistema possibilitou redução de possíveis erros intrínsecos, fato este observado através do índice de calibração, indicado na figura 01, grifado em vermelho. Nesta figura pode-se observar que o índice ideal, indicado pelo HDM-III (*AASHO Road Test*), é de 0.1 para recapeamentos, enquanto que até momento, com o acréscimo da calibração no ano corrente, é de 0.025.

Através disto, cabe salientar da importância do acompanhamento e realização de estudos e ensaios ao longo do trecho ao longo dos anos, de forma a obter históricos mais confiáveis e periódico, e ao mesmo tempo um acompanhamento da evolução da vida do pavimento, possibilitando assim a geração de uma curva ou um modelo de previsão de desempenho de pavimentos específico para a BR 290-Free way.

Em anexo é apresentado o relatório final dos estudos realizados, com figuras e quadros que melhor exemplificam o descrito acima.

ANEXOS

**LEVANTAMENTOS DE CONDIÇÃO ESTRUTURAL DO
PAVIMENTO DA BR-290, VISANDO O ESTABELECIMENTO DE
MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO A SEREM
INCORPORADOS AO SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS
DA RODOVIA.**

Trecho: km 0,000 - km 86,000

Maio de 2004

1 - Processo Aplicado

As análises foram conduzidas aplicando um recurso recentemente incorporado ao programa Laymod4 que permite a retroanálise não apenas dos módulos de elasticidade das camadas do pavimento como também a determinação simultânea da espessura total de camadas asfálticas existentes. No caso presente, como se trata de pavimentos asfálticos em que o grande diferencial de rigidez entre as camadas da estrutura ocorre entre as camadas asfálticas que compõem o revestimento, de um lado, e o todo das camadas subjacentes (camadas granulares e de solos, e a base de BGTC severamente trincada), de outro, pôde ser adotado o modelo estrutural mais simples, indicado na Figura 2.1, onde a estrutura é modelizada por um sistema de duas camadas elásticas. A camada do topo, de espessura h_1 e módulo de elasticidade E_1 , abrange todas as camadas asfálticas, enquanto que a camada subjacente, de espessura praticamente infinita e módulo de elasticidade E_2 , sintetiza os efeitos das demais camadas (BGTC trincada, camadas granulares e de solos) presentes no pavimento. A viabilidade deste modelo deve ser julgada com base nos erros mínimos resultantes do ajuste dos parâmetros h_1 , E_1 e E_2 para a reprodução da bacia lida com o FWD.

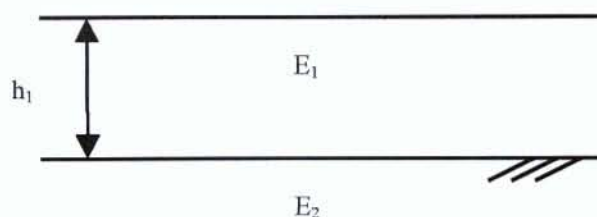


Figura 1.1 - Modelo estrutural adotado

2 - Resultados

Nas Tabelas apresentadas no Anexo 01 estão destacados alguns resultados dos valores que foram obtidos para os parâmetros h_1 , E_1 e E_2 de modo a minimizar o erro global entre a bacia de campo e a bacia prevista através da teoria de camadas elásticas em cada estação de ensaio. Foi observado que apenas quando o erro do ajuste situava-se acima de algo em torno de 32% é que as espessuras determinadas não apresentavam coerência com os registros disponíveis no banco de dados do SGP.

Na Figura 01 é demonstrada a tela do SGP3 contendo os resultados da calibração do modelo de previsão de desempenho do pavimento da Free Way ajustados de acordo com os resultados descritos por este relatório, destaca-se que em vários sub-trechos do pavimento da Free Way ainda não foi possível obter um coeficiente de calibração confiável para o modelo de previsão de desempenho do pavimento, valores estes destacados em vermelho na Figura 01. Salienta-se que estes valores deveriam se aproximar dos coeficientes obtidos no HDM-III (*AASHTO Road Test*), valores estes grifados em azul. Em busca de atingir uma melhor calibração dos coeficientes, será necessário obter mais dados do pavimento, realizando um acompanhamento em nível de ensaios do mesmo, ao longo de um período maior.

LAPAV – LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO FUNDAÇÃO LUIZ ENGLERT

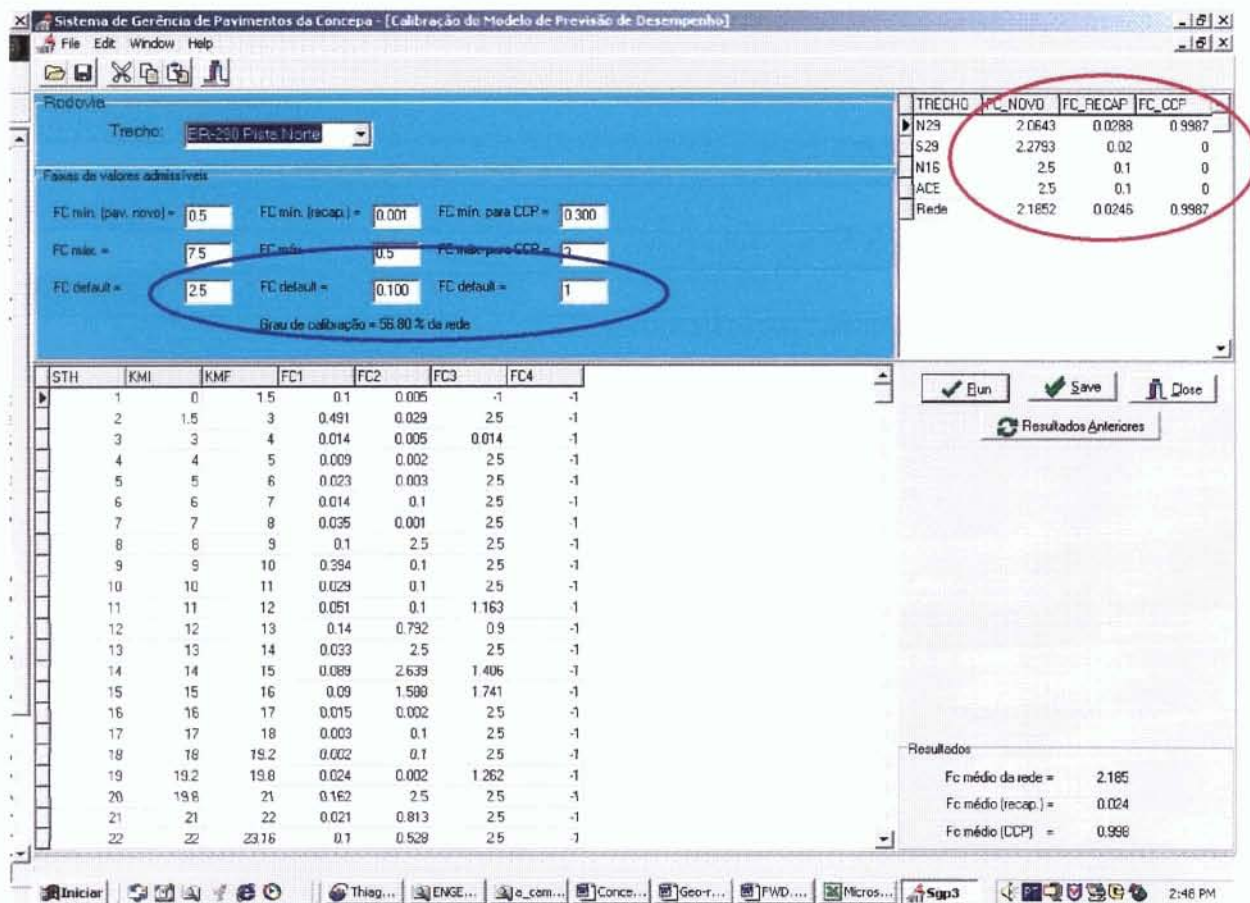


Figura 01 – Tela do SGP3 contendo os resultados da calibração do modelo de previsão de desempenho do pavimento da Free Way .

ANEXO 01

FAIXA CENTRAL DA BR 290																	
km	E1 a 25oC (kgf/cm2)	h1 (cm)	E1 campo (kgf/cm2)	Trevest. (oC)	E2 campo (kgf/cm2)	Erro (%)	D0 a 40 kN	Carga (kgf)	D0 (micra)	D20 (micra)	D30 (micra)	D45 (micra)	D65 (micra)	D90 (micra)	D120 (micra)	Tar (oC)	Tsup (oC)
1.500	57849	26.5	50483	32.0	2520	2.2	139.5	4233.7	144	119	107	88	67	51	37	27	37
1.540	48337	32.1	38933	33.0	2260	1.7	145.0	4212.5	149	117	107	93	74	57	44	27	39
1.580	70915	45.0	59467	32.5	2780	1.7	78.4	4233.7	81	66	61	58	50	40	33	27	38
1.620	40370	40.1	32517	33.0	2780	2.7	116.0	4205.5	119	90	81	73	58	45	38	27	39
1.660	97730	45.0	78717	33.0	2910	2.4	69.5	4247.9	72	58	55	51	46	36	31	27	39
1.700	37184	45.0	29950	33.0	2910	4.4	108.6	4226.7	112	90	80	62	52	42	34	27	39
1.740	51019	45.0	42783	32.5	2780	4.3	92.5	4212.5	95	77	65	59	52	43	39	27	38
1.780	46744	45.0	37650	33.0	2650	2.9	104.6	4233.7	108	81	76	65	54	45	37	27	39
1.820	65863	45.0	53050	33.0	2780	4.9	94.3	4219.6	97	69	63	54	51	41	36	27	39
1.860	35590	44.4	28667	33.0	2910	2.1	112.3	4163.1	114	85	69	64	52	42	32	27	39
1.900	16471	45.0	13267	33.0	2780	7.1	180.3	4184.3	184	123	93	68	52	45	38	27	39
1.940	43557	38.8	35083	33.0	3170	2.0	103.7	4191.3	106	83	73	63	50	39	31	27	39
1.980	24437	45.0	19683	33.0	2520	5.9	163.5	4212.5	168	98	81	79	64	49	40	27	39
2.020	38777	45.0	31233	33.0	2520	7.6	141.6	4170.1	144	88	79	62	58	49	43	27	39
2.060	97730	12.9	78717	33.0	4210	13.8	145.0	4156.0	147	126	100	70	44	25	12	27	39
2.100	99323	16.6	80000	33.0	2780	5.1	152.3	4198.4	156	140	123	85	65	41	32	27	39
2.140	35590	34.5	28667	33.0	2520	3.6	145.5	4170.1	148	120	101	84	62	50	38	27	39
2.180	35590	45.0	28667	33.0	2260	5.1	144.0	4099.4	144	96	81	75	63	55	43	27	39
2.220	21251	19.1	17117	33.0	4470	12.0	181.0	4191.3	185	117	94	66	42	24	12	27	39
2.260	24437	27.1	19683	33.0	2130	2.6	227.5	4127.7	229	176	142	119	85	59	40	27	39
2.300	40370	40.7	32517	33.0	2910	2.6	111.0	4212.5	114	87	78	64	54	43	34	27	39
2.340	16471	37.6	13267	33.0	2260	1.8	213.8	4141.9	216	153	123	97	74	56	39	27	39
2.380	62677	45.0	50483	33.0	2260	2.7	98.0	4226.7	101	77	75	70	61	47	40	27	39
2.420	37184	23.4	29950	33.0	2390	2.1	196.6	4170.1	200	157	133	104	75	53	37	27	39
2.460	33997	45.0	27383	33.0	2260	2.1	132.3	4184.3	135	103	90	76	67	52	41	27	39
2.500	14877	37.0	11983	33.0	2390	2.1	224.1	4134.8	226	143	120	93	70	52	40	27	39
2.540	45150	45.0	36367	33.0	2910	2.3	100.7	4233.7	104	77	68	61	51	42	34	27	39
2.580	18064	35.7	14550	33.0	2260	3.8	213.0	4177.2	217	145	126	97	67	55	41	27	39
2.620	29217	44.4	23533	33.0	2520	4.1	137.0	4219.6	141	111	83	76	63	48	40	27	39
2.660	48686	45.0	37650	33.5	2780	5.3	108.5	4233.7	112	76	71	59	50	44	36	27	40
2.700	45367	37.6	35083	33.5	3300	1.2	105.0	4254.9	109	84	74	63	50	38	29	27	40
2.740	45150	38.8	36367	33.0	3040	4.3	106.1	4212.5	109	86	81	61	49	41	31	27	39
2.780	38729	40.7	29950	33.5	3040	2.0	112.9	4212.5	116	89	77	64	52	41	31	27	40
2.820	48337	45.0	38933	33.0	3300	3.1	96.2	4219.6	99	69	62	53	45	37	29	27	39
2.860	26031	43.8	20967	33.0	2650	3.0	141.1	4184.3	144	108	92	74	59	47	36	27	39
2.900	42048	37.0	32517	33.5	2780	1.8	122.7	4177.2	125	97	86	72	58	45	34	27	40
2.940	52005	22.8	40217	33.5	2390	2.8	180.1	4212.5	185	147	129	99	72	52	39	27	40
3.020	40388	40.1	31233	33.5	2910	1.1	115.2	4233.7	119	89	80	68	54	43	32	27	40
3.060	25453	25.3	19683	33.5	2260	1.9	230.5	4198.4	236	175	144	110	79	56	39	27	40

FAIXA CENTRAL DA BR 290																	
km	E1 a 25oC (kgf/cm2)	h1 (cm)	E1 campo (kgf/cm2)	Trevest. (oC)	E2 campo (kgf/cm2)	Erro (%)	D0 a 40 kN	Carga (kgf)	D0 (micra)	D20 (micra)	D30 (micra)	D45 (micra)	D65 (micra)	D90 (micra)	D120 (micra)	Tar (oC)	Tsup (oC)
3.100	38729	22.2	29950	33.5	6420	14.2	104.5	4198.4	107	65	58	48	29	16	8	27	40
3.140	49795	32.7	27383	37.5	2520	1.4	155.6	4163.1	158	120	103	88	67	49	36	31	44
3.180	145477	22.2	80000	37.5	2130	4.3	143.0	4156.0	145	142	126	104	79	58	43	31	44
3.220	31126	25.9	17117	37.5	2390	3.3	232.0	4134.8	234	168	138	99	70	51	38	31	44
3.260	17123	27.7	9417	37.5	2260	3.4	299.9	4156.0	304	192	154	112	79	51	42	31	44
3.300	24124	12.3	13267	37.5	3950	23.8	252.6	4156.0	256	149	114	76	44	22	10	30	45
3.340	28792	45.0	15833	37.5	2260	4.9	214.7	4163.1	218	109	104	86	70	56	41	30	45
3.380	14152	45.0	8133	37.0	2780	4.2	253.6	4106.5	254	135	98	75	59	47	35	30	44
3.420	24124	45.0	13267	37.5	2650	4.1	208.9	4120.6	210	114	92	78	62	46	37	31	44
3.460	34983	44.4	18400	38.0	2390	2.3	163.6	4134.8	165	108	96	77	67	50	38	31	45
3.500	49795	45.0	27383	37.5	2520	7.1	159.3	4092.4	159	91	71	68	59	47	38	31	44
3.540	28792	45.0	15833	37.5	2260	6.4	251.0	4148.9	254	122	103	80	71	54	41	31	44
3.580	38127	45.0	20967	37.5	3040	7.0	170.7	4106.5	171	89	72	62	52	42	33	31	44
3.620	44742	19.1	23533	38.0	6550	11.7	121.9	4170.1	124	78	62	44	27	15	8	31	45
3.660	69142	45.0	36367	38.0	2780	5.8	124.7	4177.2	127	75	73	61	52	43	35	31	45
3.700	59382	45.0	31233	38.0	2650	3.7	135.4	4177.2	138	85	76	66	58	45	35	31	45
3.740	34983	25.9	18400	38.0	2650	2.6	209.0	4099.4	209	150	123	90	62	46	32	31	45
3.780	42302	45.0	22250	38.0	2910	2.6	129.3	4120.6	130	88	75	66	54	42	35	31	45
3.820	52062	45.0	27383	38.0	2390	8.0	184.5	4177.2	188	97	77	70	65	51	37	31	45
3.860	93541	14.8	49200	38.0	5250	12.9	128.2	4156.0	130	96	76	54	34	19	9	31	45
3.900	49622	45.0	26100	38.0	3430	5.9	105.7	4071.2	105	74	70	50	38	35	26	31	45
3.940	61822	45.0	32517	38.0	2910	3.1	103.9	4141.9	105	81	68	62	49	40	33	31	45
3.980	25223	41.3	13267	38.0	3300	5.5	168.6	4134.8	170	123	99	67	50	37	29	31	45
4.020	54502	16.0	28667	38.0	2780	2.2	235.2	4113.6	236	171	142	95	58	40	30	31	45
4.060	37423	20.3	19683	38.0	3300	1.3	203.6	4148.9	206	141	113	80	52	35	25	31	45
4.100	26458	32.1	14550	37.5	3300	3.9	181.5	4156.0	184	117	100	74	47	37	29	31	44
4.140	39862	22.8	20967	38.0	2130	1.4	251.3	4127.7	253	186	156	117	81	56	40	31	45
4.180	37423	25.9	19683	38.0	2000	2.5	244.5	4141.9	247	187	156	123	86	61	46	31	45
4.220	32543	27.1	17117	38.0	2000	3.6	250.0	4148.9	253	182	150	133	86	60	45	31	45
4.260	28935	25.3	14550	38.5	2000	3.7	280.6	4120.6	282	203	165	120	83	66	43	31	46
4.300	48972	27.1	23533	39.0	2390	4.5	196.0	4163.1	199	137	128	102	69	51	42	31	47
4.340	21278	41.9	10700	38.5	2520	2.0	217.3	4113.6	218	133	113	87	66	50	38	31	46
4.380	30103	20.3	15833	38.0	2000	2.4	314.7	4078.2	313	217	180	127	79	56	41	31	45
4.420	28792	29.6	15833	37.5	2260	3.4	228.6	4106.5	229	163	132	107	69	54	40	31	44
4.460	64262	18.5	33800	38.0	2260	1.8	233.8	4120.6	235	179	153	112	76	52	39	31	45
4.500	34983	32.1	18400	38.0	2520	2.7	189.0	4078.2	188	132	115	90	63	48	36	31	45
4.540	20343	11.1	10700	38.0	3040	26.8	338.3	4120.6	340	194	146	96	55	27	12	31	45
4.580	105741	16.0	55617	38.0	2390	3.7	212.5	4071.2	211	167	144	102	66	50	36	31	45
4.620	54456	38.8	27383	38.5	2390	1.0	141.3	4148.9	143	110	96	83	67	52	38	31	46

FAIXA CENTRAL DA BR 290																	
km	E1 a 25oC (kgf/cm2)	h1 (cm)	E1 campo (kgf/cm2)	Trevest. (oC)	E2 campo (kgf/cm2)	Erro (%)	D0 a 40 kN	Carga (kgf)	D0 (micra)	D20 (micra)	D30 (micra)	D45 (micra)	D65 (micra)	D90 (micra)	D120 (micra)	Tar (oC)	Tsup (oC)
4.660	47182	28.4	24817	38.0	2520	2.0	180.2	4163.1	183	141	118	95	71	48	35	31	45
4.700	52062	45.0	27383	38.0	3430	4.7	106.1	4134.8	107	74	69	52	44	35	30	31	45
4.740	30103	45.0	15833	38.0	2650	6.6	161.1	4148.9	163	116	103	75	53	46	37	31	45
4.780	27663	38.8	14550	38.0	2520	4.9	188.4	4134.8	190	126	114	87	58	49	39	31	45
4.860	32543	41.9	17117	38.0	2650	4.3	163.5	4163.1	166	129	105	78	62	48	35	31	45
4.900	54456	20.3	27383	38.5	2780	4.9	204.3	4134.8	206	153	125	101	67	42	25	31	46
4.940	64664	13.6	32517	38.5	2390	5.7	283.5	4106.5	284	204	161	115	69	42	27	31	46
4.980	56942	23.4	29950	38.0	2520	2.1	191.0	4057.0	189	137	125	95	68	47	30	31	45

FAIXA EXTERNA DA BR 290

km	E1 a 25oC (kgf/cm2)	h1 (cm)	E1 campo (kgf/cm2)	Trevest. (oC)	E2 campo (kgf/cm2)	Erro (%)	D0 a 40 kN	Carga (kgf)	D0 (micra)	D20 (micra)	D30 (micra)	D45 (micra)	D65 (micra)	D90 (micra)	D120 (micra)	Tar (oC)	Tsup (oC)
1.500	78489	22.8	80000	30.0	5640	10.2	71.2	4551.8	79	75	60	55	37	22	12	25	35
1.540	47012	28.4	47917	30.0	1870	1.8	167.1	4269.1	174	139	130	114	93	73	46	25	35
1.580	20570	35.7	20967	30.0	2260	2.2	179.2	4233.7	185	131	117	97	76	58	45	25	35
1.620	28125	40.1	28667	30.0	2390	2.1	135.8	4318.6	143	103	96	86	68	53	41	25	35
1.660	35680	35.1	36367	30.0	2390	3.4	133.3	4276.1	139	108	103	85	78	52	40	25	35
1.700	54566	22.8	55617	30.0	2260	2.9	165.5	4163.1	168	142	125	100	73	56	40	25	35
1.740	77620	24.0	76150	30.5	2260	5.9	140.0	4304.4	147	142	115	95	78	49	42	25	36
1.780	56690	32.1	55617	30.5	2260	3.3	123.3	4290.3	129	119	102	88	73	56	44	25	36
1.820	56690	22.8	55617	30.5	2130	2.9	172.7	4226.7	178	151	130	116	81	65	41	25	36
1.860	46225	32.7	45350	30.5	2390	3.5	127.9	4262.0	133	109	98	87	61	53	40	25	36
1.900	45325	20.3	42783	31.0	2650	0.6	180.2	4254.9	187	145	127	98	67	46	32	25	37
1.940	71079	8.6	69733	30.5	2910	25.5	262.8	4212.5	270	246	162	131	74	36	15	25	36
1.980	71079	11.7	69733	30.5	2130	2.9	276.8	4191.3	283	220	184	127	84	51	36	25	36
2.020	83394	16.6	78717	31.0	2260	2.3	192.1	4269.1	200	170	145	116	82	56	41	25	37
2.060	81544	8.6	80000	30.5	2000	6.9	346.9	4184.3	354	273	219	148	86	50	37	25	36
2.100	72388	9.2	71017	30.5	2000	18.1	341.4	4191.3	349	286	238	170	98	51	26	25	36
2.140	81544	11.7	80000	30.5	2130	3.6	259.0	4226.7	267	216	189	132	89	54	38	25	36
2.180	84754	12.3	80000	31.0	2000	3.2	265.2	4205.5	272	221	182	135	83	55	42	25	37
2.220	83394	13.6	78717	31.0	2000	3.6	244.3	4212.5	251	206	181	133	90	56	37	25	37
2.260	80236	22.2	78717	30.5	2130	4.8	153.9	4262.0	160	145	125	112	75	60	46	25	36
2.300	77956	11.7	73583	31.0	2260	4.3	252.9	4198.4	259	208	173	127	80	49	33	25	37
2.340	82034	11.7	77433	31.0	2130	4.7	269.7	4226.7	278	217	184	132	81	49	34	25	37
2.380	76596	13.6	72300	31.0	2130	3.4	234.4	4198.4	240	199	169	128	88	55	35	25	37
2.420	84754	11.7	80000	31.0	2000	5.7	268.1	4205.5	275	238	186	151	98	58	38	25	37
2.460	82034	19.7	77433	31.0	2130	1.3	173.4	4184.3	177	152	134	111	84	60	39	25	37
2.500	82034	12.9	77433	31.0	2000	4.4	241.6	4191.3	247	212	184	137	88	57	46	25	37
2.540	83394	14.2	78717	31.0	2130	4.2	228.7	4141.9	231	189	161	122	87	60	33	25	37
2.580	61640	12.9	58183	31.0	1870	1.3	299.5	4134.8	302	234	199	141	94	61	43	25	37
2.620	61640	29.0	58183	31.0	2390	3.2	126.7	4205.5	130	113	100	86	68	54	42	25	37
2.660	83885	16.6	76150	31.5	4600	11.4	113.3	4233.7	117	97	74	66	42	24	12	25	38
2.700	45325	38.2	42783	31.0	2390	1.4	114.6	4184.3	117	95	83	77	65	50	38	25	37
2.740	64360	16.0	60750	31.0	3820	12.4	145.7	4219.6	150	114	97	85	52	29	14	25	37
2.780	58439	40.1	53050	31.5	2130	4.6	107.7	4262.0	112	111	86	82	68	54	45	25	38
2.820	50764	30.2	47917	31.0	3170	1.0	110.0	4247.9	114	92	81	70	56	40	28	25	37
2.860	72517	24.7	68450	31.0	2260	4.3	142.1	4240.8	147	134	105	99	77	54	42	25	37
2.900	42606	37.6	40217	31.0	2390	2.7	118.9	4240.8	123	103	94	80	66	52	41	25	37
2.940	86713	27.7	78717	31.5	2130	3.4	117.6	4254.9	122	120	108	94	76	58	43	26	37
2.980	58439	17.9	53050	31.5	4600	12.1	121.8	4240.8	126	98	73	67	43	24	12	25	38
3.020	88127	28.4	80000	31.5	2260	1.3	117.4	4262.0	122	104	98	88	74	55	42	26	37
3.060	85299	17.9	77433	31.5	2130	2.3	179.1	4212.5	184	161	144	118	88	58	41	26	37
3.100	47555	22.8	41500	32.0	2390	3.2	178.1	4212.5	183	161	127	99	76	54	35	26	38
3.140	110566	12.9	78717	34.5	2260	3.7	236.0	4170.1	240	196	168	112	75	53	39	28	41
3.180	79922	17.9	56900	34.5	2000	2.3	220.6	4219.6	227	183	161	128	94	60	45	28	41

FAIXA EXTERNA DA BR 290																	
km	E1 a 25oC (kgf/cm2)	h1 (cm)	E1 campo (kgf/cm2)	Trevest. (oC)	E2 campo (kgf/cm2)	Erro (%)	D0 a 40 kN	Carga (kgf)	D0 (micra)	D20 (micra)	D30 (micra)	D45 (micra)	D65 (micra)	D90 (micra)	D120 (micra)	Tar (oC)	Tsup (oC)
3.220	49278	19.7	35083	34.5	2000	2.1	240.5	4177.2	245	192	165	129	92	62	45	28	41
3.260	34857	33.3	24817	34.5	2390	2.2	165.5	4212.5	170	130	112	92	71	52	39	28	41
3.300	47631	19.7	32517	35.0	2130	1.9	237.7	4191.3	243	186	152	118	83	56	38	28	42
3.340	113426	17.9	77433	35.0	2130	2.6	189.8	4212.5	195	164	143	117	83	56	43	28	42
3.380	66429	23.4	45350	35.0	2260	3.6	175.5	4205.5	180	144	129	99	72	56	41	28	42
3.420	49511	21.0	33800	35.0	2000	2.4	232.8	4191.3	238	184	153	127	88	58	43	28	42
3.460	112368	16.6	80000	34.5	2000	2.0	201.8	4064.1	200	185	152	122	87	60	40	28	41
3.500	18634	13.6	13267	34.5	3300	19.9	284.0	4071.2	282	170	132	90	54	28	13	28	41
3.540	51080	27.7	36367	34.5	2260	1.2	167.1	4170.1	170	134	120	99	76	56	40	28	41
3.580	96765	22.2	63317	35.5	2520	0.8	149.4	4170.1	152	128	112	94	70	49	34	29	42
3.620	49694	29.0	32517	35.5	2780	3.6	147.0	4156.0	149	114	101	80	58	45	35	29	42
3.660	102649	19.7	67167	35.5	2520	2.5	161.2	4170.1	164	137	121	96	68	50	36	29	42
3.700	28120	37.0	18400	35.5	2520	1.6	172.8	4057.0	171	116	103	84	69	49	34	29	42
3.740	86959	16.0	56900	35.5	2780	3.0	189.5	4198.4	194	150	142	95	59	42	30	29	42
3.780	122262	21.6	80000	35.5	2650	2.4	135.1	4219.6	139	121	109	87	67	47	35	29	42
3.820	51655	31.4	33800	35.5	2910	2.3	132.7	4233.7	137	106	96	78	57	44	32	29	42
3.860	57539	27.1	37650	35.5	2520	2.0	156.0	4205.5	160	125	111	97	66	51	35	29	42
3.900	120301	17.9	78717	35.5	2780	2.4	152.1	4177.2	155	136	115	87	65	43	29	29	42
3.940	59501	25.3	38933	35.5	3040	2.0	142.8	4219.6	147	116	100	78	58	41	30	29	42
3.980	75191	20.3	49200	35.5	2650	7.2	169.3	4141.9	171	139	120	83	56	52	32	29	42
4.020	114417	16.6	74867	35.5	2650	3.2	155.6	4163.1	158	145	125	94	64	44	31	29	42
4.060	96765	15.4	63317	35.5	2650	2.0	195.7	4127.7	197	156	134	97	67	44	28	29	42
4.100	65384	18.5	42783	35.5	2650	2.4	193.4	4134.8	195	147	136	93	67	44	30	29	42
4.140	106571	12.3	69733	35.5	2000	1.8	274.1	4113.6	275	220	182	134	87	55	39	29	42
4.180	119423	12.9	74867	36.0	1740	3.1	292.5	4148.9	296	242	201	151	105	63	44	29	43
4.220	45727	16.0	28667	36.0	2000	3.0	301.2	4057.0	298	221	186	128	81	60	43	29	43
4.260	127612	15.4	80000	36.0	1740	4.9	243.8	4035.8	240	238	178	138	112	71	46	29	43
4.300	103326	16.0	62033	36.5	2000	4.1	234.0	4099.4	234	188	135	126	89	59	39	29	44
4.340	132502	12.3	76150	37.0	2000	1.9	256.8	4134.8	259	217	182	132	87	56	40	30	44
4.380	122564	14.2	73583	36.5	1740	1.5	268.6	4120.6	270	223	192	148	104	70	48	30	43
4.420	34923	24.7	20967	36.5	2130	2.6	237.0	4099.4	237	176	147	117	81	59	43	30	43
4.460	98952	14.8	62033	36.0	2130	3.1	237.9	4050.0	235	187	163	112	77	56	39	30	42
4.500	127612	12.9	80000	36.0	2650	7.2	208.2	4156.0	211	182	140	92	72	43	39	30	42
4.540	111235	14.2	69733	36.0	2130	1.7	238.6	4141.9	241	195	163	125	86	56	37	30	42
4.580	123517	14.2	77433	36.0	2260	1.3	220.6	4163.1	224	181	154	112	77	52	37	30	42
4.620	127612	10.5	80000	36.0	1870	3.9	310.4	4134.8	313	250	207	153	93	57	41	30	42
4.660	120426	11.7	72300	36.5	3820	20.5	172.5	4184.3	176	169	131	89	53	28	13	30	43
4.700	37539	45.0	23533	36.0	3040	2.8	119.8	4106.5	120	88	78	62	49	39	30	30	42
4.740	52023	27.1	31233	36.5	2650	3.9	163.1	4148.9	165	135	110	85	68	43	33	29	44
4.780	68245	27.1	42783	36.0	2390	4.1	152.7	4163.1	155	117	115	95	68	53	42	29	43
4.820	139201	22.8	80000	37.0	2260	3.0	142.5	4141.9	144	128	114	96	76	56	44	30	44
4.860	81075	16.6	53050	35.5	2390	7.4	209.8	4064.1	208	155	141	110	87	40	32	29	42
4.900	36482	29.6	20967	37.0	3040	3.7	165.9	4127.7	167	119	104	74	53	42	28	30	44

FAIXA EXTERNA DA BR 290																	
km	E1 a 25oC (kgf/cm2)	h1 (cm)	E1 campo (kgf/cm2)	Trevest. (oC)	E2 campo (kgf/cm2)	Erro (%)	D0 a 40 kN	Carga (kgf)	D0 (micra)	D20 (micra)	D30 (micra)	D45 (micra)	D65 (micra)	D90 (micra)	D120 (micra)	Tar (oC)	Tsup (oC)
4.940	105705	10.5	60750	37.0	2260	9.9	297.0	4113.6	298	222	184	126	73	41	26	30	44
4.980	134735	11.7	77433	37.0	2130	7.2	266.9	4163.1	271	214	178	141	81	49	30	30	44

ANEXO 02

LABORATÓRIO DE MODELAGEM GEOLÓGICA E AMBIENTAL – MODELAGE
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO – LAPAV
FUNDAÇÃO LUIZ ENGLERT
Av. Osvaldo Aranha, 99 sala 509-B 90035-190 Porto Alegre (RS – Brasil)

**RELATÓRIO TÉCNICO DE
LEVANTAMENTO GEOFÍSICO (GEORRADAR)
PARA INVESTIGAÇÃO DE ESTRATIGRAFIA
DE PAVIMENTOS NA BR-290
(FREE-WAY)**

**AVALIAÇÃO DA ESTRATIGRAFIA
E ESTRUTURAÇÃO DO PAVIMENTO
NA RODOVIA BR-290
TRECHO Km01+500 ATÉ 86+000
(exceto segmentos com pavimento rígido)**

**EMPRESA SOLICITANTE:
CONCEPA S.A.**

FEVEREIRO, 2004

1. Avaliação da estratigrafia e das condições estruturais de pavimentos

A avaliação da estratigrafia e das condições estruturais dos pavimentos pode ser feita por meio de métodos diretos e indiretos. A avaliação por métodos indiretos (não invasivos, geofísicos) tem ganho grande aplicação, principalmente na Europa e nos EUA. Esse tipo de avaliação geofísica ganhou grande importância com o desenvolvimento de equipamentos designados de **ground penetrating radar** (GPR, **georradar**), uma vez que é de fácil aplicação e, caracterizada a assinatura estrutural, permite a visualização direta dos problemas estruturais.

O georradar, então, tem sido utilizado para obter imagens contínuas das estruturas dos pavimentos ao longo do eixo das rodovias, ou mesmo em seções transversais, conforme o caso em estudo. O georradar possibilita a identificação das camadas constitutivas dos pavimentos e a determinação de áreas críticas de degradação, sempre baseado no princípio de propagação de ondas eletromagnéticas (EM). Para o caso dos pavimentos, pequenos pulsos de energia EM são emitidos e captados por antenas que operam em altas frequências (800-1000 MHz); a onda EM é transmitida, penetra no pavimento e é refletida nas interfaces entre estruturas com diferentes propriedades elétricas. Assim, a onda EM percorre as estruturas dos pavimentos até encontrar uma descontinuidade dielétrica, como ocorre quando há mudança de material constitutivo, mudança nas características estruturais dos pavimentos (presença de vazios com ou sem água, etc...).

A análise dos perfis contínuos de georradar fornece os subsídios adequados para um melhor planejamento das investigações por métodos diretos; ou seja, **a avaliação pelos métodos indiretos (georradar) não dispensa a investigação pelos métodos diretos**. MAS, permite definir precisamente os locais a serem investigados diretamente e a extensão dos problemas estruturais dos pavimentos. A partir disso, é possível reduzir o tempo e os custos das investigações diretas, principalmente nos casos em que as empresas mantenham um cadastro (banco de dados) organizado dos levantamentos. Em tais situações, os levantamentos por georradar, ao fornecerem um imageamento contínuo das rodovias, permitem a avaliação do estado de conservação dos segmentos rodoviários por meio da comparação de imagens obtidas em datas muito distintas, ou sob condições de umidade muito distintas; conseqüentemente, permitem a identificação e a delimitação das causas estruturais para problemas de degradação dos pavimentos superiores.

A base metodológica para a aplicação do georradar nas condições brasileiras está amplamente discutida no seguinte artigo técnico:

Strieder, A. J., F. P. Gonçalves, P. Salvadoretti, J. A. P. Ceratti, S. L. Klein, and A. M. Hirakata. 1999. **Aplicação de geo-radar em investigações de pavimentos rodoviários: estudo de casos em estruturação estratigráfica e em degradação**. IN: Anais do 9 Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, São Pedro (SP), 1999, CD-ROM:1-13 São Paulo (SP): Associação Brasileira de Geologia de Engenharia.

2. Tipos de levantamentos geofísicos por georradar

Os levantamentos geofísicos por georradar em rodovias brasileiras foram iniciados pela atuação conjunta dos Laboratório de Modelagem Geológica e Ambiental (MODELAGEM) e Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Escola de engenharia (UFRGS) em 1997. O primeiro trabalho extensivo foi realizado na BR-101 (Torres a Osório)), sob a supervisão do

Eng. Schmidt (ENECON). O objetivo da investigação realizada era definir a estratigrafia do pavimento e individualizar segmentos homogêneos.

A partir desse trabalho pioneiro, vários outros trabalhos práticos foram realizados: Ponte Rio-Niterói, Via Dutra (Serra das Araras), Bandeirantes (São Paulo), BR-386 (Arroio Tatim – Tio Hugo), BR-020, BR-040, BR-070 e BR-251 (essas quatro a partir da divisa DF-GO). Porém, concomitante aos trabalhos práticos, vários ensaios foram realizados na Pista de Teste de Pavimentos do LAPAV (Campus do Vale da UFRGS) e em outros locais sob condições controladas. Desse acúmulo de conhecimentos práticos e experimentais resultou o estabelecimento de dois tipos distintos de levantamentos geofísicos por georradar em rodovias:

- 1) **imageamento estratigráfico**: consiste no levantamento geofísico para caracterização da estrutura estratigráfica dos pavimentos até uma profundidade de 0,90 m (essa profundidade de investigação está para se ampliada a partir da introdução do imageamento multi-canal). Essa técnica de imageamento utiliza um espaçamento de 2,0 – 2,5 metros entre as amostras de traços de ondas EM. As imagens de georradar obtidas a partir dessa técnica permitem traçar a continuidade lateral dos horizontes estratigráficos constitutivos, avaliar a regularidade de sua estrutura quanto à espessura e definir segmentos homogêneos (portadores de estrutura estratigráfica semelhante). Esse tipo de levantamento pode ser realizado a velocidades de até 50-60 km/h;
- 2) **imageamento estrutural**: consiste num levantamento geofísico detalhado dos pavimentos rodoviários, com o objetivo de investigar problemas estruturais profundos que causam a contínua degradação dos horizontes superiores (pavimento flexível e/ou rígidos). Aqui também cabe ressaltar a melhoria de imageamento que será ofertada com a introdução do imageamento multi-canal. Essa técnica foi especialmente desenvolvida pelos laboratórios da UFRGS (MODELAGE e LAPAV) para avaliar problemas estruturais de rodovias em condições de clima equatorial e tropical, como é o caso do Brasil. A amostragem de traços de ondas EM para o imageamento estrutural é feita em intervalos de 0,8 – 1,0 m. Esse tipo de levantamento pode ser realizado a velocidades de 20 km/h, no máximo.

Os diferentes tipos de imageamentos empregados satisfazem as condições de resolução espacial necessárias à técnica geofísica do georradar. Essa resolução espacial pode ser tratada sob dois enfoques distintos: resolução vertical e resolução lateral. A resolução vertical está ligada ao comprimento de onda EM (função da frequência) e, dado o suficiente contraste de propriedades elétricas dos meios constitutivos, é de aproximadamente $\frac{1}{4}\lambda$; no caso da frequência de 1000 MHz utilizada nesse levantamento, significa que materiais com espessura maiores do que 2,5 cm podem ser distinguidos se possuírem suficiente contraste de constante dielétrica. A resolução lateral, por outro lado, está relacionada com a amostragem das ondas EM num caminhar lateral (seção geofísica) e com a organização estrutural dos objetos que estão sendo imageados; em termos gerais, para garantir a identificação e a interpretação (causa) é necessário que haja continuidade lateral da feição numa imagem geofísica (efeito) diante dos vários fenômenos de propagação de ondas. Para o caso geral, é necessário que a amostragem mínima seja $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{5}$ do tamanho lateral do objeto, dado o suficiente contraste de propriedades elétricas entre eles.

O imageamento estratigráfico foi desenvolvido basicamente para gerenciamento e planejamento das intervenções mais usuais nas rodovias, pois garante a continuidade lateral (resolução) para visualização e definição direta da espessura e da organização estrutural das unidades estratigráficas constitutivas. Pode, portanto, ser realizado em toda a extensão de uma rodovia em substituição parcial aos ensaios de sondagens diretas e como elemento

fundamental para os projetos de restauração dos horizontes superiores. Assim, o imageamento estratigráfico deve ser usado juntamente com os ensaios de FWD e LVD.

O imageamento estrutural, por outro lado, deve ser executado em segmentos que continuamente apresentam problemas de deterioração dos pavimentos superiores, de tal forma que os engenheiros responsáveis antevejam causas mais profundas para esses problemas (infiltração de água, zonas de vazios, etc...). Assim, o imageamento estrutural é realizado em trechos curtos 10-30 km de extensão, para circunscrever os segmentos com tais problemas e auxiliar na identificação de suas causas. A amostragem lateral mais densa, conforme descrito acima, garante a continuidade lateral necessária para a identificação das estruturas relacionadas à deterioração dos pavimentos.

Em qualquer desses casos, algumas investigações diretas são sempre necessárias, como forma de ajustar as interpretações oferecidas pelo georradar (calibrar as velocidades de propagação das ondas EM na determinação das espessuras, por exemplo).

3. Propósito da investigação

O levantamento geofísico por georradar na Rodovia BR-290 (Free Way) teve o objetivo de investigar a estratigrafia e a organização estrutural dos pavimentos ao longo do trecho compreendido entre os km 01+500 e o km 86+000 (exceto os segmentos com revestimento superior de pavimento rígido); foram executados levantamentos geofísicos por georradar na faixa externa e na faixa central da Pista Norte, conforme mostrado na figura 1 abaixo. A extensão total de levantamento geofísico, computadas as duas faixas de rolamento, foi de 136,20 km.

4. Características gerais do pavimento sob investigação

A estratigrafia dos pavimentos da BR-290 (Free Way) no trecho investigado é bem variada, conforme pode ser visto na figura 2 abaixo. A variação da estrutura estratigráfica ao longo de todos os segmentos geofísicos é mais complexa na faixa externa. Os radargramas interpretados em anexo mostram perfeitamente bem tal complexidade e permitem delinear todos a extensão de cada estrutura estratigráfica.

As sondagens realizadas correspondem bem aos limites geofísicos identificados e servem de instrumento para a retro-análise de segmentos bastante característicos. Contudo, muitos outros segmentos foram identificados sem que haja informações diretas. Quaisquer dos segmentos identificados possuem extensão variada. Em alguns casos, as extensões são pequenas e podem constituir material de preenchimento distinto dos materiais longitudinalmente dispostos. Maiores detalhes estão descritos e analisados adiante (item 7).

5. Descrição do levantamento de georradar em pista

Os perfis de georradar foram realizados no sentido decrescente (Pista Norte), desde o Km 01+500 até o Km 86+000 (os segmentos com pavimento rígido superior foram imageados, mas não interpretados). O início do levantamento ocorreu antes do ponto indicado para avaliar a continuidade das estruturas estratigráficas locais. Conforme instruções recebidas da equipe de engenharia da CONCEPA S.A., o levantamento foi realizado sobre diferentes trilhos de rodagem, conforme mostrado na figura 1.

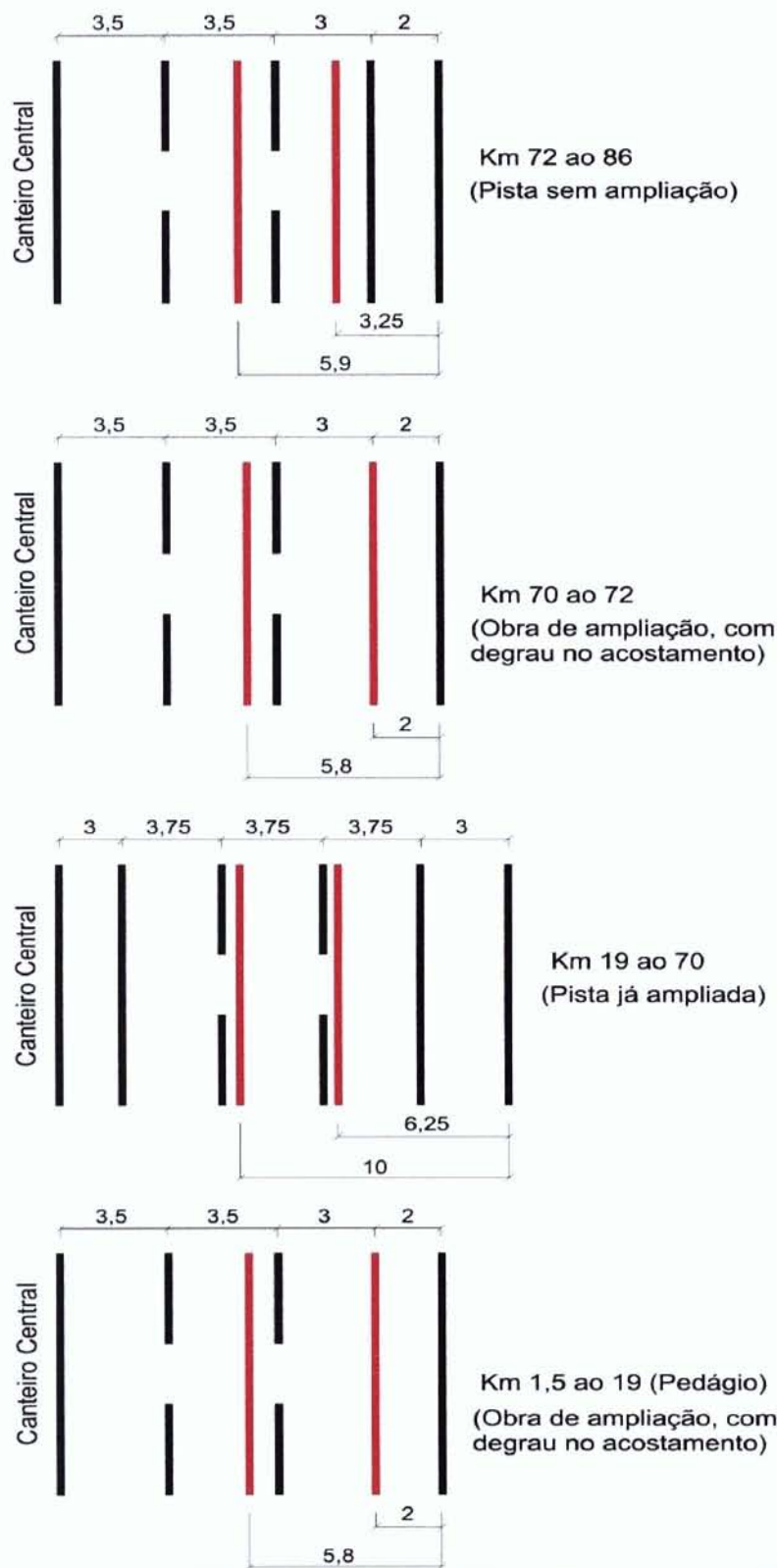


Figura 1 – Esboço da localização dos perfis geofísicos (vista em planta) conforme demarcação fornecida pela CONCEPA S.A. As linhas em vermelho indicam a posição do levantamento geofísico por georradar.



Figura 2A – Legenda descritiva dos materiais constitutivos dos pavimentos na faixa externa da BR-290 (Free Way), trecho sob concessão da CONCEPA S.A.

Figura 2B – Legenda descritiva dos materiais constitutivos dos pavimentos na faixa central da BR-290 (Free Way), trecho sob concessão da CONCEPA S.A.

O levantamento foi realizado com o equipamento RAMAC, produzido pela MALA Geoscience Inc. (Suécia) e analisados previamente no *software* que acompanha o equipamento (GPR, versão 2.28). A antena utilizada para investigação foi de 1000 MHz, acoplada ao terreno (*ground coupled*).

Deve-se destacar, no entanto, algumas pequenas discrepâncias de odômetro quando convertidos para quilometragem da rodovia; essas discrepâncias ocorrem por conta do ajuste do odômetro (inferior a 10 m) e por conta das diferenças locais de perímetro interno e externo nas curvas da rodovia.

A estimativa da velocidade de propagação das ondas EM nos principais horizontes elétricos foi tomada de vários ensaios já realizados pela equipe do MODELAGE (BR-101, Pista de Teste de Pavimentos – UFRGS, Ponte Rio-Niterói, Rodovia Presidente Dutra), os quais apresentaram diferenças não significativas para determinação de espessura das camadas constituintes dos pavimetnos (0,5 cm/ns). As velocidades estimadas em cada interface elétrica foram:

- CBUQ: 11 cm/ns;
- Base: 09 cm/ns

A velocidade média para conversão tempo-profundidade nesse levantamento geofísico foi aferida com as sondagens diretas, cujos relatórios foram fornecidos pela CONCEPA S.A. Essa velocidade média foi de 95 m/μs.

Os dados do levantamento de pista foram posteriormente corrigidos com relação a problemas de *drift*, ruídos, filtrados e invertidos no *software* Gradix. Esses dados foram cortados em intervalos de aproximadamente 750 m para pós-processamento em aplicativo tipo Corel Draw. A lista dos arquivos de cada perfil está apresentada na tabela 1, com as respectivas distâncias.

6. Observações gerais dos dados e do seu processamento

Os perfis de georradar executados em ambas as rodovias mostraram baixa interferência de ondas superficiais. Num gráfico frequência vs. amplitude (espectro de frequência), pode-se observar quase somente o pico central da frequência de 1000 MHz. Dessa forma, o processamento dos dados foi facilitado e conduzido com os seguintes passos:

- remoção de *drift* por problemas de aquisição,
- ajuste de tempo zero (início da onda EM no pavimento),
- *dewow* (filtro passa alta) para remoção de baixíssimas frequências (< 230 MHz),
- filtragem *butterworth* para ressaltar a frequência de interesse (F1 = 900 MHz e F2 = 1100 MHz),
- migração para correção da posição e da estrutura dos refletores (parâmetros definidos pelas estimativas de velocidade),
- conversão tempo x profundidade a uma velocidade constante de 9,5 cm/ns.

Tabela 1 – Relação dos radargramas interpretados e os seus respectivos intervalos de distância (BR-290 Free Way, trecho km 01+500 até km 86+000 sob concessão da CONCEPA S.A.).

FAIXA EXTERNA		
PERFIL	INICIO	FINAL
2901-11	1.250	2.260
2901-12	2.240	3.260
2901-13	3.240	4.260
2901-14	4.240	5.250
2901-21	5.250	6.260
2901-22	6.230	7.260
2901-23	7.230	8.260
2901-24	8.240	9.260
2901-25	9.240	10.260
2901-26	10.240	11.260
2901-27	11.230	12.260
2901-28	12.230	13.260
2901-29	13.230	14.260
2901-210	14.230	14.570
2901-31	14.570	15.600
2901-32	15.570	16.620
2901-33	16.590	17.640
2901-34	17.610	19.200
2901-41	19.200	20.220
2901-42	20.200	21.230
2901-43	21.200	22.240
2901-44	22.210	23.210
2901-45	25.760	26.780
2901-46	26.640	27.000
2901-51	27.000	28.020
2901-52	28.000	29.030
2901-53	29.010	30.040
2901-54	30.010	31.050
2901-55	31.020	32.060
2901-56	31.920	32.380
2901-61	39.700	40.730
2901-62	40.700	41.740
2901-63	41.710	42.750
2901-64	42.720	43.750
2901-65	43.730	44.760
2901-66	44.740	45.770
2901-67	45.630	46.000
2901-71	46.000	47.020
2901-72	47.000	48.030

2901-81	54.470	55.490
2901-82	55.470	56.500
2901-83	56.470	57.490
2901-84	57.480	58.230
2901-91	58.650	59.670
2901-92	59.640	60.680
2901-93	60.650	61.680
2901-94	61.650	62.680
2901-95	62.660	63.690
2901-96	63.660	64.690
2901-97	64.670	65.000
2901-101	65.000	66.020
2901-102	65.990	67.020
2901-103	67.000	68.030
2901-104	68.000	69.030
2901-105	69.020	70.040
2901-111	70.080	71.120
2901-112	71.090	72.130
2901-113	72.100	73.140
2901-114	73.110	74.150
2901-115	74.120	75.160
2901-116	75.130	76.170
2901-117	76.140	77.170
2901-118	77.090	77.380
2901-121	77.370	78.400
2901-122	78.370	79.410
2901-123	79.380	80.420
2901-124	80.390	81.430
2901-125	81.400	82.440
2901-126	82.410	83.450
2901-127	83.420	84.460
2901-128	84.430	85.470
2901-129	85.440	86.050

FAIXA CENTRAL		
PERFIL	INICIO	FINAL
2902-11	1320	2340
2902-12	2310	3340
2902-13	3320	4350
2902-14	4330	5360
2902-15	5340	6370
2902-16	6340	7010
2902-21	7010	8040
2902-22	8020	9060
2902-23	9040	10080
2902-24	10060	11100
2902-25	11080	12120
2902-26	12100	13140
2902-27	13120	14160
2902-28	14140	15100
2902-31	15100	16090
2902-32	16070	17080
2902-33	17050	18060
2902-34	18040	19050
2902-35	18910	19210
2902-41	19200	20220
2902-42	20200	21230
2902-43	21200	22240
2902-44	22210	23230
2902-45	25750	26770
2902-46	26760	28000
2902-51	28000	29020
2902-52	28990	30030
2902-53	30000	31040
2902-54	31010	32040
2902-55	32020	32400
2902-61	39650	40680
2902-62	40650	41680
2902-63	41660	42690
2902-64	42660	43700
2902-65	43670	44000
2902-71	44000	45020
2902-72	45000	46030
2902-73	46000	47040
2902-74	47020	48050
2902-81	54530	55540
2902-82	56520	57540
2902-83	57520	58540
2902-84	58520	59540
2902-85	59520	60540
2902-86	60520	61000

2902-91	61.000	62.020
2902-92	62.000	63.030
2902-93	63.000	64.040
2902-94	64.010	65.040
2902-95	65.020	66.050
2902-96	66.030	67.060
2902-97	67.030	68.070
2902-98	68.040	69.080
2902-99	69.050	70.080
2902-910	69.940	70.100
2902-101	70.110	71.130
2902-102	71.100	72.130
2902-103	72.100	73.140
2902-104	73.110	74.140
2902-105	74.110	75.140
2902-106	75.120	76.150
2902-107	76.120	77.150
2902-108	77.130	77.400
2902-111	77.400	78.420
2902-112	78.390	79.420
2902-113	79.400	80.430
2902-114	80.400	81.440
2902-115	81.410	82.450
2902-116	82.420	83.450
2902-117	83.430	84.460
2902-118	84.440	85.470
2902-119	85.440	86.050

7. Análise da estratigrafia dos pavimentos

A estratigrafia e a estruturação estratigráfica dos pavimentos é definida por meio de camadas geofisicamente refletoras, que são reconhecíveis principalmente:

- i) pelas mudanças de comprimento de onda,
- ii) pela amplitude do sinal de retorno e
- iii) pelo truncamento de linhas de propagação das ondas EM (Fig. 3).

A apresentação dos perfis onde a amplitude do sinal está em escala de colorida possibilitou uma definição mais apurada das interfaces refletoras, conforme se poderá verificar nos radargramas anexos.

Para fins de interpretação, é importante salientar que geofisicamente duas camadas (horizontes) podem apresentar a mesma resposta (não serem discerníveis/individualizáveis por um método geofísico) quando possuem as mesmas propriedades físicas, ou o produto de determinadas propriedades físicas; no caso do georradar, importa falar de impedância “eletromagnética”, que é o produto complexo principalmente da permissividade elétrica e da permeabilidade magnética dos materiais constitutivos dos horizontes.

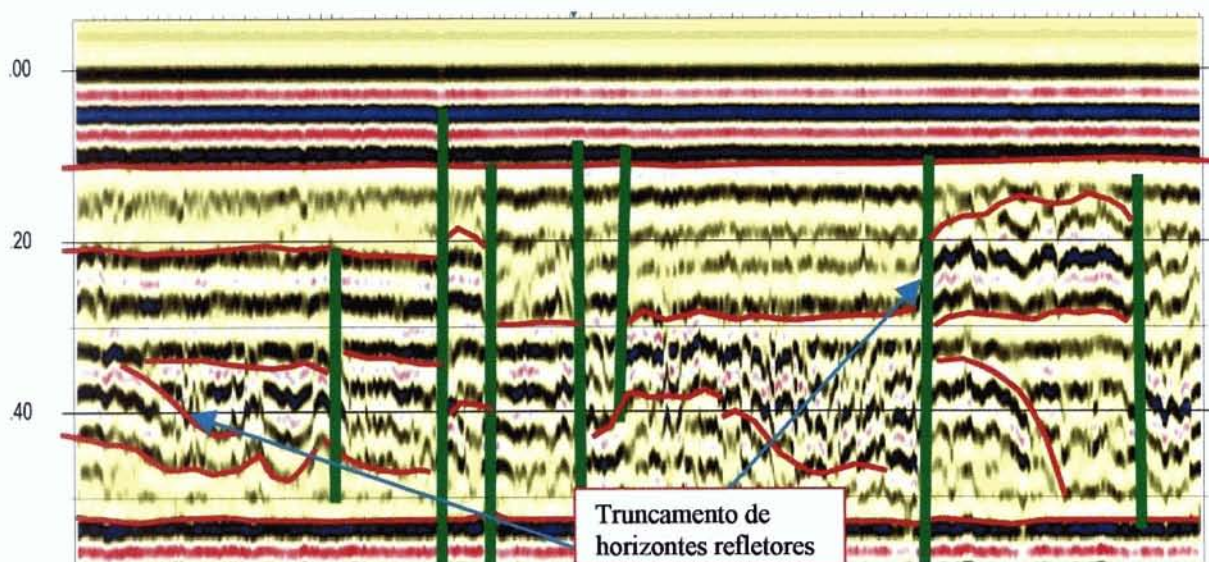


Figura 3 – Radargrama que expressa os principais elementos para interpretação das interfaces refletoras identificados nas seções geofísicas levantadas na BR-290, trecho entre o km 01+500 e o km 86+000.

Os radargramas em cores representam a justaposição lateral dos diversos pulsos amostrados (intervalo de amostragem de 2,5 m nesse caso). Os pulsos EM individuais recebidos durante a propagação das ondas em subsolo apresentam características de amplitude (cor) e comprimento de onda de acordo com a impedância eletromagnética de cada material atravessado. Nesse sentido, pode-se aproximar as propriedades físicas dos materiais de acordo com tais elementos. Por exemplo: a amplitude do traço de onda EM refletida é preenchida numa escala de cores interpolada entre os picos máximos e mínimos (Figura 4); materiais resistivos mostram grande amplitude (baixa atenuação) e pequeno comprimento de onda, enquanto que materiais condutivos mostram pequena amplitude e comprimento de onda

grande. A partir dessas características, é possível avaliar as condições gerais dos materiais constitutivos dos pavimentos, conforme se verá adiante.

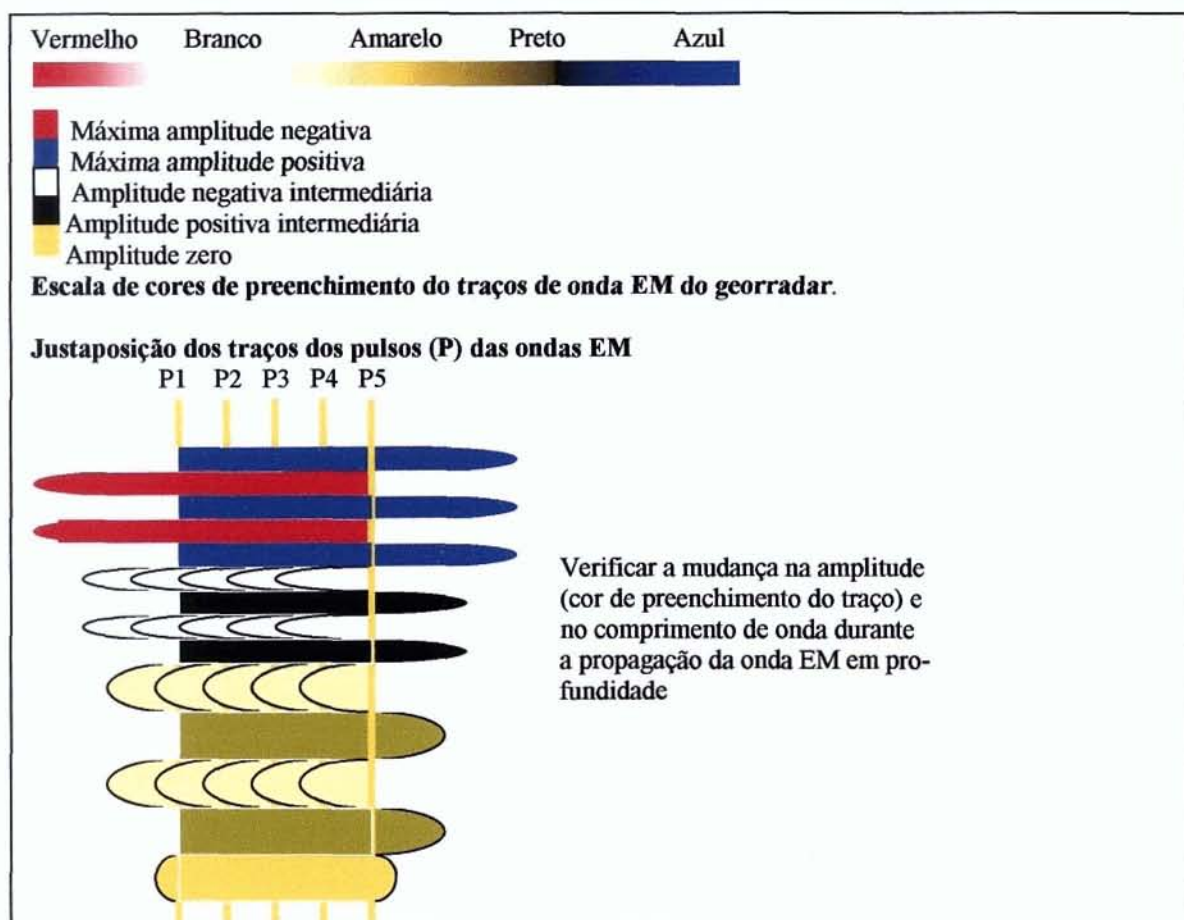


Figura 4 – Visualização do traço da onda EM que se propaga nos materiais rochosos constitutivos dos pavimentos.

A estratigrafia dos pavimentos na BR-290 (Free Way), no intervalo entre o km 01+500 e o km 86+000, é bastante variável, como foi mostrado na figura 2 anterior. A profundidade de investigação do georradar para o levantamento objeto desse Relatório Técnico está situada entre 0,85 e 0,90 m, o que permite definir as várias interfaces entre camadas geofisicamente distintas. Em termos gerais, pode-se identificar um máximo de 08 camadas geofisicamente distintas na faixa externa e 07 camadas geofísicas na faixa central. Porém, em vários locais, como se poderá verificar ao longo de todas as seções geofísicas anexas, o número de camadas geofisicamente distinguidas é menor. Essa variação no número de camadas geofisicamente distinguidas reflete tanto a presença de diferentes materiais constitutivos dos pavimentos, quanto condições de disposição dos materiais, ou características específicas internas de cada material (por exemplo: percentagem de vazios, diferentes preenchimentos por finos, diferentes saturação de água, etc...). Um perfil geofísico característico está apresentado na figura 5 abaixo, para demonstrar os critérios de interpretação e distinção das unidades geofísicas.

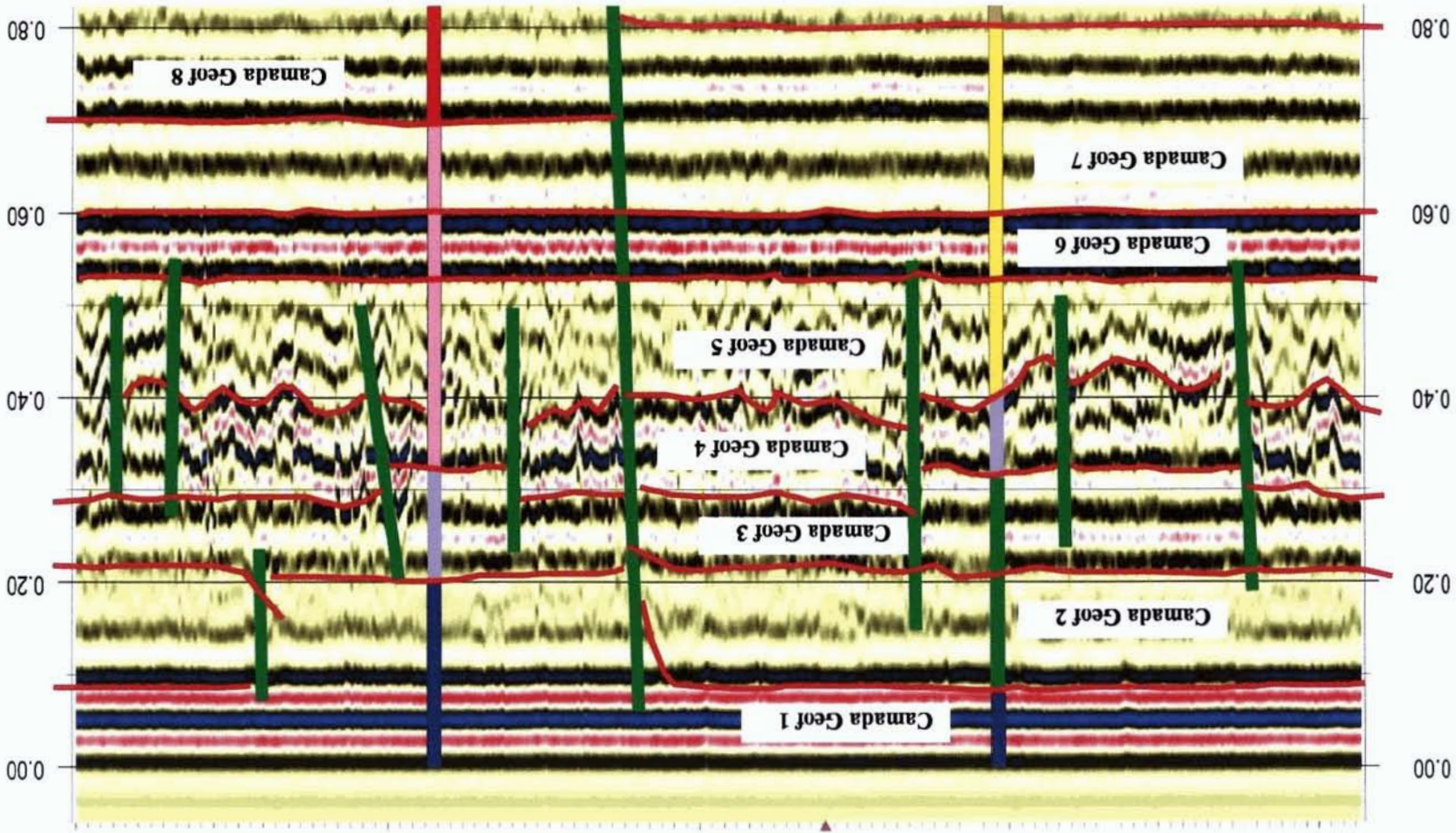


Figura 5A – Radargrama interpretado da faixa externa da BR-290 (Free Way, trecho km 01+500 até km 86+000) mostrando as interfaces refletoras e as camadas geofísicas identificadas.

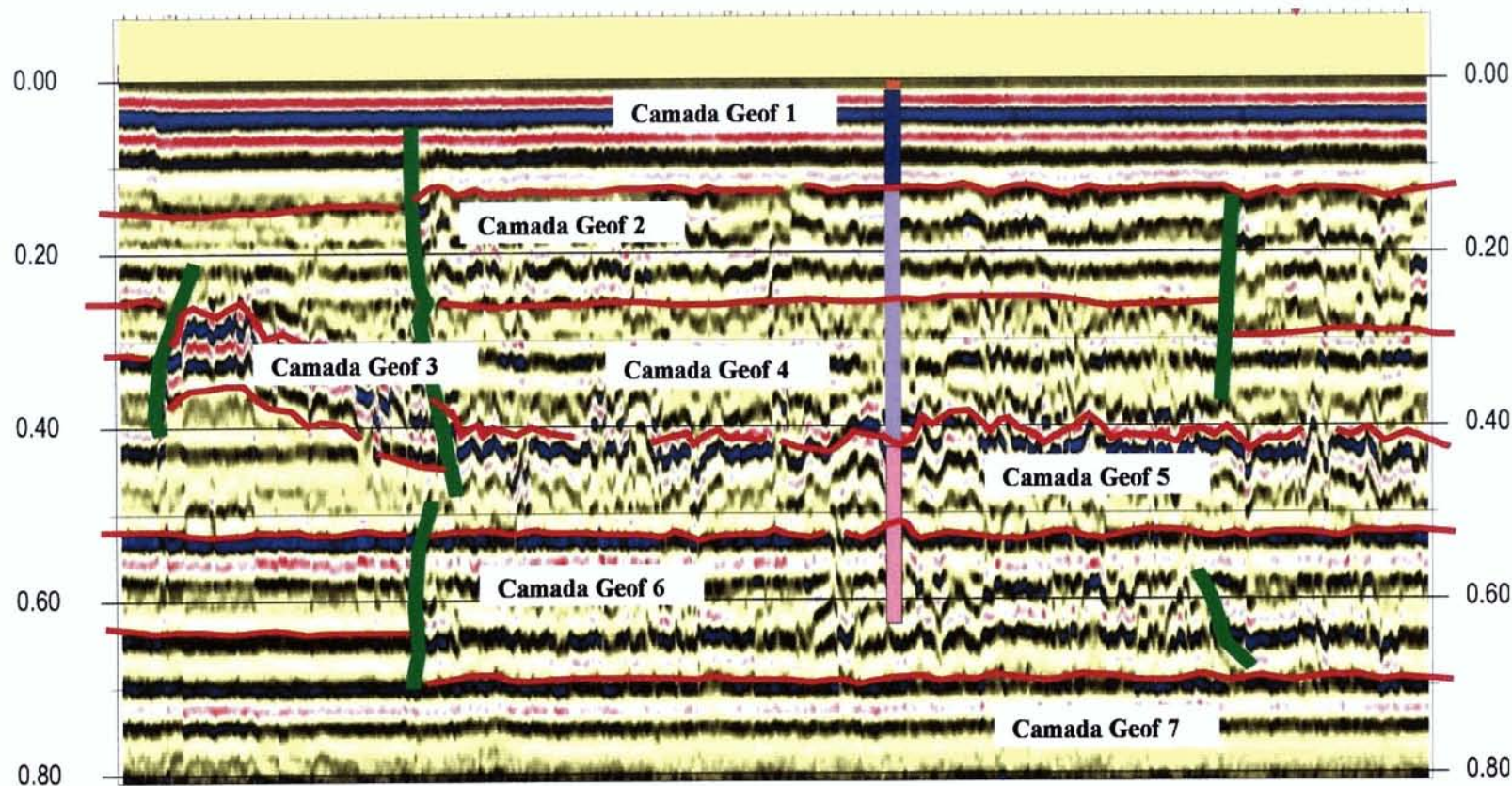


Figura 5B – Radargrama interpretado da faixa central da BR-290 (Free Way, trecho km 01+500 até km 86+000) mostrando as interfaces refletoras e as camadas geofísicas identificadas.

Figura 5 – Radargrama da BR-290 (Free Way, trecho sob concessão da CONCEPA S.A.) caracterizando as diferentes camadas refletoras individualizadas geofisicamente. As linhas horizontais em vermelho marcam os limites das camadas geofísicas. As linhas verticais em verde marcam os limites de segmentos com diferente estruturação estratigráfica.

A primeira camada geofísica (até aproximadamente 15-17 cm de profundidade) está a representar o revestimento de concreto asfáltico superior. Em algumas locais, como demonstram os perfis de sondagens fornecidos pela CONCEPA S.A., essa camada geofísica é representada por duas ou três camadas de revestimento asfáltico diferentes, mas que não alcançam distinção de propriedades físicas para serem detectadas pelo georradar na configuração adotada nesse levantamento. Essa primeira camada geofísica possui um comportamento regular do ponto de vista das características da onda EM refletida: grande amplitude e comprimento de onda curto. A espessura dessa camada geofísica varia entre 9 e 15 cm, tanto na faixa externa, quanto na faixa central; porém, essa espessura deve ser tomada pontualmente ao longo da distância do levantamento para uma qualificação mais precisa. A porção mais inferior dessa camada geofísica normalmente apresenta uma diminuição de amplitude da onda EM; tal efeito pode ser o reflexo da degradação do pavimento asfáltico basal, ou uma maior umidade do material constitutivo.

A segunda camada geofísica da figura 5 apresenta uma acentuada diminuição na amplitude da onda EM, bem como um aumento no seu comprimento de onda. Essas características refletem condições de maior condutividade do material constitutivo, o que pode ser causado pela maior umidade do material, e/ou pela maior degradação intempérica em relação aos materiais que constituem a camada geofísica superior. A espessura dessa camada geofísica varia entre 10 e 20 cm, conforme a faixa de rolamento considerada e conforme a localização nas seções longitudinais.

A terceira camada geofísica apresenta características distintas conforme a faixa de rolamento considerada. Na faixa externa, mostra amplitude média, comprimento de onda maior do que a primeira camada geofísica e uma espessura variável entre 9 e 20 cm; além disso, apresenta um comportamento regular a levemente ondulado. Na faixa central, por outro lado, a amplitude do sinal é maior e o comprimento de onda é menor, o que reflete materiais mais resistivos (saibro de granito, por exemplo); a espessura está situada entre 7 e 12 cm e apresenta um aspecto muito ondulado, que, por vezes, torna difícil determinar exatamente o interface refletor (limite de camadas).

A quarta camada geofísica apresenta características aproximadamente semelhantes em ambas as faixas de rolamento. A amplitude do sinal é média e o comprimento de onda aproximadamente igual àquele da segunda camada geofísica (na faixa central, é um pouco menor). A espessura dessa camada geofísica está entre 9 e 15 cm na faixa externa e entre 15 e 20 cm na faixa central. A quinta camada geofísica mostra uma diminuição sensível na amplitude do sinal EM (menor resistividade do que a quarta camada geofísica) e uma espessura que varia entre 10 e 20 cm na faixa externa e entre 10 e 15 cm na faixa central. A característica marcante dessas duas camadas geofísicas é o comportamento fortemente ondulado do sinal EM, que, em algumas situações, torna difícil a tarefa de determinar os limites das camadas (interfaces refletores). Essas características do sinal EM de retorno podem sugerir materiais constitutivos fortemente heterogêneos.

A sexta camada geofísica apresenta uma amplitude e um comprimento de onda maiores do que as camadas anteriores. A espessura varia entre 7 e 10 cm na faixa externa e entre 10 e 18 cm na faixa central. Por outro lado, na faixa externa, essa camada geofísica apresenta-se muito regular, enquanto, na faixa central, freqüentemente mostra segmentos bastante ondulados com relação ao comportamento do sinal EM de retorno.

A sétima e a oitava camadas geofísicas apresentam uma pequena amplitude para a onda EM e um aspecto bastante irregular no seu comportamento lateral. Na faixa externa, a sétima camada mostra uma espessura entre 15-20 cm; a sétima camada da faixa central e a

oitava camada da faixa externa, por constituírem a última camada geofísica, não têm sua espessura determinada.

As quebras de estruturação estratigráfica (linhas verdes verticilizadas) delimitam segmentos particulares de estruturação estratigráfica ao longo de todo o trecho investigado. Essas quebras de estruturação estratigráfica, em sua maioria, parecem prolongar-se em profundidade atravessando várias camadas geofísicas. Em outras situações, as quebras de estruturação estratigráfica estão restritas a uma ou duas camadas geofísicas interpretadas.

8. Considerações finais

A estruturação estratigráfica dos pavimentos investigados no trecho de investigado da BR-290 (Free Way, km 01+500 a km 86+000, exceto segmentos com pavimento rígido superficial) é muito variável e marcada por várias linhas de quebra de estruturação (segmentos construtivos!). A estratigrafia demarcada pelo levantamento geofísico por georradar também se apresenta muito variável e sofre influência de diferentes tipos de materiais constitutivos, de diferentes graus de umidade dos materiais, ou de diferentes graus de deterioração dos materiais constitutivos.

O fato de terem sido interpretadas diferentes camadas geofísicas dentro de uma mesma estratigrafia balizada por sondagens direta (exemplos da figura 5) é decorrência dos fatores enumerados acima, que influenciam na propagação da onda EM e, portanto, na definição das características do sinal de retorno. Assim, o fato da quarta e quinta geofísicas individualizadas na figura 5 (por exemplo) representarem o mesmo material constitutivo (conforme demonstram as sondagens diretas em várias posições ao longo do trecho investigado) pode estar relacionado com as situações enumeradas. Contudo, chama a atenção uma certa regularidade de espessura dessas camadas geofísicas, que está situada em intervalos de 10, 15 ou 20 centímetros aproximadamente. Conforme discussão com o Prof. Jorge A. P. Ceratti (LAPAV – DECIV – EE – UFRGS), essas espessuras correspondem normalmente às espessuras de compactação dos materiais utilizados em rodovias. Nesse aspecto, a individualização de diferentes camadas geofísicas dentro de uma mesma unidade de material constitutivo (conforme definido pela sondagem) pode representar diferentes graus de compactação desse material. Diferentes graus de compactação implicam diferente quantidade de vazios, que, por sua vez, podem estar em diferentes estados de umidade. Essa característica é particularmente bem capturada pelo georradar, uma vez que a onda EM é fortemente afetada pela umidade em sua propagação no subsolo.

As linhas de quebra de estruturação estratigráfica marcam segmentos construtivos bastante distintos e particulares. Em termos gerais, a grande maioria delas está restrita ao intervalo entre 10-15 cm até 40-50 cm de profundidade, onde são perfeitamente distinguíveis. A partir dos 50 cm de profundidade, essas linhas de quebra de estruturação estratigráfica são raramente individualizadas.

É importante notar que, a partir da profundidade de 50 a 60 cm, há uma regularidade no desenvolvimento dos traços das ondas EM recebidas. Essa regularidade, em muitas ocasiões, não permite uma perfeita identificação do limite de unidades estratigráficas. Tal situação pode ser relacionada com o fato discutido acima: matérias semelhantes (saibro rosa, saibro amarelo, argila marrom, etc... de diferentes fontes), compactados diferentemente e com graus de umidade parecidos. Nessa situação, o elemento mais importante poderia ser o grau de umidade, responsável pela feição de continuidade lateral do traço da onda EM; poder-se-ia suspeitar, nesse caso, que o grau de umidade dos materiais constitutivos da camadas basais do

pavimento faz apagar a diferenças de constituição. Essa mesma situação parece estar, em alguns casos, encobrindo a continuidade das linhas de quebra de estruturação estratigráfica em profundidade.

A adoção de descrições mais precisas dos materiais constitutivos poderia ser uma alternativa para a equação e melhor distinção das camadas geofísicas em função da discussão logo acima. A descrição de saibro rosa e saibro amarelo, nesse sentido, poderia ser substituída por uma caracterização do tipo de material fonte do saibro: saibro de material granítico, ou de material basáltico (muito quartzo, pouco quartzo); tais elementos auxiliam significativamente a avaliação dos resultados do georradar frente às condições enumeradas anteriormente.

A análise dos radargramas também mostrou feições que sugerem problemas estruturais de base em alguns intervalos. Assim, sugere-se levantamento geofísico de detalhe (amostragem em intervalos de 1 m) para avaliação de defeitos estruturais de base nos seguintes intervalos do trecho:

- km 06+500 até km 19+200;
- km 27+000 até km 32+500;
- km 42+000 até km 48+150;
- km 54+500 até km 65+000;
- km 66+000 até km 85+500.

Nessa situação, também se pode incluir o intervalo compreendido entre o km 48+000 e o km 54+500 (que possui pavimento superior constituído por concreto portland), uma vez que foram detectados (apesar de não processados e interpretados) elementos que sugerem defeitos estruturais mais profundos e que podem, futuramente, impactar a vida útil do referido pavimento.

Em algumas situações ao longo do trecho investigado, principalmente para o caso da faixa de rolamento central, a terceira camada geofísica (em alguns locais ao longo do trecho ela é a quarta camada) parece sugerir o nível d'água sob o pavimento. No entanto, as características do sinal de retorno (grande amplitude) são contraditórias com essa situação. O tipo de levantamento geofísico executado (levantamento estratigráfico com amostragem em intervalos de 2,5 m) não é adequado para tal avaliação. Nesse caso, esses intervalos também poderiam ser alvo de investigação de detalhe.

Para fins de uma adequada avaliação dos defeitos estruturais e nível d'água, sugere-se, no entanto, que o levantamento de detalhe seja executado nas três faixas de rolamento. Esse procedimento permite verificar a extensão lateral dos problemas estruturais, além de outros quesitos importante para o projeto de recuperação.

A investigação geofísica da estratigrafia dos pavimentos em novos trechos, conforme avaliação dos resultados obtidos pelo processamento e interpretação dos dados da BR-290 (Free Way), mostram que ela poderia ser restrita aos primeiros 70 centímetros de profundidade. A base granular, conforme os dados das sondagens diretas e os radargramas, não está abaixo dos 70 cm. Nessa situação, a restrição da investigação à profundidade de 70 cm permitiria aumentar a taxa de amostragem da onda EM, de modo a fazer com que os camadas de revestimentos superior fossem melhor distinguidas. Assim, sugere-se, nos próximos levantamentos, tomar todo o acervo de sondagens direta e definir uma profundidade máxima de investigação que permita essa ganho de resolução.

Prof. Adelir José Strieder
Lab. de Modelagem Geológica e Ambiental
Porto Alegre (RS), 2 de Abril de 2004.