

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE CONFORTO NUMA COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA SUBURBANA.

Paula Capelo Silva*, J. Montalvão e Silva**

*Instituto Politécnico de Setúbal, Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, Estefanilha, 2914-508 Setúbal

psilva@est.ips.pt

**Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, jms@alfa.ist.utl.pt

RESUMO

O presente trabalho tem por objectivo a determinação dos índices de conforto de uma composição ferroviária suburbana, sendo parte do procedimento para a validação da nova UME da série CP2000, utilizando a norma UIC513R. Este projecto implicou a aquisição contínua de sinais de aceleração em vários pontos, em condições reais de funcionamento. Foi usado um algoritmo computacional para a determinação dos índices de conforto, comprovando-se que a composição em questão se encontra em conformidade com as normas aplicáveis e de acordo com os parâmetros utilizados no projecto da mesma.

1- INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem por objectivo a determinação dos índices de conforto de uma composição ferroviária construída por uma empresa nacional (Figura 1). O trabalho realizado foi enquadrado num projecto envolvendo Bombardier Transportation, Instituto Superior Técnico e Escola Superior de Tecnologia de Setúbal.

Os autores foram, pela primeira vez, confrontados com a necessidade da execução de ensaios para determinação do índice de conforto de uma composição ferroviária suburbana, os quais nunca se haviam realizado com meios nacionais.

O ensaio foi inserido no procedimento para a validação da nova UME (Unidade Múltipla Eléctrica) da série CP2000, construída para a CP. Para este ensaio em particular, foi utilizada a norma UIC 513 R - *Guidelines for evaluation of passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles*.



Fig 1 – Parte da UME – CP2000 ensaiada.

Este projecto implicou a aquisição contínua de sinal de aceleração em onze pontos/direcções diferentes no interior da composição, em condições reais de funcionamento (linhas de alta velocidade, velocidade normal e zona de curvas), durante períodos de tempo superior a 20 minutos consecutivos, em situação de tara e sobrecarga e tendo em consideração o sentido de marcha. As medições decorreram durante um mês, originando um grande volume de dados.

Para a determinação de índices de conforto é necessário aplicar filtros sobre os dados experimentais, tendo em conta as direcções de medição, de forma a adequar as acelerações medidas à sensibilidade humana. Foi usado um algoritmo

computacional para a determinação dos índices de conforto, comprovando-se que a composição em questão se encontra em conformidade com as normas aplicáveis e de acordo com os parâmetros utilizados no projecto da mesma.

2 – OBJECTIVO

O objectivo deste trabalho é a avaliação do conforto da UME CP2000, em marcha, de acordo com a norma.

Estes testes fazem parte do processo de validação da primeira UME CP2000. Para validar o projecto compara-se o valor dos índices obtidos experimentalmente com os valores de projecto.

A norma aconselha, tal como se mostra na Tabela 1 o cálculo de três tipos de Índices de Conforto, o N_{MV} – índice de conforto médio (“*Comfort Index of mean passenger*”), usando o método simplificado; N_{VA} – Índice de conforto para passageiros sentado (“*Comfort Index of seated passenger*”) e N_{VD} – Índice de conforto para passageiros de pé (“*Comfort Index of standing passenger*”), usando o método completo.

Tabela 1 – Procedimento da Norma UIC 513R

	Método Simplificado	Método Completo
Índice de Conforto	N_{MV}	N_{VA} ; N_{VD}
Procedimento:	Obrigatório	Recomendado
Através de medições de:	Aceleração	Aceleração
Através de medições no:	Chão	Chão; Chão e interfaces

3 – SETUP EXPERIMENTAL

Foi decidido determinar os índices de conforto para diversas zonas da composição, dando lugar a utilização de um número elevado de acelerómetros. As figuras 2 e 3 mostram a configuração da composição e a localização e direcção dos pontos de medição das acelerações no chão.

Note-se um exemplo da nomenclatura utilizada: $y..*III$

1º índice: indica a direcção da medição (x, y e z);

2º índice: indica a derivada no tempo (y.. aceleração);

3º índice: indica a localização (* interior da composição; + no bogie);

4º índice: indica a posição do ponto de medição (no meio da composição – EA, IA, IB, EB; no meio do bogie – I, II, III, IV, V).

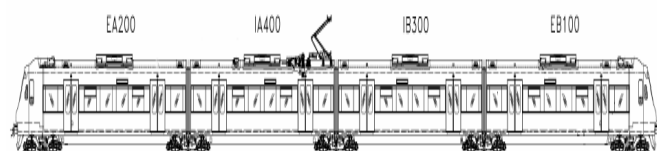


Fig 2 – Configuração da UME – CP2000.

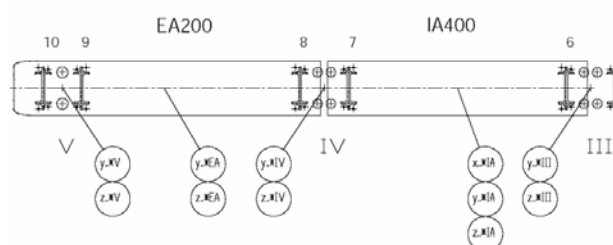


Fig 3 – Localização dos pontos de medida no chão da composição.

A Tabela 2 mostra todos os pontos onde foram feitas medições no chão.

Tabela 2 – Pontos de medição da UME CP2000

UME CP2000	Aceleração		
	a_x	a_y	a_z
EA200	-	$y..*V$	$z..*V$
		$y..*EA$	$z..*EA$
		$y..*IV$	$z..*IV$
IA400	$x..*IA$	$y..*IA$	$z..*IA$
		$y..*III$	$z..*III$

A cadeia de medição foi calibrada antes e após a realização dos testes. Por se efectuarem testes em condições de serviço, optou-se pela recomendação da norma, tendo-se gravado as medições à medida que decorriam os testes (Figura 4).

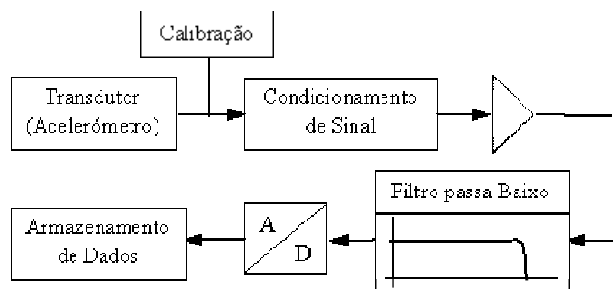


Fig 4 – Cadeia de medição.

Respeitando a norma, foi utilizado um filtro passa baixo a 100 Hz e uma frequência de amostragem superior a 500 Hz (utilizou-se uma frequência de amostragem de 4096 Hz). Os equipamentos utilizados encontram-se descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Equipamentos utilizados.

Equipamento	Marca	Características	Tipo	Nº Série	Ponto Medida
Acelerómetro	B & K	Delta Tron 10mV/ms ²	4507 B3	2258205	x..*IA
				2258214	y..*IA
				2258215	z..*IA
				2258218	y..*III
				2258217	z..*III
				2258196	y..*V
				2258204	z..*V
				2258221	y..*EA
				2258223	z..*EA
				2258197	y..*IV
2258220	z..*IV				
	Endevco	Isotron Seat Pad 100mV/g	2560	10020	Pass X Pass Y Pass Z
Acquisition Frontend	B & K	IDAe Frame Type 3560D com Power Supply Type 2826 and four 6/1 ch Input/Output Module Type 3032;			
Pulse LabShop	B & K	Version 6.1.4.4- 2002.03.08			
Computador	Dell	Intel Pentium III, CPU 1000MHz, 256 Mb RAM, Microsoft Windows 2000			

Para que os índices de conforto sejam representativos do funcionamento da composição é necessário efectuar testes com a composição em tara e em sobrecarga e para diferentes tipos de via. A via é classificada pela velocidade autorizada de circulação, tal como mostra a Tabela 4. Registaram-se, além das acelerações nos pontos de interesse, a velocidade da composição e a localização da medição, para que na análise se possa entrar com os factores externos ao comportamento da UME CP2000.

Tabela 4 – Descrição das linhas utilizadas em testes.

Linha	Norte	Douro
Tipo de linha	Alta Velocidade / Velocidade Normal	Zona de Curvas
Localização	Oliveira do Bairro e Pampilhosa	Contumil e Caide
Velocidade máxima de circulação	140 Km/h	110 Km/h
Tipo de carril	Carril Longo Soldado	Carril Longo Soldado

4 – PROCESSAMENTO DE DADOS

Após o fim dos testes, há necessidade de tratar os dados, que de acordo com o procedimento da norma UIC513R, como mostra a Figura 5.

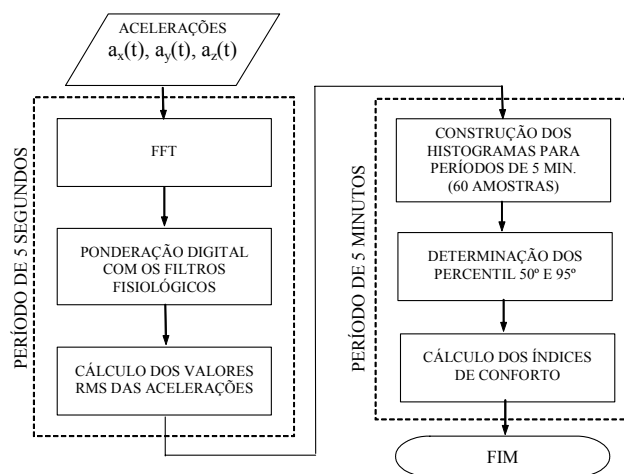


Fig 5 – Processamento de dados.

O ser humano, quando submetido a vibrações, tem sensibilidade diferente para as várias direcções. A norma põe à

disposição os parâmetros para construir os vários filtros fisiológicos, tendo em consideração a direcção e localização de medição. A Tabela 5 mostra os diferentes tipos de filtro e que medições afectam.

Tabela 5 – Filtros fisiológicos.

FILTROS FISIOLÓGICOS	N _{MV}	N _{VA}	N _{VD}
W _a	Filtro passa baixo		
W _b	z (chão)	z (chão) z (assento)	-
W _c	-	x (assento)	-
W _d	x (chão) y (chão)	y (assento)	x (chão) y (chão)

Para construir os filtros é necessário obter as suas funções de transferência:

Função de transferência do filtro W_a:

$$H_A(s) = \frac{s^2 \cdot 4\pi^2 \cdot f_2^2}{\left(s^2 + \frac{2\pi f_1}{Q_1} \cdot s + 4\pi^2 \cdot f_1^2\right) \cdot \left(s^2 + \frac{2\pi f_2}{Q_1} \cdot s + 4\pi^2 \cdot f_2^2\right)}$$

Função de transferência do filtro W_b:

$$H_B(s) = \frac{(s + 2\pi f_3) \cdot \left(s^2 + \frac{2\pi f_4}{Q_3} \cdot s + 4\pi^2 \cdot f_5^2\right)}{\left(s^2 + \frac{2\pi f_4}{Q_2} \cdot s + 4\pi^2 \cdot f_4^2\right) \cdot \left(s^2 + \frac{2\pi f_6}{Q_4} \cdot s + 4\pi^2 \cdot f_6^2\right)} \cdot \frac{2\pi K f_4^2 \cdot f_6^2}{f_3 \cdot f_5^2}$$

Função de transferência do filtro W_c:

$$H_C(s) = \frac{(s + 2\pi f_3)}{\left(s^2 + \frac{2\pi f_4}{Q_2} \cdot s + 4\pi^2 \cdot f_4^2\right)} \cdot \frac{2\pi K \cdot f_4^2}{f_3}$$

Função de transferência do filtro W_d:

$$H_D(s) = \frac{(s + 2\pi f_3)}{\left(s^2 + \frac{2\pi f_4}{Q_2} \cdot s + 4\pi^2 \cdot f_4^2\right)} \cdot \frac{2\pi K \cdot f_4^2}{f_3}$$

Sendo $s = i(2\pi f)$, f = frequência [Hz] e as constantes encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Constantes das Funções de transferência.

	Intervalo de Frequência			Parâmetros das Curvas							
	f ₁ [Hz]	f ₂ [Hz]	Q ₁	f ₃ [Hz]	f ₄ [Hz]	f ₅ [Hz]	f ₆ [Hz]	Q ₂	Q ₃	Q ₄	K
W _a	0,4	100	0,71	-	-	-	-	-	-	-	-
W _b	0,4	100	0,71	16	16	2,5	4	0,63	0,8	0,8	0,4
W _c	0,4	100	0,71	8	8	-	-	0,63	-	-	1,0
W _d	0,4	100	0,71	2	2	-	-	0,63	-	-	1,0

Os filtros utilizados estão representados nas Figuras 6 a 8.

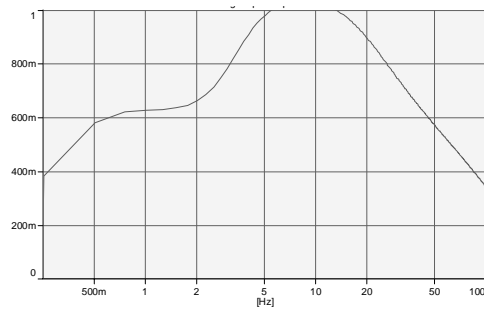


Fig 6 – Filtro fisiológico (W_a . W_b).

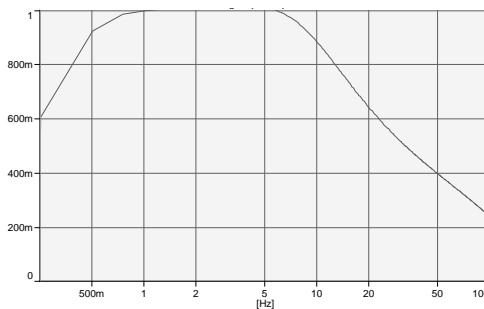


Fig 7 – Filtro fisiológico (W_a . W_c).

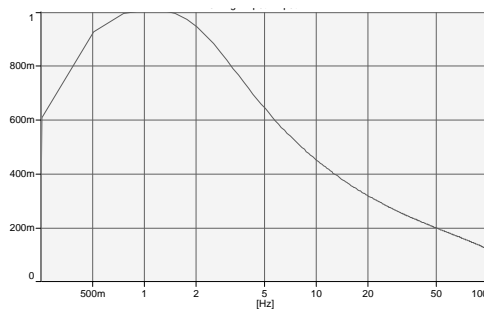


Fig 8 – Filtro fisiológico (W_a . W_d).

Após o processamento estatístico dos dados, calculam-se finalmente os índices de conforto cujas fórmulas de cálculo são:

$$N_{NV} = 6\sqrt{\left(a_{XP95}^{W_d}\right)^2 + \left(a_{YP95}^{W_d}\right)^2 + \left(a_{ZP95}^{W_b}\right)^2}$$

$$N_{VA} = 4\left(a_{ZP95}^{W_b}\right) + 2\sqrt{\left(a_{YA95}^{W_d}\right)^2 + \left(a_{ZA95}^{W_b}\right)^2} + 4\left(a_{XD95}^{W_c}\right)$$

$$N_{VD} = 3\sqrt{16\left(a_{XP50}^{W_d}\right)^2 + 4\left(a_{YP50}^{W_d}\right)^2 + \left(a_{ZP50}^{W_b}\right)^2} + 5\left(a_{YP95}^{W_d}\right)$$

onde:

N: índice de conforto;

l: subscrito que indica o tipo de índice de conforto (NV, VA ou VD);

a : valor RMS da aceleração [m/s²]

- W_i : sobrescrito aplicação do filtro fisiológico i (i : a, b, c, d)
- YP: subscrito que indica a direcção y (podendo ser também na direcção x ou z) e medição no chão;
- ZA: subscrito que indica a direcção z (podendo ser também na direcção y) e medição no assento;
- XD: subscrito que indica a direcção x e medição no assento;
- k : subscrito que indica o percentil a utilizar (50 ou 95);

A norma classifica os índices de conforto da seguinte forma:

- $N < 1$ Muito Confortável
- $1 \leq N < 2$ Confortável
- $2 \leq N < 4$ Conforto Médio
- $4 \leq N < 5$ Desconfortável
- $N \leq 5$ Muito Desconfortável

Em primeiro lugar decidiu-se a frequência de amostragem a utilizar, para calcular as funções de transferência dos filtros fisiológicos, utilizando uma folha de cálculo. Depois de todas as medições efectuadas isolaram-se a que reuniam os requisitos mínimos (5 minutos contínuos de medição). Com estas medições, utilizando as capacidades do PULSE, efectuaram-se as FFTs de blocos de medições de 5 segundos e aplicaram-se os filtros fisiológicos. Calculou-se, de seguida, os valores RMS, que foram exportados para um ficheiro de dados. Os valores RMS das acelerações foram tratados estatisticamente, procedendo-se ao cálculo do histograma e à determinação dos valores de percentil 50% e 90% da curva cumulativa, necessários ao cálculo dos índices de conforto. Só depois foi possível calcular os índices de conforto.

5 – RESULTADOS

A aplicação de filtros fisiológicos tem o impacto mostrado nas Figuras 9 e 10, para uma medição de 5 segundos.

De seguida efectuou-se o tratamento estatístico. Mostra-se na Figura 11 um dos histogramas que corresponde a 5 minutos de medição e os parâmetros estatísticos obtidos.

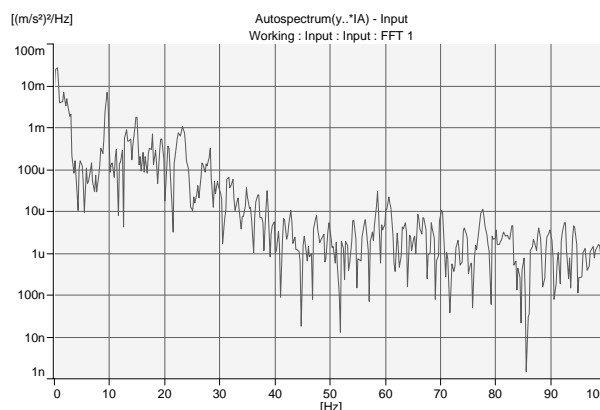


Fig 9 – Densidade espectral de potência para o ponto $y..*IA$ antes da aplicação do filtro.

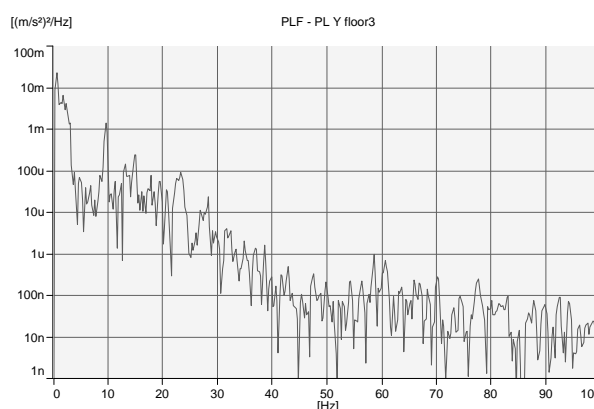
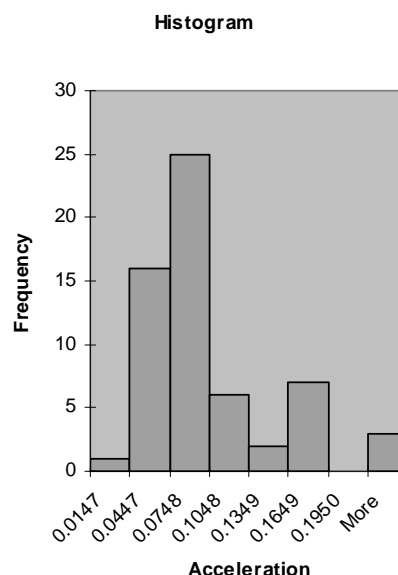


Fig 10 – Densidade espectral de potência para o ponto $y..*IA$ após da aplicação do filtro.



Número de Amostras:	60
Valor mínimo:	0.0147 m/s ²
Valor máximo:	0.2250 m/s ²
Percentil 50%:	0.0551 m/s ²
Percentil 95%:	0.1630 m/s ²
Desvio padrão:	0.0503 m/s ²
Largura de banda:	0.0300 m/s ²

Fig 11 – Histograma dos valores de aceleração RMS para 5 minutos para o ponto $y..*IA$.

O requisito do índice de conforto exigido por norma e considerado como valor de projecto é o intervalo de 2 a 2,5.

Apenas se mostram nas Figura 12 e 13 os gráficos de vários índices de conforto para o ponto IA, em blocos de testes diferentes, por velocidade decrescente:

- 1º Bloco (1 a 4) – Linha do NORTE, Alta Velocidade, em tara (apenas para a cabine condutora EA200);
- 2º Bloco (5 a 11 e 12 a 17) – Linha NORTE, Velocidade Normal, em tara;
- 3º Bloco (18 a 23 e 24 a 29) – Linha NORTE, Velocidade Normal, em sobrecarga;
- 4º Bloco (42 a 46 e 47 a 50) – Linha DOURO, Zona de Curvas, em tara;

5º Bloco (30 a 35 e 36 a 41) – Linha DOURO, Zona de Curvas, em sobrecarga.

Na Tabela 6 apresenta-se o resumo dos índices de conforto calculados.

6 – CONCLUSÕES

Conclui-se que a composição apresenta índices de conforto normalmente abaixo do índice de conforto preconizado pelo projecto. No entanto, ocorrem valores pontuais com classificação desconfortável, devido à passagem por troços da via em más condições (ver Tabela 7).

Os índices de conforto mais elevados (menos confortável), obtêm-se, como seria de esperar, para velocidades mais altas.

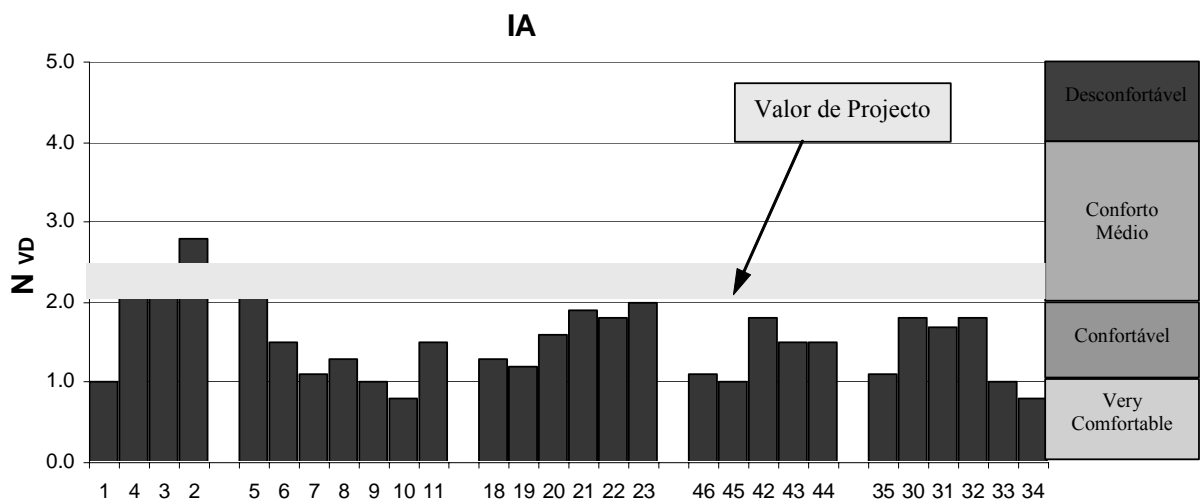


Fig 12 – Índice de Conforto N_{VD} para o ponto IA com a cabine EA200 condutora.

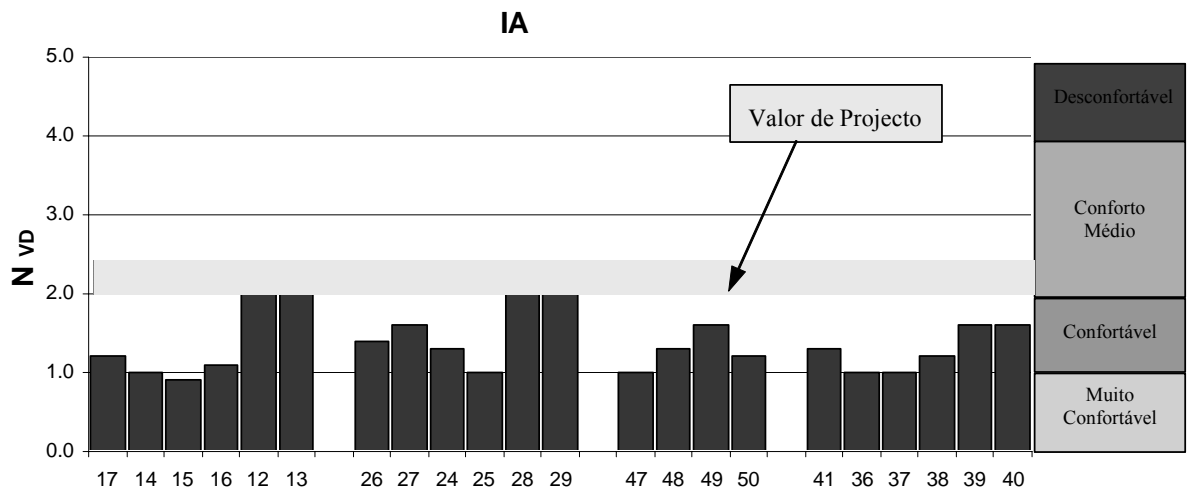


Fig 13 – Índice de Conforto N_{VD} para o ponto IA com a cabine EA100 condutora.

Tabela 7 – Resumo dos índices de conforto.

Localização	Índice Conforto	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Número de Amostras
V	N _{MV}	1.80	0.60	3.70	0.90	50
	N _{VD}	1.61	0.61	3.50	0.80	50
EA	N _{MV}	1.90	0.61	3.80	1.00	50
	N _{VD}	1.36	0.34	2.30	0.80	50
IV	N _{MV}	2.32	0.52	4.50	1.60	50
	N _{VD}	2.25	0.53	3.40	1.20	50
IA	N _{MV}	1.85	0.58	3.90	1.20	50
	N _{VD}	1.47	0.46	2.80	0.80	50
III	N _{MV}	2.17	0.71	4.00	1.00	50
	N _{VD}	1.74	0.61	3.30	0.90	50
Passenger	N _{VA}	1.24	0.40	2.70	0.70	46

Para o mesmo tipo de linha o índice de conforto é mais elevado quando a cabine instrumentada é condutora.

Os índices de conforto mais baixos (mais confortável) obtêm-se para posições no

meio da composição EA e IA, longe dos bogies.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Bombardier Transportation na pessoa dos Eng.^{os} Lamy Figueiras, Aristide Chaves e António Pereira pelo apoio na realização do presente trabalho.

Agradecem ainda a ajuda prestada pelos colegas Ricardo Cláudio no tratamento dos dados e Duarte Silva na execução do relatório final de projecto.

REFERÊNCIAS

UIC513R - Guidelines for evaluating of passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles, 1^o Edition, 01.07.94.

Manual de utilizador do Pulse LabShop Version 6.1.4.4-2002-03-08

Paula Capelo Silva, J. Montalvão e Silva CP2000 *Passenger Comfort Test Report*. 12.12.2003