

4

Descrição dos ensaios de carregamento dinâmico

O ensaio de carregamento dinâmico ou prova de carga dinâmica é um ensaio que objetiva principalmente a determinação da resistência mobilizada da interação solo-estaca, para carregamentos estáticos axiais a través da medição da força dinâmica e aceleração do elemento da estaca durante um impacto de martelo conforme apresentado no item (2.5).

Nos relatórios fornecidos, relate-se que a aquisição dos dados durante o ensaio foi através de instrumento instalado no fuste da estaca próximo ao topo, e processados utilizando o PDA (Pile Driver Analyzer) modelo PAX. Esta instrumentação consiste em dois pares de extensômetros elétricos (transdutores de deformação) e acelerômetros (transdutores de aceleração) diametralmente opostos, espaçados de 90°. Os ensaios de carregamento dinâmico foram executados de acordo à norma 13208/2007 da ABNT.

Em todas as estacas ensaiadas foi utilizado o método das energias crescentes, utilizando martelos de queda livre com peso variável e, diferentes alturas de queda, para cada golpe de análise em cada estaca.

Analisou-se o comportamento das estacas ensaiadas com o programa do CAPWAP. Esse tipo de análise é um processo iterativo, o qual envolve os sinais de força e velocidade medidos em campo, estimativas das resistências estáticas do solo e parâmetros dinâmicos da estaca e do solo. Nessa avaliação empregou-se análises numéricas do tipo CAPWAP, pelo método “melhor ajuste”, onde o usuário do programa interfere nos parâmetros buscando o melhor ajuste do modelo simulado com os dados obtidos em campo.

Algumas incógnitas são descritas a seguir:

- I. Resistência estática máxima (R_u): Para cada elemento de solo, a análise CAPWAP assume um comportamento elasto-plástico ideal.
- II. Máxima resistência total mobilizada ou capacidade CAPWAP total: Compreende a soma do atrito lateral total com a resistência de ponta. Os valores informados referem-se apenas à parcela estática.

- III. Fator de ‘damping’ viscoso (J_v): O CAPWAP considera que a resistência dinâmica oferecida pelo solo ao deslocamento rápido da estaca é diretamente proporcional à velocidade, ou seja, ‘ $R_d = J_v \cdot v$ ’. O fator de ‘damping’ de Smith é definido de acordo à fórmula (2.5.18) do item (2.5.2), esse valor é geralmente considerado constante ao longo do fuste da estaca.
- IV. Quake: No modelo elasto-plástico ideal o valor da máxima deformação elástica do elemento de solo é denominado de “Quake”. A partir desse ponto, o programa assume total plastificação do solo.
- V. Energia máxima na estaca (EMX): A variação da energia transferida para a estaca com o tempo pode ser obtida a partir da integral do produto da evolução com o tempo da força com a evolução com o tempo da velocidade.
- VI. Deslocamento máximo (DMX): é o valor do deslocamento máximo das partículas na região dos sensores. É obtido a partir da dupla integração do sinal do acelerômetro. Esse valor é igual ao repique, acrescida a nega.
- VII. Deslocamento final (DFN): Deslocamento permanente ao final do golpe. Esse valor deve ser próximo da nega medida em campo.

4.1. Resultados do ensaio de carregamento dinâmico

Apresenta-se neste item os resultados dos ensaios dinâmicos, executadas em diferentes obras, resumidos na tabela (4.1).

O gráfico apresentado na figura (4.1) mostra a curva carga-recalque da prova de carga dinâmica da estaca Hélice contínua P17D-G (estaca escolhida para um exemplo de análises) simulada pelo programa de CAPWAP. A curva contínua refere-se ao comportamento da região onde foram instalados os sensores e, a curva tracejada refere-se ao comportamento da ponta da estaca. Nessa simulação, para cada carga incremental na ponta o programa calcula a carga e o recalque resultante no topo, levando em consideração a elasticidade da estaca e do solo. Note-se que essa simulação corresponde ao comportamento da estaca no instante do teste dinâmico. Assim, principalmente para análises referentes aos sinais correspondentes ao final da cravação, esse comportamento pode não corresponder ao que a estaca apresentará após um período de repouso.

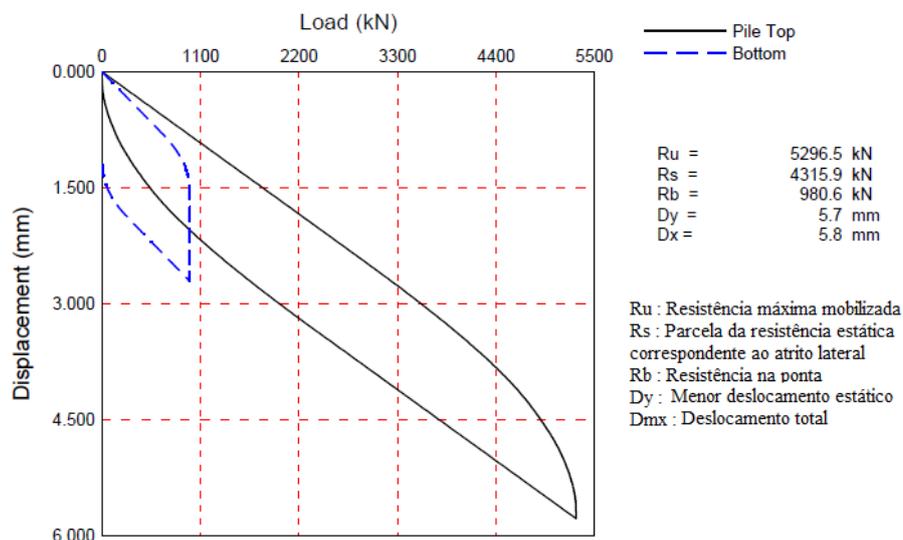


Figura (4.1) – Curva carga x recalque da estaca P17D-G - Ensaio dinâmico (fonte: relatórios).

As capacidades acima são ditas ‘Mobilizadas’ pois, no caso em que o deslocamento permanente “nega” experimentado pela estaca devido à aplicação do golpe for pequena magnitude, esta capacidade é menor que a ruptura.

A medida que aumenta o valor da nega, devido ao aumento da energia do golpe aplicado à estaca, a resistência mobilizada se aproxima da resistência de

ruptura. Observou-se que grande parte das estacas ensaiadas apresentou resistência mobilizada, para baixos valores de nega 's' (p.e. estacas metálicas).

Os valores das resistências mobilizadas das estacas determinados pelas análises do CAPWAP, correlacionam-se com os resultados obtidos pelo método do CASE (RMX), para um fator de amortecimento ' J_c ', respectivo a cada estaca. A comparação é apresentada mais adiante.

Segundo os relatórios diz que, previamente às análises processadas pelo PDA, mediante o método do CASE, os resultados finais foram ajustados pelo programa do CAPWAP. Esse tipo de análise é um processo iterativo, o qual envolve os sinais de força e velocidade medidos em campo, estimativas das resistências estáticas do solo e, parâmetros dinâmicos da estaca e do solo.

Na figura (4.2) e (4.3) são apresentadas as curvas, medidas em campo, de força e velocidade multiplicada pela impedância versus tempo da estaca P17D-G. As curvas cheias apresentam a força "F", obtida pelo extensômetro de deformação elétrico, multiplicada pela constante de calibração, e as curvas pontilhadas, a velocidade "VZ" obtida pela integração da aceleração multiplicada pela impedância da estaca.

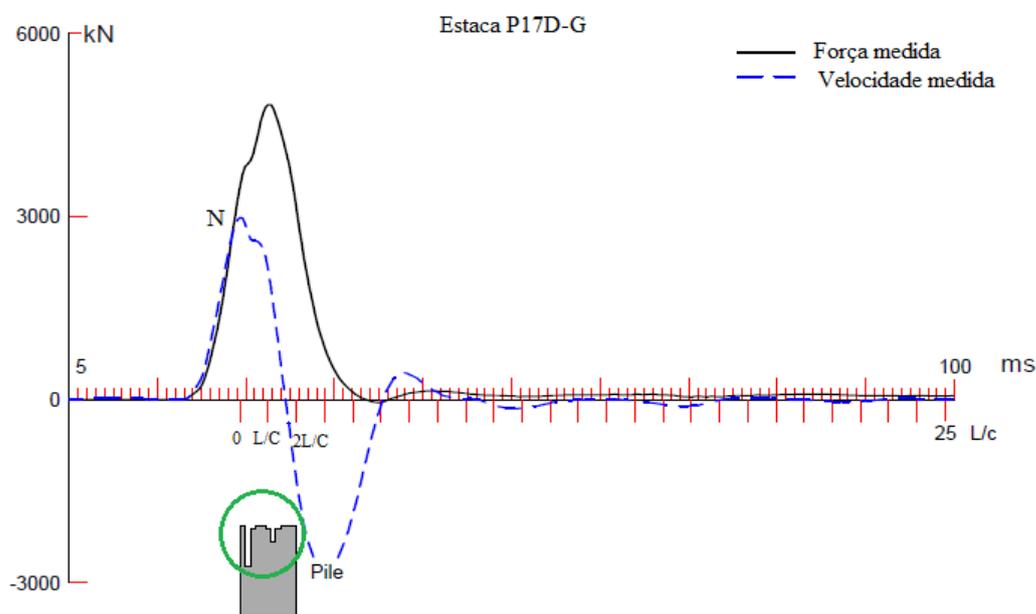


Figura 4.2 - Curva de força e velocidade medidas para a estaca Hélice contínua P17D-G.

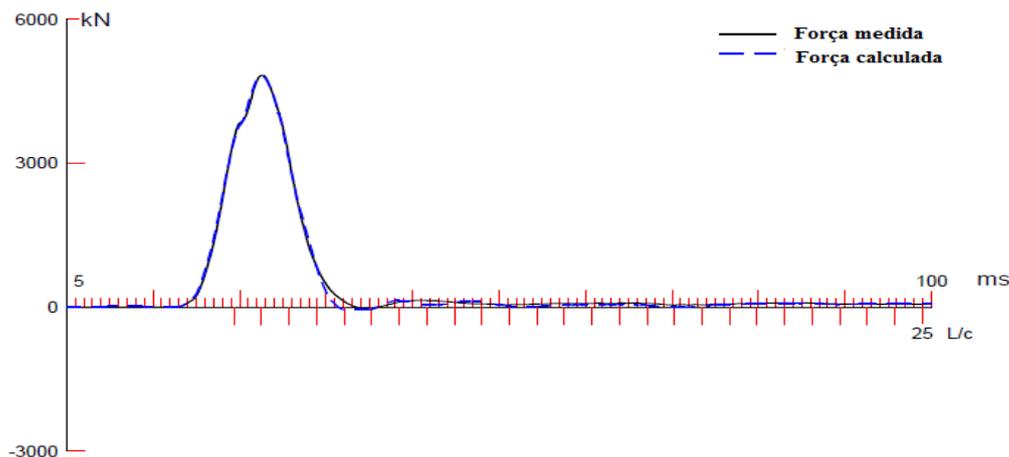


Figura 4.3 - Ajuste das curvas de força e velocidade obtidas pelo CAPWAP apresentando um bom ajuste para estaca Hélice contínua P17D-G.

Observa-se na figura (4.2) a análise sequencial das curvas de força 'F' e velocidade vezes impedância 'ZV' escolhidos para o golpe mais representativo para a estimativa da resistência mobilizada, se percebe que o sinal da força e velocidade é proporcional até o ponto 'N'. A partir desse ponto, os sinais de força e velocidade começam a ter uma divergência, representando a chegada de ondas refletidas. Esse afastamento entre as duas curvas caracteriza ao atrito lateral no intervalo de tempo '0' e '2L/C'. A estaca apresenta uma possibilidade de danos nos primeiros metros do comprimento, conforme destacado na cor verde, provavelmente causado durante o ensaio.

A partir do gráfico (4.2) as curvas de força e velocidade medidas em campo foram ajustadas utilizando valores 'quake' e 'damping' mostradas na figura (4.3).

Os resultados das análises do CAPWAP estão resumidos na tabela (4.1) para cada golpe de interesse. Alguns dados não foram fornecidos, para algumas estacas que ficam em espaços vazios.

Na tabela (4.1) se apresentam valores de resistência mobilizada total (T_{nf}), resistência lateral (R_L), resistência de ponta (R_p), tensões máximas aplicadas durante o ensaio de recravação, energia medida (EMX), deslocamento máximo (DMX) e, valores de 'quake' e 'damping' de ponta (Q_p , J_p) e lateral (Q_s , J_s).

Alguns gráficos correspondentes às demais estacas encontram-se no anexo (06).

Tabela 4.1 - Resumo das análises "CAPWAP".

Nº de Estacas	Numero de golpe	Energia Maxima Transferida (KN-m)	Deslocamento maximo	Resistência de Ponta (Tnf)		Resistência Lateral (Tnf)		Resistência Total mobilizada CAPWAP (Tnf)	Tensão Maxima de compressão (Mpa)	Tensão Maxima de tração (Mpa)	Quake ponta	Quake lateral	Damping Smith lateral	Damping Smith ponta	Damping CASE lateral	Damping CASE ponta	Jc correlação com CAPWAP 'Rx'
		EMX	DMX (mm)	Tnf	%	Tnf	%				(qp) mm	(qs) mm	Js (s/m)	Jp (s/m)	Jc	Jc	Jc
P17D-I	3,00	14,86	4,05	101,55	18%	450,10	82%	551,61	13,60	1,44	1,039	2,076	0,854	1,313	1,089	0,378	0,24
P17D-G	5,00	15,38	4,91	98,06	19%	431,59	81%	529,65	13,80	1,18	1,164	2,485	0,922	1,313	1,102	0,356	0,24
P24D-B	3,00	10,60	6,15	39,02	18%	176,35	82%	215,35	8,50	1,12	1,004	4,584	0,801	1,154	0,544	0,174	0,9
P25D-A	3,00	15,85	4,41	97,82	19%	421,60	81%	519,48	13,70	0,95	1,015	2,552	1,041	1,313	1,185	0,347	0,38
P26D-B	4,00	8,53	6,28	46,47	23%	154,90	77%	201,40	7,80	1,37	3,512	3,819	0,619	1,314	0,403	0,25	1
B59	1,00	58,00	5,47	382,40	18%	1.799,34	82%	2.182,18	15,00	6,00	0,279	2,249	0,856	1,313	1,322	0,295	0
C53	3,00	37,70	0,00	910,00	48%	988,39	52%	1.898,39	12,40	5,41	0,164	3,002					
E1 TR-H32A(54)''	5,00	13,43	9,58	9,59	10%	85,86	90%	95,45	24,00	8,10	6,483	7,499	0,815	0,17	0,624	0,015	0,32
E3 CT-TR-H32Ap/TR-H29	5,00	6,69	16,96	22,26	50%	22,20	50%	44,46	9,50	2,34	8,125	6,618	0,565	0,08	0,101	0,014	0,26
E4A CT-TR-H32Ap/TR-H32A	2,00	11,96	4,38	11,44	7%	161,16	93%	172,60	22,60	1,23	3,736	2,907	1,313	1,313	1,708	0,121	0,31
E4A CT-TR-H32Ap/TR-H29	1,00	7,48	3,91	1,17	1%	135,59	99%	136,76	13,10	0,04	3,232	3,889	1,458	0,08	1,762	0,001	0,2
E01	5,00	7,21	7,00	13,04	11%	106,98	89%	120,02					1,313	0,757	1,274	0,089	0,67
E10	2,00	6,25						169,58									
E10	3,00	20,80	18,10	19,11	10%	173,60	90%	192,71	22,70	3,38	1,006	4,443					
E53	4,00	23,80	15,00	12,91	5%	268,78	96%	281,29	30,10	1,66	0,926	1,004					
E64	3,00	25,90	16,30	13,03	5%	237,21	95%	250,24	25,60	1,79	1,004	2,536					
E70	3,00	9,70	13,40	0,00	0%	167,27	100%	167,27	17,70	1,73	2,253	4,203					0
E84	4,00	23,50	15,30	16,05	6%	275,41	94%	291,46	29,30	2,20	0,731	1,209					
E101	1,00	15,10	8,50	70,25	33%	142,32	67%	212,57	23,10	1,19	1,448	1,485					
E123	4,00	31,00	20,30	75,05	44%	97,13	56%	172,18	24,00	0,97	11,328	1,179					
E130	2,00	12,10	11,30	77,81	51%	75,55	49%	153,36	19,70	0,26	2,622	6,077					
112A TR68	2,00	11,15	14,39	85,82	60%	56,26	40%	142,08	173,00	34,08	2,058	2,591					1
113A TR68	2,00	-		82,27	60%	55,09	40%	137,06	161,10	35,51	3,554	4,591					
120A TR68	2,00	-		93,88	71%	38,39	29%	132,27	173,80	45,20	2,516	3,270					
121A TR68	1,00	-		67,44	62%	41,31	38%	108,75	126,60	25,02	3,317	4,284					
126A TR68	2,00	-		85,06	70%	35,81	30%	120,87	155,80	31,50	2,872	3,474					
127A TR68	2,00	-		105,95	71%	44,01	29%	149,96	182,80	34,81	2,304	2,702					
132A TR57 Duplo	5,00	-		127,23	76%	41,18	24%	168,41	151,60	54,18	3,304	7,500					
134A TR57 Duplo	2,00	-		161,26	76%	51,09	24%	212,35	167,90	70,25	3,893	5,058					

4.1.1. Interpretação dos resultados

O objetivo do ensaio de carregamento dinâmico é a obtenção da resistência mobilizada (RMX) do sistema interação solo-estaca no momento do ensaio, mais outras informações podem ser obtidas da análise de dados, como, eficiência do sistema de cravação (ETH), integridade (fator β) e tensões máximas (CSX, TSX) geradas nas estacas durante o ensaio. Estas foram analisadas para cada estaca.

4.1.1.1. Eficiência na transferência de energia 'ETH'

A energia transferida às estacas é afetada por perdas que ocorrem no cepo e no coxim, no capacete, na forma de atrito do martelo com as guias da torre, na forma de ruído, calor, etc. Assim, é usual definir uma eficiência da energia transferida que consiste na razão entre a energia líquida transferida (EMX) à estaca e a energia potencial disponível. Na figura (4.4) se mostra a eficiência da energia transferida para todas as estacas consideradas no estudo, com exceção das estacas metálicas (113A a 134A) que não foram incluídas por falta de dados.

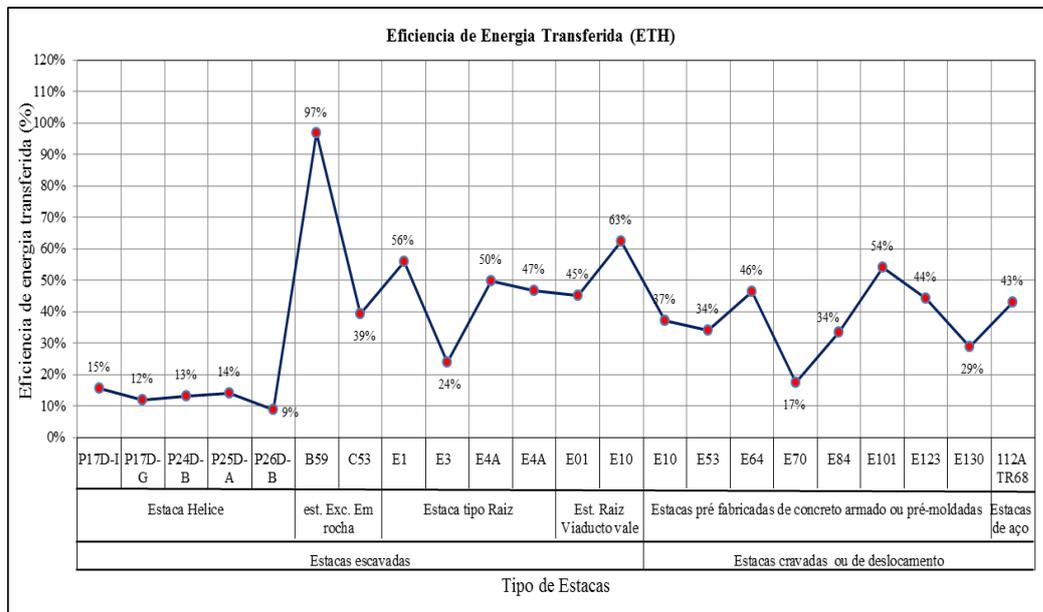


Figura 4.4 - Eficiência da energia transferida para as 29 estacas ensaiadas.

O ensaio de carregamento dinâmico foi realizado com martelos de queda livre, com peso e alturas de quedas variáveis para cada estaca. A média da eficiência de energia transferida para estacas escavadas de tipo hélice contínuas foi aproximadamente de 13%. Este valor é baixo em relação às especificações mencionadas na tabela (2.10) sobre a eficiência da energia transferida. A eficiência da energia transferida para a estaca de concreto B59 é aproximadamente 97%, maior em relação às especificações dadas. As estacas C53 a E130 obtiveram uma média na eficiência da transferência da energia aproximadamente de 41%, ou seja, dentro dos limites das especificações para martelos de queda (tabela 2.10) e, a eficiência da energia transferida para a estaca metálica 112A é aproximadamente 43% também estão dentro dos limites estabelecidos. Estes valores de 'ETH' que indicam valores menores a 100% permitem determinar que para estes golpes as alturas reais de queda do martelo, são menores que às alturas nominais indicadas na tabela (3.1).

Além disso, com referência ao gráfico da eficiência da energia transferida (ETH), a energia registrada pelo golpe do martelo é menor que a energia potencial disponível. Porém os resultados das tensões de cravação são próximos aos valores limites estabelecidos.

Obviamente controlando a energia transferida pelo martelo à estaca, pode ser também controlada as tensões de cravação nas estacas.

4.1.1.2. Tensões máximas durante o ensaio

Os valores das tensões máximas de compressão (CSX) aplicada na cabeça das estacas e a máxima tensão de tração (TSX) calculada ao longo do fuste da estaca, são avaliados para um provável dano ocorrido durante a cravação, perto da cabeça, na ponta e, ao longo da estaca. As tensões de tração são causadas pela reflexão da onda compressiva numa ponta livre ou pela baixa resistência do solo. Estas tensões geradas durante a cravação para cada golpe não devem exceder os valores limites das tensões estabelecidas pelo PDI, 2006, recomendados na tabela (2.11).

Estes danos geralmente ocorrem devido à excessiva tensão de compressão, mais comumente na cabeça da estaca.

Na figura (4.5) se mostram as tensões máximas de compressão aplicadas nas estacas de concreto e metálicas para cada golpe de análise, usando martelos de queda livre. As tensões geradas em todos os ensaios para as estacas de concreto armado e escavadas ‘in situ’ foram inferiores ao limite da tensão máxima de compressão “ $0,85f_{ck}$ ”. As tensões geradas nas estacas metálicas 112A à 134A foram baixas não ultrapassando o limite das tensões de compressão “ $0,9f_y = 310,5\text{Mpa}$ ”.

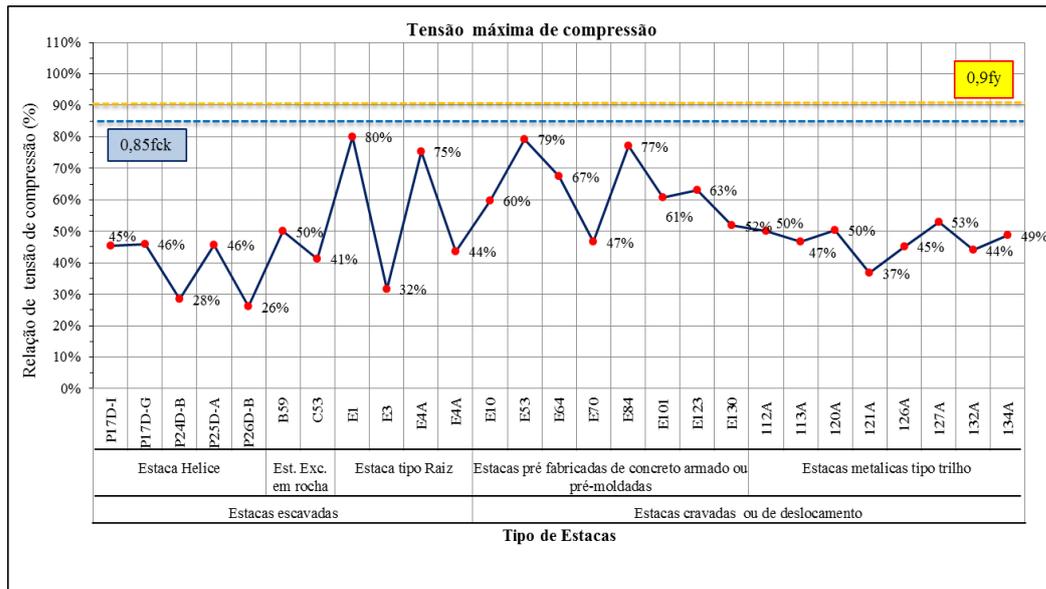


Figura 4.5 - Tensões máximas de compressão (CSX) durante o ensaio de carregamento dinâmico nas estacas.

A verificação das tensões de tração é de grande interesse, principalmente em estacas pré-fabricadas de concreto e em estacas escavadas de concreto (in loco), construídas de acordo a determinadas características de resistência, que nem sempre são suficientes para suportar determinadas tensões.

As tensões de tração (figura 4.6) geradas durante o ensaio carregamento dinâmico ultrapassaram aos valores limites estabelecidas pela norma NBR/13208 ($0,1f_{ck}$ para estacas de concreto e $0,9f_y$ para estacas metálicas) nas estacas B59, C53 e E1, com uma média de tensão de tração 22% em relação aos valores limites estabelecidos. Provavelmente nestas estacas foram aplicados altos níveis de tração, devido a que se trata de estacas de porto dimensionadas para grandes esforços de flexão.

Para a avaliação das tensões geradas durante o ensaio foram considerados valores de resistência à compressão ' $f_{ck} = 30\text{MPa}$ ' para estacas escavadas de concreto e, para estacas pré-fabricadas de concreto armado, ' $f_{ck} = 38\text{MPa}$ '. No caso de estacas metálicas a tensão do escoamento foi considerado ' $F_y = 345\text{MPa}$ '.

Uma possível variação das tensões de compressão e tração gerada durante o ensaio de carregamento dinâmico é pela excentricidade do golpe do martelo aplicada na cabeça da estaca e o tipo de perfil do solo, que na prática poderia provocar maiores tensões de compressão. Por isso, durante o ensaio, deve-se verificar se a cabeça da estaca está em esquadro e, verificar constantemente o alinhamento do martelo com a estaca.

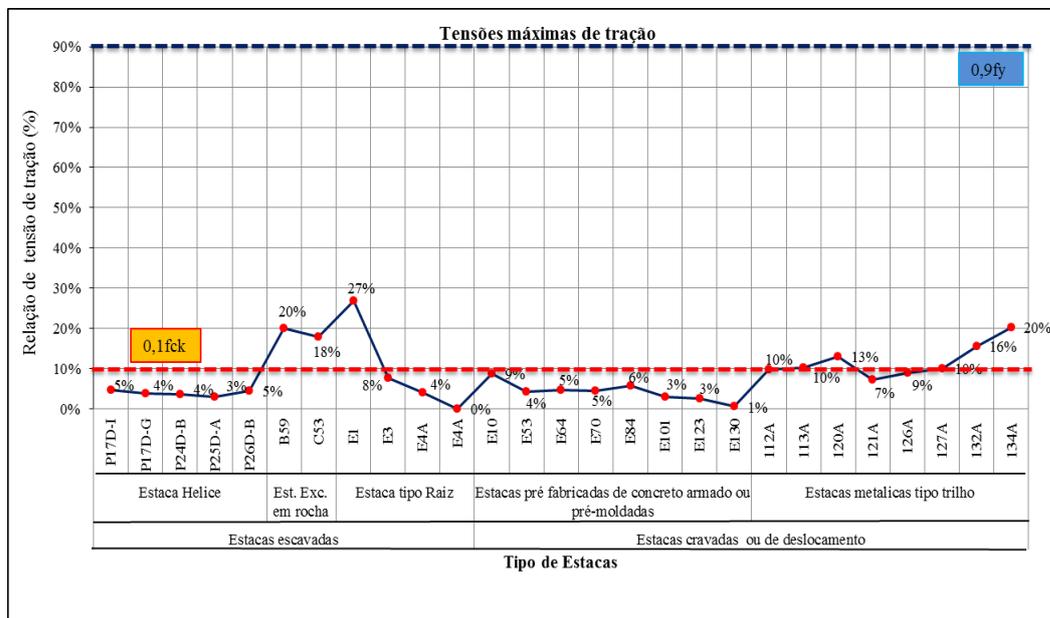


Figura 4.6 - Tensões máximas de tração (TSX) durante o ensaio de carregamento dinâmico nas estacas.

4.1.1.3. Resistência máxima mobilizada (RMX)

A resistência Mobilizada obtida pelo CAPWAP no final do ensaio deverá ser no mínimo de 1,60 vezes de sua carga de trabalho exigido pela norma NBR 6122/2010 ABNT. As estacas P24DB, P26DB, E01, E3, e E70, obtiveram uma resistência média de 1.38 vezes da carga de trabalho, que é baixo em relação ao valor exigido pela norma.

A grande maioria das estacas apresentou resistência mobilizada superior ao dobro de sua respectiva carga de trabalho com valores baixos de nega 's'.

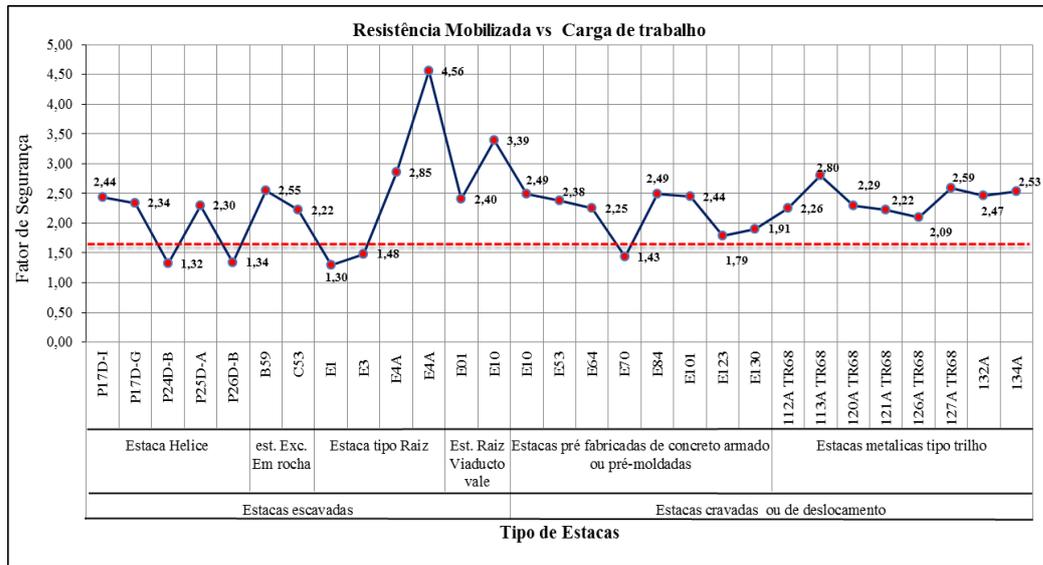


Figura 4.7 - Gráfica da resistência mobilizada requerida.

A figura (4.8) representa a parcela da resistência de ponta e da resistência lateral para cada estaca, resultado de análises do CAPWAP.

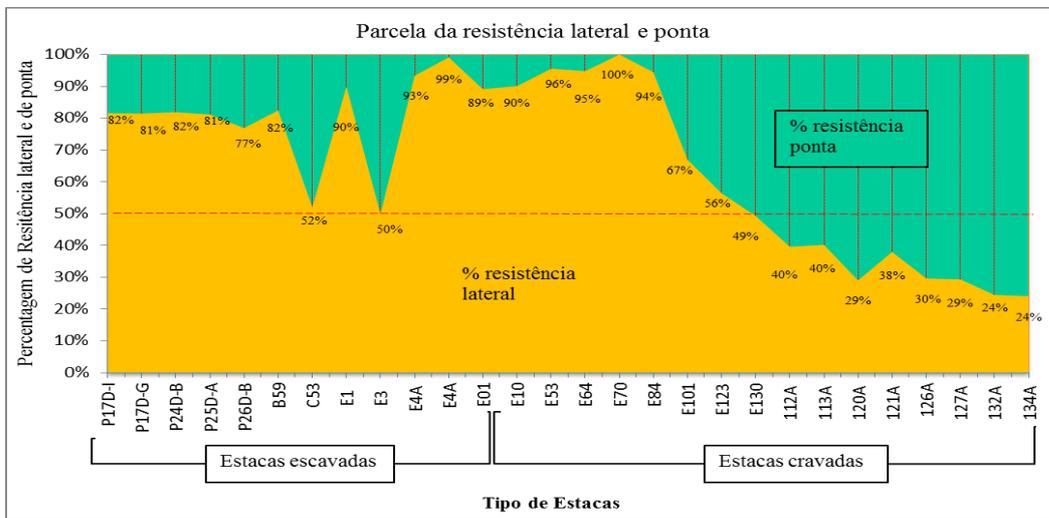


Figura 4.8 - Parcela da resistência de ponta e lateral para cada estaca.

Nas estacas escavadas P17D-I até as estacas pré-fabricadas de concreto armado E123, houve predominância da resistência lateral com uma porcentagem média de proporção maior a 80%. Porém nas estacas metálicas (112A a 134A) houve maior predominância da resistência de ponta em relação à resistência lateral.

4.1.1.4. Integridade da estaca

O programa de análise dos sinais dinâmicos (PDA) calcula um fator de integridade beta (β), que é útil para a avaliação da continuidade estrutural das estacas. Esse parâmetro indica um estriamento relativo (ou mais precisamente a relação entre as impedâncias) numa dada seção da estaca.

Da figura (4.8), as estacas P17D-G e P24D-B apresentaram uma redução da impedância com um fator de ($\beta=60\%$), aproximadamente a 2,15m e 2,10m abaixo dos níveis de sensores respectivamente. Na estaca P25D-A apresentou uma redução da impedância com fator de ($\beta =70\%$) a 3,15m abaixo dos níveis dos sensores. Na estaca P26D-B foi identificada uma possibilidade de dano com ($\beta=50\%$) a 2,70m abaixo dos níveis dos sensores. E finalmente a estaca E70 apresentou uma redução da impedância com um fator de ($\beta =70\%$) a 3,50m abaixo dos níveis de instrumentação. No caso das outras estacas não houve presença de dano. Os valores limites de beta ' β ' são apresentados na tabela (2.12).

Vale salientar que uma estaca pode sofrer danos de diversas naturezas como rompimentos de emendas, encurvamentos ou desvios em camadas resistentes, além de ruptura estrutural propriamente dita.

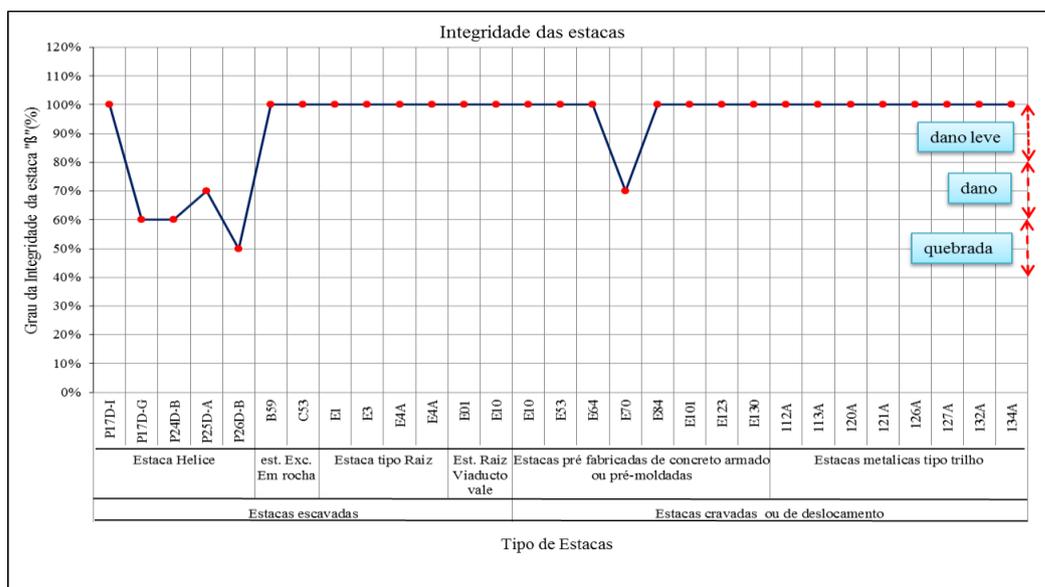


Figura 4.9 - Representação da integridade das estacas ensaiadas.

As estacas escavadas de concreto identificadas com dano durante o ensaio, não foram estabelecidas o motivo. Portanto se suspeita que durante o processo de execução das estacas moldadas ‘in loco’, exista uma irregularidade no fuste da estaca devido ao concretagem, ou durante a retirada do molde de aço após o vazamento do concreto. Então a integridade da estaca é variada devido à mudança da área ou módulo de elasticidade.

4.1.1.5. Coeficiente de amortecimento (J_c)

Com finalidade de fazer uma análise crítica sobre a influência do coeficiente de amortecimento (J_c), foi realizado um estudo considerando a variação da resistência mobilizada total com a variação deste coeficiente.

Observa-se na figura (4.10) a relação entre o coeficiente de amortecimento utilizado pelo método do CASE e a resistência mobilizada total durante o ensaio. As tabelas fornecidas para a estaca P17D-G são apresentadas no anexo (6.2).

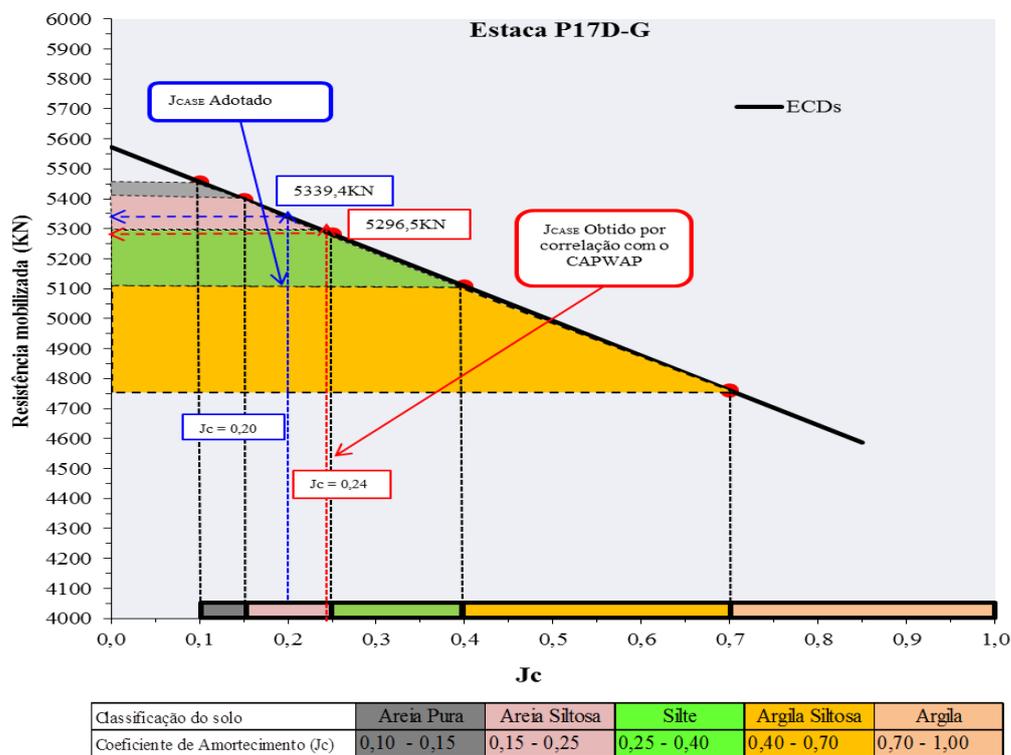


Figura 4.10 – Resistência mobilizada versus coeficiente de amortecimento (J_c), na estaca Hélice contínua P17D-G.

Nota-se que quando menor o coeficiente de amortecimento, maior é a resistência mobilizada obtida pelo ensaio de carregamento dinâmico. Quanto mais fino o solo, maior é o valor de ' J_c ', pois o efeito da viscosidade e de amortecimento será maior.

A tabela (4.2) mostra a faixa de variação numérica da resistência, obtidas pelo método do CASE para cada valor de (J_c). Para a estaca P17D-G, cujo valor da resistência mobilizada (na recravação) fornecido pelo CAPWAP é de 5296,5KN, considerando a faixa de variação entre 5455,2 e 4529,0KN, significa uma variação entre um aumento de 3% e uma diminuição de 15%. Observa-se que no caso de usar ' J_c ' próximo á unidade a resistência total mobilizada torna-se pequeno. Este fato indica a influência da escolha do valor de ' J_c ' na interpretação do ECD.

Tabela 4.2 – Relação entre o coeficiente de amortecimento (J_c) e a resistência mobilizada da estaca P17D-G.

Estaca	Tipo de Solo	Coeficiente de amortecimento (J_c)	Resistência Mobilizada (RMX) (KN)
P17D-G	Areia Pura	0,10-0,15	5455,2 - 5397,3
	Areia Siltosa	0,15-0,25	5397,3 - 5281,6
	Silte	0,25-0,40	5281,6 - 5107,9
	Argila Siltosa	0,40-0,70	5107,9 - 4760,6
	Argila	0,70-1,00	4760,6 - 4529,0

A partir da análise do CAPWAP que calcula a resistência por outro método, este valor é comparado com os valores do método de CASE (RMX) para determinar o damping (J_c) correto, ou seja, o damping cuja resistência calculada pelo método CASE é correspondente à resistência calculada pelo CAPWAP.

Na tabela do anexo (6.2), o resultado do CAPWAP deu 5296,5 kN. O método CASE resulta nesta resistência para um damping (J_c) de 0,24 (ver figura 4.10). Esta comparação é necessária, pois antes da realização do ensaio, o valor de ' J_c ' é estimado com base nas sondagens, para que o equipamento PDA possa calcular a resistência da estaca em tempo real pelo método CASE (método simples e rápido), sendo possível desta maneira tomar algumas decisões durante o ensaio e acompanhar o comportamento da estaca ao longo da evolução do ensaio, mesmo que de maneira aproximada.