

5

Previsão de resistência mobilizada pelas fórmulas dinâmicas

As fórmulas dinâmicas são os métodos mais antigos e mais controversos que se utilizam para a previsão da resistência mobilizada do conjunto estaca-solo. Estas estão baseadas sobre os princípios de conservação de energia e quantidade de movimento. O uso destas fórmulas é vantajoso, pois estas podem ser empregadas durante uma cravação de uma estaca, sem necessidade de estimar ou considerar as propriedades do solo. Outra vantagem que possuem é que são simples e direta, relacionando a resistência do solo à penetração da estaca com a energia desenvolvida pelo golpe de martelo, obtendo assim uma resistência mobilizada.

Para o presente trabalho foi considerado a aplicação das fórmulas dinâmicas apresentadas no item anterior (2.3) tais como as fórmulas de Brix, Weisbach, Holandeses, Engineering News Record (ENR), Hiley, Dinamarqueses e Janbu, estas fórmulas utilizam a nega como dado de entrada. Além disso, foi incluída a fórmula que considera o repique elástico como a fórmula de Chellis (1961).

Com a finalidade de determinar a previsão da resistência mobilizada das estacas através das fórmulas dinâmicas, as estacas foram classificadas de acordo com o tipo de execução (escavadas e cravadas) ver tabela (5.1).

Vale salientar que as fórmulas dinâmicas foram desenvolvidas apenas para estacas cravadas, já que estas procuram relacionar a nega com a resistência à cravação (R). Essa resistência não é a resistência estática mobilizada (R_s), mas uma combinação das resistências estática e dinâmica/viscosa ($R=R_s+R_d$). Por isso, para a obtenção da carga admissível, aplica-se um fator de correção (varia de 2 a 10) que fará o devido desconto da resistência dinâmica, (Velloso e Lopes, 2010). Esta situação permitiu fazer uma comparação dos resultados da previsão pelas fórmulas dinâmicas entre os valores da resistência estática mobilizada obtida pelo CAPWAP.

No caso de estacas escavadas in situ (ou moldadas in loco) poderíamos adaptar as fórmulas dinâmicas?. Esta situação será discutida na última parte desta dissertação de acordo aos resultados obtidos na previsão. Segundo (De Rosa, 2000) a rigor as fórmulas dinâmicas podem ser usadas para estacas moldadas ‘in loco’ embora logicamente após a cura. Entretanto, por correlações há possibilidade de serem usados parâmetros diferentes em cada estaca.

Tabela 5.1 - Seleção dos tipos de estacas ensaiadas, de acordo ao tipo de execução.

| Estacas cravadas ou de deslocamento | | | | | Estacas escavadas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|---|------|-------------------|------------------|------|--------------|---------------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| Estacas metálicas tipo trilho | | | Estacas pré fabricadas de concreto armado ou pré-moldadas | | Est. Raiz | Estaca tipo Raiz | | Est. Exc. Em | Estaca Hélice | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 134A | 132A | 127A | 126A | 121A | 112A | 113A | 120A | 121A | 112A | E130 | E123 | E101 | E84 | E70 | E64 | E53 | E10 | E10 | E01 | E4A | E3 | E1 | C33 | B59 | P26D-B | P25D-A | P24D-B | P17D-G | P17D-I |

Os parâmetros inerentes às fórmulas dinâmicas encontram-se na tabela (5.2). Alguns coeficientes e constantes (iniciais) foram adotadas para cada fórmula dinâmica de acordo à bibliografia técnica existente.

Para a fórmula de Hiley foi considerado um valor de eficiência do martelo ‘ $e_f = 0,80$ ’, coeficiente de restituição ‘ $n = 0,55$ ’, compressão temporária de capacete, cepo e coxim ($C_1 = 0,30$) e, compressão elástica temporária do solo ($C_3 = 0,25$ cm) para todas as estacas, conforme às tabelas (2.2 e 2.3) encontradas em Chellis (1961).

Para as fórmulas de Janbu e Dinamarqueses foram considerados uma eficiência do martelo ‘ $e_f = 0,70$ ’ e, no caso da fórmula de Weisbach um valor de ‘ $e_f = 1$ ’. Para a previsão da resistência mobilizada pela fórmula de Chellis o valor da compressão elástica da estaca ‘ C_2 ’ foi considerado a partir da análise do método CASE.

Tabela 5.2 – Parâmetros de obtenção da previsão da resistência mobilizada pelas fórmulas dinâmicas.

| Por tipo de execução | | Nº de Estacas | Comprimento abaixo dos sensores "L" (m) | Comprimento cravado "Lc" (m) | Altura de queda (m) | Numero de Golpe(N) | Peso do Martelo "W" (Tnf) | Peso da Estaca "P" (tnf) | Diametro da estaca (cm) | Nega (cm) | Area (cm ²) | E ¹ "dinâmico" Mpa | Peso específico (γ) KN/m ³ | Resistência à compressão (Fck) Mpa |
|----------------------|-------------------------------|------------------------------|--|------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Estacas Escavadas | Estaca Hélice contínua | P17D-I | 11,70 | 11,50 | 120 | 3,00 | 8,0 | 10,63 | 70 | 0,30 | 3848,45 | 35000,00 | 23,60 | 30,00 |
| | | P17D-G | 11,80 | 11,60 | 160 | 5,00 | 8,0 | 10,72 | 70 | 0,00 | 3848,45 | 36603,30 | 23,60 | 30,00 |
| | | P24D-B | 12,30 | 12,00 | 100 | 3,00 | 8,0 | 8,21 | 60 | 0,00 | 2827,43 | 35000,00 | 23,60 | 30,00 |
| | | P25D-A | 13,70 | 13,40 | 140 | 3,00 | 8,0 | 12,44 | 70 | 0,10 | 3848,45 | 38504,50 | 23,60 | 30,00 |
| | | P26D-B | 12,70 | 12,40 | 120 | 4,00 | 8,0 | 8,47 | 60 | 0,20 | 2827,43 | 29480,00 | 23,60 | 30,00 |
| | Estaca tipo Raiz | B59 | 30,54 | 18,94 | 50 | 1,00 | 12,0 | 82,63 | 110 | 0,00 | 10406,37 | 40000,00 | 26,00 | 40,00 |
| | | C53 | 25,34 | 14,35 | 80 | 3,00 | 12,0 | 68,56 | 110 | 0,00 | 10406,37 | 40000,00 | 26,00 | 40,00 |
| | | E1 TR-H32A(54)'' | 10,70 | 10,30 | 120 | 5,00 | 2,0 | 3,33 | 41 | 0,05 | 1320,25 | 30000,00 | 23,60 | 40,00 |
| | | E3 CT-TR-H32Ap/TR-H29 | 11,70 | 11,30 | 140 | 5,00 | 2,0 | 3,65 | 41 | 0,20 | 1320,25 | 30000,00 | 23,60 | 40,00 |
| | | E4A CT-TR-H32Ap/TR-H32A | 14,60 | 14,20 | 60 | 2,00 | 4,0 | 4,55 | 41 | 0,15 | 1320,25 | 30000,00 | 23,60 | 40,00 |
| | | E4A CT-TR-H32Ap/TR-H29 | 11,70 | 11,30 | 40 | 1,00 | 4,0 | 3,65 | 41 | 0,00 | 1320,25 | 30000,00 | 23,60 | 40,00 |
| | | E01 | 22,00 | 20,00 | 80 | 5,00 | 2,0 | 5,93 | 35 | 0,10 | 1141,18 | 29000,00 | 23,60 | 30,00 |
| | | E10 | 23,00 | 21,00 | 50 | 2,00 | 2,0 | 6,19 | 35 | 0,05 | 1141,18 | 29000,00 | 23,60 | 30,00 |
| | | Estacas cravadas de concreto | Estacas pré fabricadas de concreto amado ou pré-moldadas | E10 | 29,10 | 28,00 | 80 | 3,00 | 7,0 | 5,87 | 42 | 0,10 | 854,51 | 35000,00 |
| E53 | 29,70 | | | 28,50 | 100 | 4,00 | 7,0 | 5,99 | 42 | 0,00 | 854,51 | 35000,00 | 23,60 | 35,00 |
| E64 | 30,50 | | | 29,30 | 80 | 3,00 | 7,0 | 6,15 | 42 | 0,00 | 854,51 | 35000,00 | 23,60 | 35,00 |
| E70 | 29,60 | | | 29,00 | 80 | 3,00 | 7,0 | 5,97 | 42 | 0,00 | 854,51 | 35000,00 | 23,60 | 35,00 |
| E84 | 30,30 | | | 29,00 | 100 | 4,00 | 7,0 | 6,11 | 42 | 0,10 | 854,51 | 35000,00 | 23,60 | 35,00 |
| E101 | 10,20 | | | 9,00 | 40 | 1,00 | 7,0 | 2,06 | 42 | 0,10 | 854,51 | 35000,00 | 23,60 | 35,00 |
| E123 | 9,20 | | | 8,00 | 100 | 4,00 | 7,0 | 1,86 | 42 | 0,70 | 854,51 | 35000,00 | 23,60 | 35,00 |
| E130 | 9,50 | | | 8,70 | 60 | 2,00 | 7,0 | 1,92 | 42 | 0,00 | 854,51 | 35000,00 | 23,60 | 35,00 |
| Estacas metálicas | Estacas metálicas tipo trilho | | | 112A TR68 | 15,10 | 14,40 | 100 | 2,00 | 2,6 | 1,00 | 0 | 0,00 | 86,00 | 206842,70 |
| | | 113A TR68 | 14,70 | 14,00 | 100 | 2,00 | 2,6 | 0,98 | 0 | 0,00 | 86,00 | 206842,70 | 77,29 | |
| | | 120A TR68 | 14,00 | 13,20 | 100 | 2,00 | 2,6 | 0,93 | 0 | 0,00 | 86,00 | 206842,70 | 77,29 | |
| | | 121A TR68 | 14,10 | 13,40 | 80 | 1,00 | 2,6 | 0,94 | 0 | 0,00 | 86,00 | 206842,70 | 77,29 | |
| | | 126A TR68 | 14,90 | 14,20 | 100 | 2,00 | 2,6 | 0,99 | 0 | 0,00 | 86,00 | 206842,70 | 77,29 | |
| | | 127A TR68 | 15,20 | 14,20 | 100 | 2,00 | 2,6 | 1,01 | 0 | 0,00 | 86,00 | 206842,70 | 77,29 | |
| | | 132A TR57 Duplo | 15,20 | 14,20 | 160 | 5,00 | 2,6 | 1,48 | 0 | 0,00 | 126,00 | 206842,70 | 77,29 | |
| | | 134A TR57 Duplo | 13,60 | 12,80 | 120 | 2,00 | 2,6 | 1,32 | 0 | 0,00 | 126,00 | 206842,70 | 77,29 | |

(1) E¹"_D": Módulo de elasticidade dinâmico do concreto (CAPWAP)

F.C. : Fator de correção adotado

Hiley : FC = 2

Weisbach : FC = 2,6

Janbu : F.C = 2

Dinamarqueses : F.C = 2

Holandeses : F.C = 10

ef = 1

Gates : F.C = 3

Engineering : F.C = 6

Chellis : C2 = C3 - K

K = Repique

Brix : F.C = 5

ef = 0,75

ef = 1

DMX = K + S

S = nega

ef = 1

DMX = Deslocamento máximo

Tabela 5.3 - Resultados da aplicação das fórmulas dinâmicas.

| Estacas escavadas in situ | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--------------|------------|-------------|----------------|-------------|---------------------|------------------|------------|-------------|-----------|---------------|
| Tipo de Estacas | CAPWAP (Tnf) | CASE (Tnf) | Hiley (Tnf) | Weisbach (Tnf) | Janbu (Tnf) | Dinamarqueses (Tnf) | Holandases (Tnf) | Brix (Tnf) | Gates (Tnf) | ENR (Tnf) | Chellis (Tnf) |
| P17D-I | 551,61 | 555,90 | 283,07 | 457,25 | 312,31 | 402,11 | 137,41 | 156,81 | 543,29 | 56,34 | 1,51 |
| P17D-G | 529,65 | 533,90 | 466,50 | 678,14 | 534,82 | 737,59 | 5.470,09 | 6.264,88 | 1.109,76 | 83,99 | 649,16 |
| P24D-B | 215,35 | 228,30 | 315,01 | 441,80 | 357,38 | 480,53 | 3.948,18 | 3.999,33 | 877,34 | 52,49 | 605,78 |
| P25D-A | 519,48 | 515,70 | 365,46 | 564,30 | 417,46 | 563,72 | 438,36 | 533,58 | 732,58 | 70,71 | 378,83 |
| P26D-B | 201,40 | 211,70 | 277,41 | 388,29 | 291,64 | 370,45 | 233,15 | 239,80 | 593,10 | 58,39 | 73,85 |
| B59 | 2.182,18 | - | 243,27 | 624,61 | 359,77 | 679,36 | 760,86 | 1.328,75 | 759,80 | 39,37 | 1.629,79 |
| C53 | 1.898,39 | - | 383,30 | 907,68 | 550,68 | 987,24 | 1.429,99 | 2.433,97 | 961,08 | 62,99 | 1.382,41 |
| E1 TR-H32A | 95,45 | 97,50 | 94,78 | 158,01 | 117,85 | 162,36 | 180,11 | 225,06 | 381,69 | 15,44 | 142,55 |
| E3 CT-TR-H3 | 44,46 | 39,60 | 85,57 | 145,56 | 99,13 | 134,47 | 49,56 | 64,03 | 320,31 | 17,03 | 342,00 |
| E4A CT-TR-H3 | 172,60 | 174,60 | 83,38 | 125,56 | 93,81 | 120,21 | 74,85 | 79,67 | 314,22 | 14,87 | 33,99 |
| E4A CT-TR-H3 | 136,76 | 136,90 | 83,30 | 128,81 | 105,20 | 140,10 | 836,60 | 798,33 | 392,36 | 10,50 | 33,75 |
| E01 | 120,02 | 120,02 | 46,62 | 82,37 | 54,55 | 82,14 | 40,35 | 60,35 | 276,89 | 10,10 | 105,26 |
| E10 | 169,58 | 169,58 | 34,69 | 65,32 | 43,88 | 67,14 | 48,84 | 73,83 | 246,38 | 6,44 | - |
| Estacas cravadas de concreto armado | | | | | | | | | | | |
| Tipo de Estacas | CAPWAP (Tnf) | CASE (Tnf) | Hiley (Tnf) | Weisbach (Tnf) | Janbu (Tnf) | Dinamarqueses (Tnf) | Holandases (Tnf) | Brix (Tnf) | Gates (Tnf) | ENR (Tnf) | Chellis (Tnf) |
| E10 | 192,71 | 191,60 | 109,26 | 128,99 | 104,12 | 134,74 | 304,58 | 277,84 | 518,01 | 35,35 | 245,58 |
| E53 | 281,29 | 274,20 | 127,49 | 147,42 | 120,98 | 160,34 | 3.772,13 | 3.478,84 | 820,68 | 45,93 | 210,99 |
| E64 | 250,24 | 251,60 | 110,88 | 130,05 | 106,51 | 141,44 | 2.980,99 | 2.788,30 | 734,04 | 36,75 | 223,05 |
| E70 | 167,27 | 150,50 | 111,86 | 130,72 | 107,29 | 142,17 | 3.022,36 | 2.782,34 | 734,04 | 36,75 | 171,89 |
| E84 | 291,46 | 267,30 | 121,60 | 142,23 | 114,71 | 149,27 | 373,76 | 348,39 | 579,16 | 44,19 | 199,91 |
| E101 | 212,57 | 199,20 | 125,30 | 153,63 | 127,54 | 152,40 | 216,34 | 98,38 | 366,29 | 17,68 | 287,31 |
| E123 | 172,18 | 172,80 | 167,84 | 195,25 | 143,20 | 162,30 | 79,01 | 33,17 | 375,05 | 36,01 | 105,32 |
| E130 | 153,36 | 152,40 | 179,26 | 206,68 | 178,71 | 224,80 | 3.295,96 | 1.418,89 | 635,70 | 27,56 | 426,17 |
| Estacas cravadas metálicas | | | | | | | | | | | |
| Tipo de Estacas | CAPWAP (Tnf) | CASE (Tnf) | Hiley (Tnf) | Weisbach (Tnf) | Janbu (Tnf) | Dinamarqueses (Tnf) | Holandases (Tnf) | Brix (Tnf) | Gates (Tnf) | ENR (Tnf) | Chellis (Tnf) |
| 112A TR68 | 142,08 | | 86,20 | 97,48 | 83,42 | 106,03 | 1.877,78 | 1.043,21 | 500,16 | 17,06 | 217,66 |
| 113A TR68 | 137,06 | | 87,39 | 98,86 | 84,66 | 107,53 | 1.888,27 | 1.033,80 | 500,16 | 17,06 | |
| 120A TR68 | 132,27 | | 90,02 | 101,81 | 87,35 | 110,74 | 1.915,01 | 1.009,04 | 500,16 | 17,06 | |
| 121A TR68 | 108,75 | | 78,35 | 90,38 | 77,51 | 98,31 | 1.527,68 | 811,31 | 447,36 | 13,65 | |
| 126A TR68 | 120,87 | | 86,79 | 98,16 | 84,04 | 106,77 | 1.883,01 | 1.038,54 | 500,16 | 17,06 | |
| 127A TR68 | 149,96 | | 86,61 | 98,16 | 83,98 | 106,77 | 1.872,58 | 1.047,81 | 500,16 | 17,06 | |
| 132A TR57 Du | 168,41 | | 127,90 | 150,30 | 126,47 | 163,47 | 2.650,98 | 1.923,26 | 632,66 | 27,30 | |
| 134A TR57 Du | 212,35 | | 114,22 | 137,09 | 116,00 | 149,11 | 2.069,39 | 1.393,67 | 547,90 | 20,47 | |

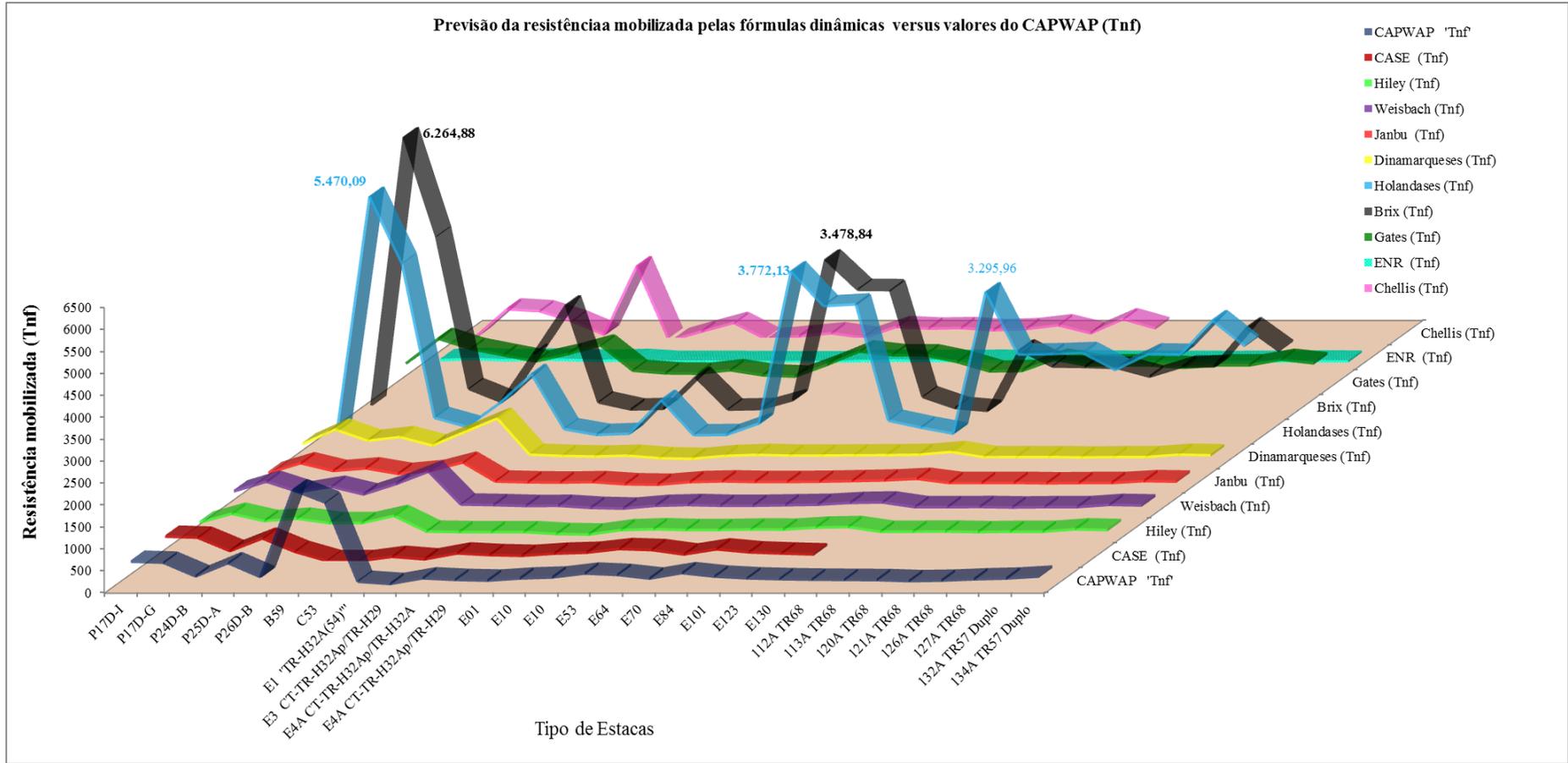


Figura 5.1- Comparação das fórmulas dinâmicas e resultados do (CAPWAP), para as diferentes estacas ensaiadas.

Como se observa da figura (5.1) comparou-se valores de resistências mobilizadas obtidas a partir das fórmulas dinâmicas e resultados do CAPWAP, para cada tipo de estaca em geral. Foi observada uma grande dispersão nos resultados obtidos pelas fórmulas de Brix, Gates e Holandeses devido a que são extremamente sensíveis aos valores da nega e à energia aplicada. Como se podem ver, estes valores não apresentam semelhança de forma com os valores do ensaio de carregamento dinâmico (CAPWAP) comparadas para cada estaca.

No presente trabalho, a previsão das fórmulas dinâmicas de Gates, Holandeses e, Brix não foram usadas nas análises estatísticas, devido a que se tornam indeterminadas para valores de nega 's' igual a zero (para efeitos de comparação o valor da nega foi considerado de 0,01cm). Ademais, a fórmula da Engineering News 'ENR' também não foi incluída na presente análise, por sua simples formulação em que foi estabelecida, mesmo assim visto na tabela (5.3) subestimam a previsão da resistência mobilizada em todos os casos.

Da mesma forma, a fórmula de Chellis não foi considerada para as seguintes análises, já que na previsão da resistência mobilizada foram usados parâmetros calculados a partir do método de CASE. Foi considerado o valor o deslocamento máximo da estaca durante o golpe 'DMX=K+S', este valor é obtido pela dupla integração da aceleração em função do tempo, ou seja, o método do CASE apresenta um valor de repique e nega calculado a partir de integrações numéricas, que poderiam ter um erro de integração. Esta situação foi observada para a estaca raiz 'E4A', cuja previsão da resistência foi negativa para valores de 'DMX = 0,44cm, C3 =0,37cm e C2 = -0,09cm'.

5.1.

Comparação dos resultados das fórmulas dinâmicas, com os valores do CAPWAP

Para um estudo mais detalhado sobre a aplicabilidade das fórmulas dinâmicas, equações (2.3.4), (2.3.9), (2.3.11) e (2.3.12) na previsão da resistência mobilizada das estacas, foi tomado em conta, a classificação das estacas por tipo de execução (escavadas e cravadas). Assim foi possível determinar se o tipo de estaca contribui em qualquer ‘distorção’ na previsão da resistência mobilizada, subestimando ou superestimando estes valores.

Nas figuras apresentadas a seguir, (5.2) a (5.3), se mostram a resistências mobilizadas obtidas a partir das fórmulas dinâmicas comparadas com os valores de resistência obtidos dos resultados do ensaio de carregamento dinâmico (CAPWAP), onde a previsão da resistência mobilizada (T_{nf}) derivados pelas fórmulas dinâmicas se apresentam no eixo “X”, enquanto à resistência mobilizada calculada pelo ensaio de carregamento dinâmico (CAPWAP), se apresentam no eixo “Y”.

Idealmente, se os valores da previsão pelas fórmulas dinâmicas correspondem aos valores da resistência mobilizada obtida pelo ensaio de carregamento dinâmico (CAPWAP) exatamente, então todos os pontos dos dados ficariam sobre a linha vermelha imaginária de inclinação 1:1 (45°), dando assim a equação de uma linha de melhor ajuste como: ‘ $Y = 1X + 0$ ’ e, um coeficiente de determinação igual a 1. Um resumo das equações de reta e coeficientes de determinação é apresentado na tabela (5.4).

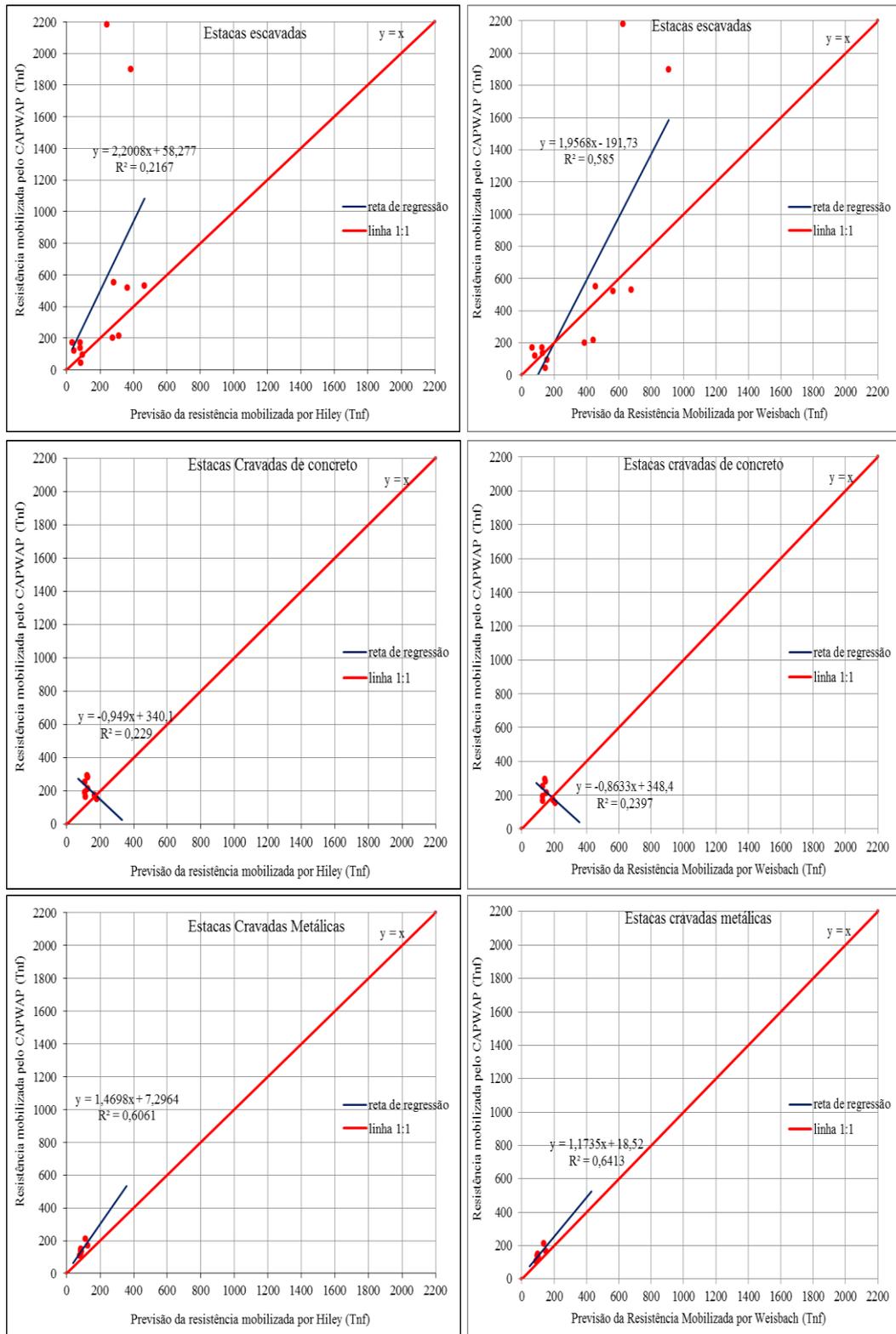


Figura 5.2 - Previsão da resistência mobilizada por Hiley, Weisbach vs. resistência mobilizada pelo CAPWAP.

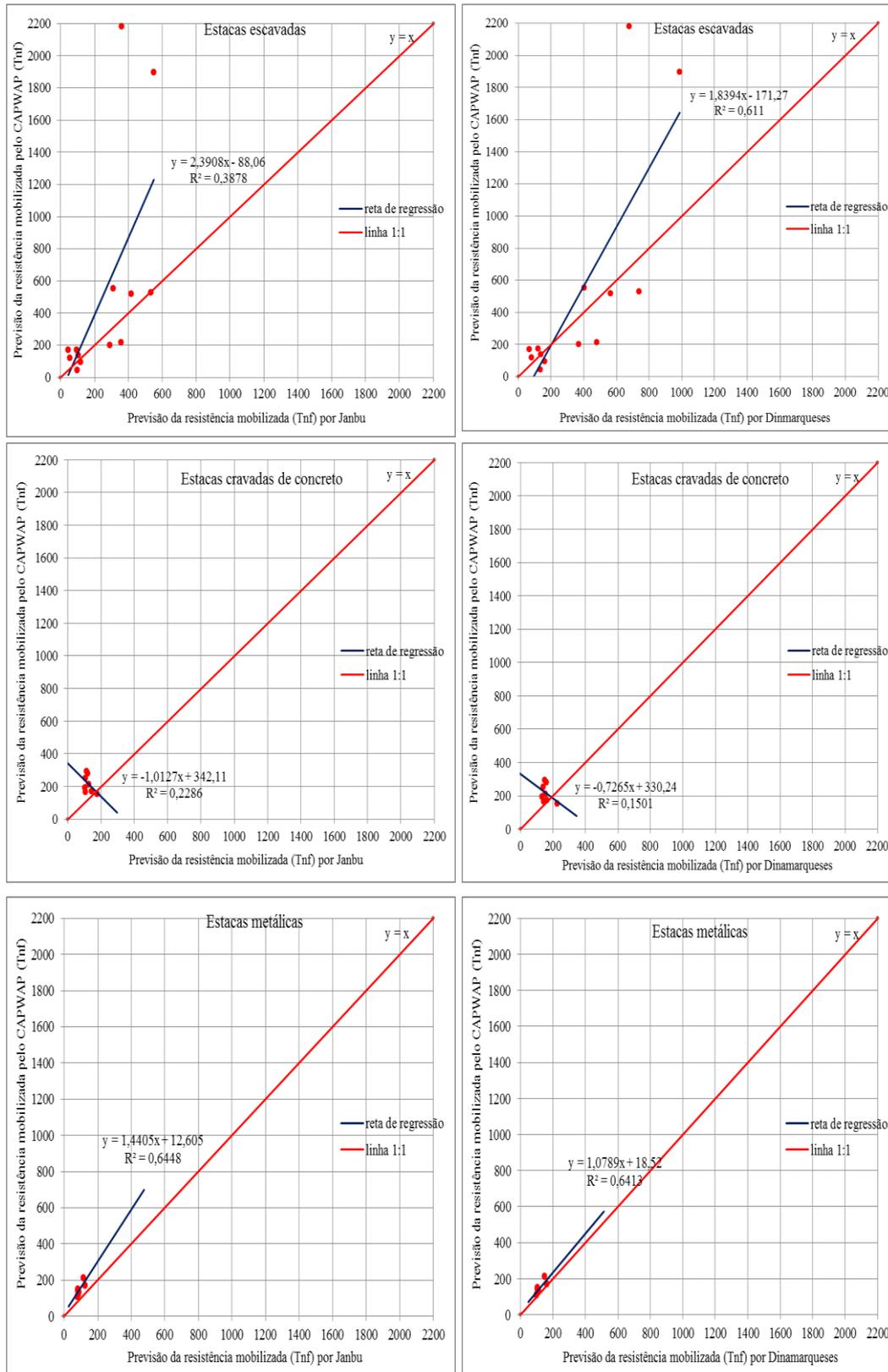


Figura 5.3 - Previsão da resistência mobilizada por Janbu, Dinmarqueses vs. resistência mobilizada pelo CAPWAP.

Tabela 5.4 - Resumo das retas de melhor ajuste e do coeficiente de determinação dos gráficos de resistência mobilizada.

| Tipo de estacas | Hiley | Weisbach | Janbu | Dinamarqueses |
|----------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Estacas escavadas | $y = 2,2008x + 58,277$ | $y = 1,9568x - 191,73$ | $y = 2,3908x - 88,06$ | $y = 1,8394x - 171,27$ |
| | $R^2 = 0,2167$ | $R^2 = 0,585$ | $R^2 = 0,3878$ | $R^2 = 0,611$ |
| Estacas cravadas C.A | $y = -0,949x + 340,1$ | $y = -0,8633x + 348,4$ | $y = -1,0127x + 342,11$ | $y = -0,7265x + 330,24$ |
| | $R^2 = 0,229$ | $R^2 = 0,2397$ | $R^2 = 0,2286$ | $R^2 = 0,1501$ |
| Estacas metálicas | $y = 1,4698x + 7,2964$ | $y = 1,1735x + 18,52$ | $y = 1,4405x + 12,605$ | $y = 1,0789x + 18,52$ |
| | $R^2 = 0,6061$ | $R^2 = 0,6413$ | $R^2 = 0,6448$ | $R^2 = 0,6413$ |

Dada que a situação ideal não ocorre, as equações das retas de melhor ajuste são importantes para determinar qualitativamente a ‘distorção’ criada a partir de cada fórmula dinâmica utilizada, mostrando se a fórmula específica tende a subestimar ou superestimar os valores da resistência mobilizada.

No caso em que o coeficiente angular seja maior que a unidade, sobre a média, a fórmula dinâmica subestima os valores da resistência mobilizada da estaca e, contrariamente, quando é menor, a fórmula dinâmica superestima estes valores.

O intercepto “y” dá uma indicação do grau de acurácia e precisão da linha de tendência com a linha de inclinação 1:1. Quanto mais se afasta do intercepto zero, o grau de ajuste é pior. Do mesmo modo, o valor do coeficiente de determinação ($R^2=1$) dá uma indicação do grau de relacionamento do conjunto de dados, quanto menor é o valor de ‘R²’, menor é a correlação, havendo assim uma grande quantidade de variação de valores.

Por outro lado, se todos os pontos dos dados ficassem sobre uma linha reta (vermelha), o valor de ‘R²’ atingiria seu valor limite superior, que é a unidade e, a variação dos dados seria mínima.

A partir dos gráficos (5.2) a (5.3) mostrados anteriormente se percebe que em geral, para estacas escavadas as fórmulas dinâmicas parecem subestimar os valores de resistência mobilizada com maior grau de dispersão. No caso de estacas cravadas de concreto a previsão da resistência mobilizada é subestimada com grande dispersão dos dados. Da mesma forma em estacas metálicas a previsão pelas fórmulas dinâmicas, subestimam ligeiramente o valor da resistência mobilizada, com um grau de dispersão pequeno. Todas as fórmulas obtiveram boa

correlação para o caso de estacas metálicas com coeficiente de determinação média de 63%.

A variabilidade dos resultados indicados acima depende da influência do equipamento de cravação, tais como: Peso do martelo, energia nominal do martelo e as diferentes condições locais nas que foram ensaiadas as estacas para os diferentes tipos de solo.

Observa-se que a correlação encontrada em algumas fórmulas dinâmicas com os valores do CAPWAP poderia ser afetada pelo número limitado de dados de ensaios das estacas disponíveis neste estudo, onde possivelmente aumentando o conjunto de dados aumentaria também a confiabilidade e precisão.

5.1.1. Análise estatística

Os resultados de uma análise estatística são resumidos nas tabelas (5.5) a (5.6) abaixo e, são baseados na análise das 29 estacas ensaiadas, os quais foram classificados pelo tipo de execução (escavadas e cravadas).

Tabela 5.5 - Valores da média (u), desvio padrão, coeficiente de correlação e, coeficiente de variação da relação das fórmulas dinâmicas sobre os valores estimados pelo CAPWAP.

| Tipo de Estaca | Parâmetro estatístico | Hiley | Weisbach | Janbu | Dinamarqueses |
|------------------------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| Estacas escavadas | Média (u) | 0,76 | 1,20 | 0,88 | 1,20 |
| | Desvio padrão | 0,55 | 0,84 | 0,62 | 0,80 |
| | Coef. de variação | 0,73 | 0,70 | 0,70 | 0,67 |
| | Coef. de correlação | 0,47 | 0,76 | 0,62 | 0,78 |
| Estacas cravadas de concreto | Média (u) | 0,66 | 0,77 | 0,63 | 0,79 |
| | Desvio padrão | 0,27 | 0,31 | 0,26 | 0,31 |
| | Coef. de variação | 0,41 | 0,40 | 0,41 | 0,39 |
| | Coef. de correlação | - 0,48 | - 0,49 | - 0,48 | - 0,39 |
| Estacas metálicas | Média (u) | 0,65 | 0,75 | 0,64 | 0,82 |
| | Desvio padrão | 0,08 | 0,09 | 0,08 | 0,10 |
| | Coef. de variação | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| | Coef. de correlação | 0,78 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |

Na tabela (5.5) observa-se que as fórmulas dinâmicas de Hiley, Weisbach, Janbu e Dinamarqueses para o caso de estacas cravadas de concreto e metálicas, a confiança destas fórmulas são similares ao banco de dados da tabela (2.7) de Poulos e Davis.

A tabela (5.5) compara a previsão da resistência mobilizada pelas fórmulas dinâmicas com os resultados dos ensaios de carregamento dinâmico (CAPWAP) dentro de uma relação. Idealmente uma relação igual a '1' indica uma perfeita previsão da resistência mobilizada da estaca, enquanto valores maiores que '1' indicam que a previsão é superestimada e, aqueles menores a '1', indicam que a previsão é subestimada.

A média (μ), desvio padrão (s) e o coeficiente de variação (CV), para a comparação da relação na previsão da resistência mobilizada pelas fórmulas dinâmicas e resultados do CAPWAP, são usados como medidas da acurácia e precisão dos métodos de previsão. O valor da média (μ) quantifica a tendência total para o método de previsão, se ela subestima ou superestima a resistência mobilizada. Valores de média próximos à unidade, fazem um melhor ajuste. O desvio padrão (s) identifica o grau de dispersão associada com o método de previsão e quantifica a precisão deste método. Quando o desvio padrão é pequeno o conjunto de dados é homogêneo e quando é grande, é heterogêneo. O coeficiente de variação ($CV = s/\mu$) é um parâmetro mais usual para a comparação da precisão do método de previsão com valores de diferentes média (μ). Este coeficiente de variação (CV) é uma medida da acurácia e precisão. Valores baixos (CV) são associados com grandes graus de precisão. No caso ideal se o método de previsão exibe uma boa aproximação o valor da média será próximo a um (1) e um coeficiente de variação (CV), pequeno.

Na tabela (5.5) se observa a variação da média da relação desde um valor de 0,63 a 1,20, considerando o conjunto das 29 estacas.

A partir da tabela (5.5), para quantificar a dispersão, calculou-se a média, o desvio padrão e coeficiente de variação. A análise de resultados é descritas abaixo para cada tipo de estacas.

Estacas escavadas: Analisando a fórmula dos Dinamarqueses, superestimam a resistência mobilizada das estacas com um valor de média, $\mu = 1,20$ e um coeficiente de variação ($CV=0,67$). A dispersão associada à fórmula dos Dinamarqueses é pequena, em relação às outras fórmulas, seguida da fórmula de Janbu e Weisbach. Neste grupo de estacas a dispersão dos dados é grande.

Estacas cravadas de concreto: A fórmula dos Dinamarqueses subestima a resistência mobilizada, com um valor de média ($\mu=0,79$) e com um coeficiente de variação ($CV = 0,39$), menor que as outras fórmulas dinâmicas, esta fórmula exibe

um grau de dispersão menor. Neste grupo de estacas a previsão das resistências pelas fórmulas dinâmicas obtiveram coeficientes de determinação baixos (negativas), tal como foi visto na tabela (5.5).

Estacas metálicas: As fórmulas dos Dinamarqueses apresentam uma boa precisão e correlação da previsão com um valor de média ($\mu=0,82$), próximo à unidade e, um ‘CV = 0,12’, igual às outras fórmulas que estão associadas a um parecido grau de dispersão.

Além de avaliar a relação na previsão das resistências mobilizadas das estacas, com a resistência medida pelo CAPWAP, a diferença percentual das resistências estimadas pelas fórmulas dinâmicas e estimadas pelo CAPWAP também são pesquisadas. Isso foi feito visando garantir, se a diferença de porcentagem positiva corresponde à previsão da resistência mobilizada pelas fórmulas dinâmicas maior que a resistência medida pelo ensaio de carregamento dinâmico e, contrariamente valores negativos correspondem à estimativa da resistência mobilizada pelo ensaio dinâmico (CAPWAP) maior que a resistência obtida pelas fórmulas dinâmicas, desta forma utilizou-se a seguinte fórmula.

$$diferença(\%) = \left(\frac{resistência.por.Fórmulas.dinamicas - resistência.CAPWAP}{resistência.CAPWAP} \right) . 100$$

Tabela 5.6 - Valores da média da diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas e valores do CAPWAP.

| Tipo de Estaca | Diferença (%) | Hiley | Weisbach | Janbu | Dinamarqueses |
|------------------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Estacas escavadas | Média da dif. (%) | - 24,20 | 20,07 | - 12,06 | 20,27 |
| | Máximo | 92,46 | 227,39 | 122,97 | 202,46 |
| | Mínimo | - 88,85 | - 71,38 | - 83,51 | - 68,87 |
| Estacas cravadas de concreto | Média da dif. (%) | - 33,97 | - 22,66 | - 37,15 | - 20,98 |
| | Máximo | 16,89 | 34,77 | 16,53 | 46,58 |
| | Mínimo | - 58,28 | 30,23 | 25,17 | 28,43 |
| Estacas metálicas | Média da dif. (%) | - 34,52 | - 24,84 | - 35,87 | - 18,25 |
| | Máximo | - 24,06 | - 10,76 | - 24,90 | - 2,93 |
| | Mínimo | - 46,21 | - 35,44 | - 45,37 | - 29,78 |

A partir da tabela (5.6) é visto que as fórmulas de Weisbach e Dinamarqueses superestimam a previsão da resistência mobilizada nas estacas escavadas, sobre a média da diferença percentual. A fórmula de Janbu subestima

ligeiramente a resistência mobilizada, apresenta uma proximidade aos valores do CAPWAP, com uma média da diferença percentual igual de -12%.

Nas estacas cravadas de concreto, todas as fórmulas dinâmicas subestimam a previsão da resistência sobre a média da diferença percentual. E finalmente nas estacas metálicas a fórmula dos Dinamarqueses, seguido de Weisbach, subestimam levemente a previsão da resistência mobilizada e, no caso das fórmulas de Hiley e Janbu subestimam significativamente a previsão.

Para quantificar melhor a dispersão dos valores da previsão das resistências mobilizadas com os valores do CAPWAP, os resultados da diferença percentual são plotadas nos gráficos a seguir para cada grupo de estacas.

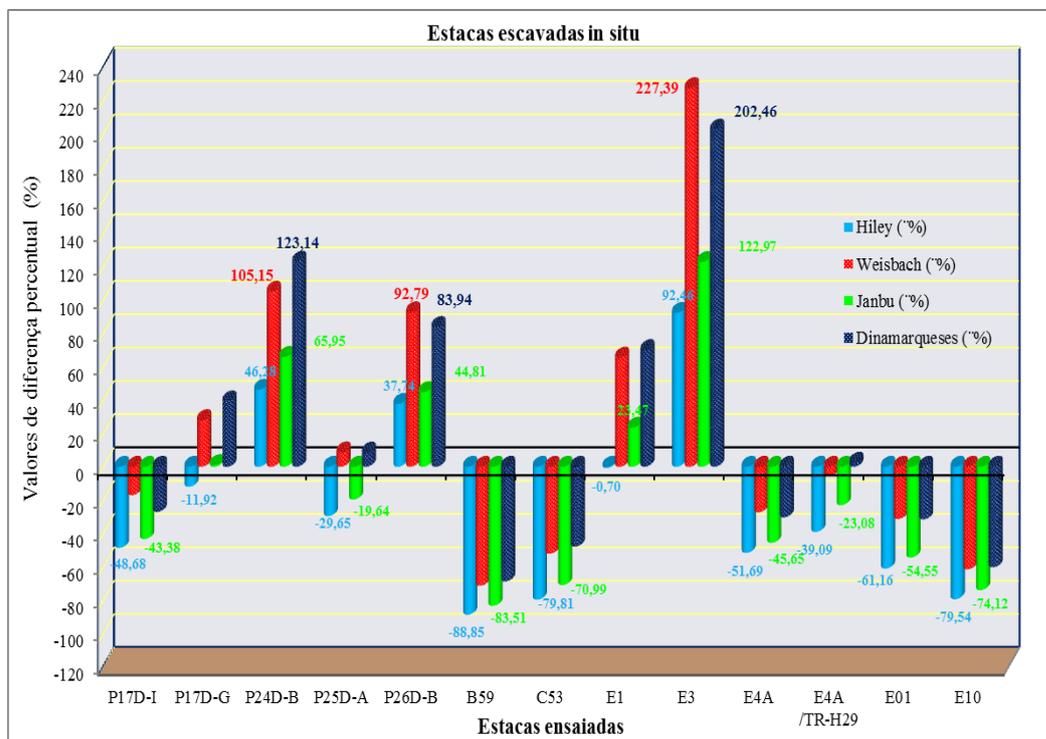


Figura 5.4 – Diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas com os valores do CAPWAP, para estacas escavadas.

A partir da figura (5.4) para estacas escavadas observa-se, que a comparação dos valores da previsão das fórmulas dinâmicas e valores do CAPWAP, apresentam uma grande dispersão nos resultados, em relação à dispersão dos resultados obtidos nas estacas cravadas de concreto e estacas metálicas. Este fato poder ser conferido observando os valores dos coeficientes de variação na tabela (5.5), que são maiores em relação às estacas cravadas. Considerando os valores da

diferença percentual, é evidente que os resultados das fórmulas dinâmicas de Hiley e Janbu são conservadores para o caso de estacas escavadas. Entretanto as fórmulas de Weisbach e Dinamarqueses apresentam uma dispersão maior nos resultados da previsão da resistência, geralmente superestimam.

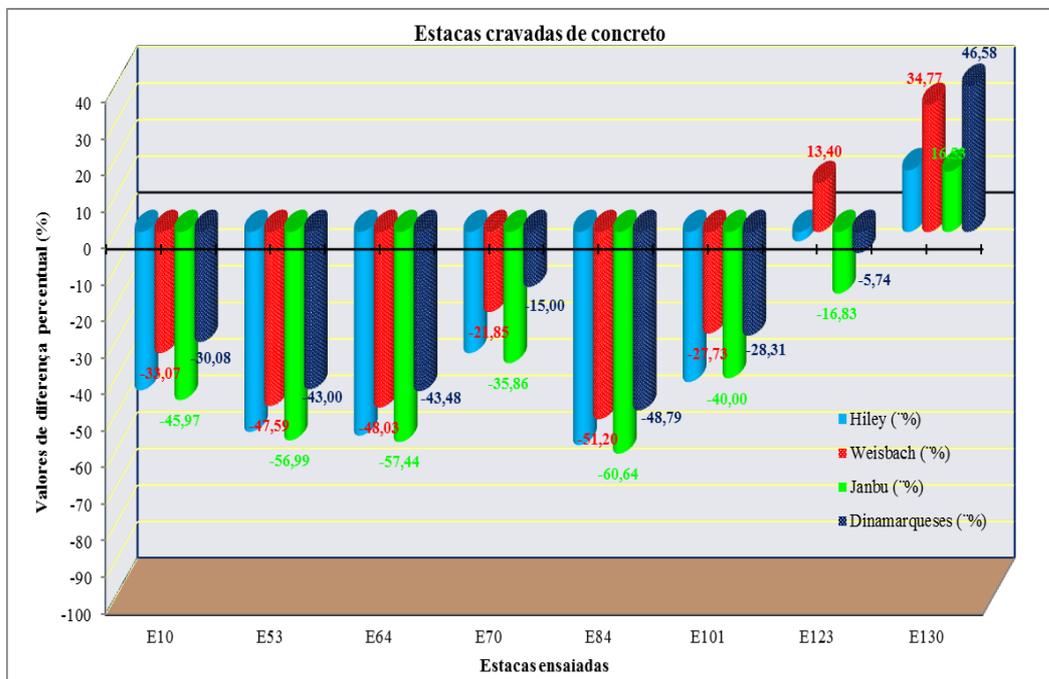


Figura 5.5 – Diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas com os valores do CAPWAP, para estacas cravadas de concreto.

Na figura (5.5) observa-se que para o caso de estacas cravadas de concreto, os resultados da previsão de todas as fórmulas dinâmicas, apresentam-se bastantes conservadores. A fórmula dos dinamarqueses é a que melhor proximidade tem com os valores do CAPWAP, com uma média da diferença percentual de (-20,98%). Porém esta fórmula nas estacas ‘E123’ e ‘E130’, superestimam previsão da resistência mobilizada devido a que são afetadas pelo menor comprimento cravado que possuem, em relação às outras estacas de concreto.

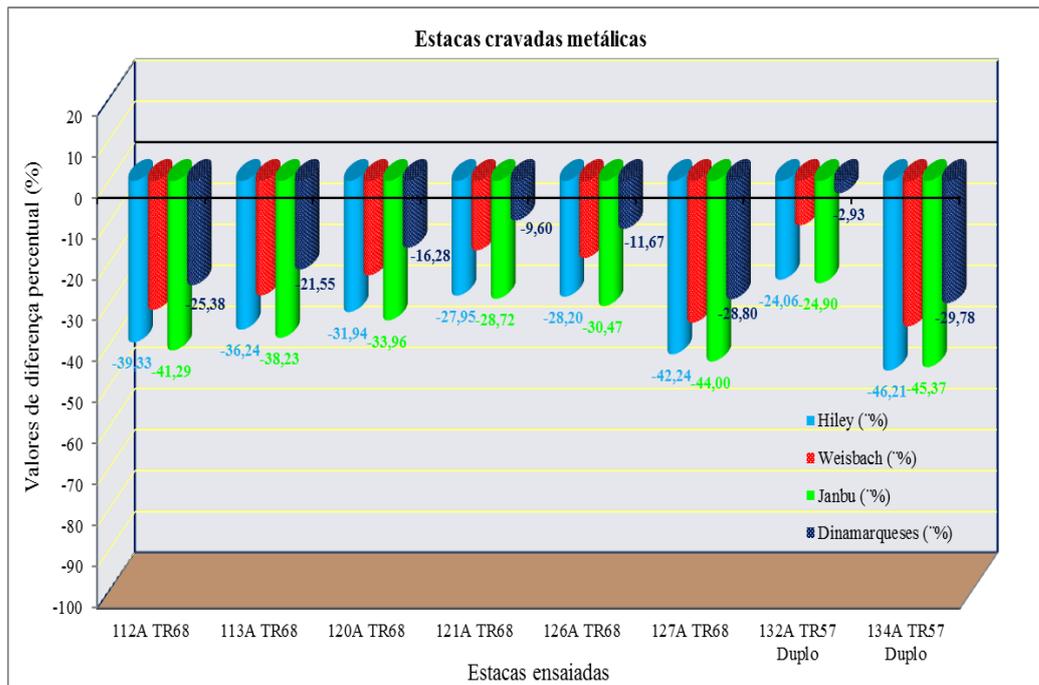


Figura 5.6 - Diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas com os valores do CAPWAP, para estacas metálicas.

Observando a figura (5.6), a fórmula dos Dinamarqueses tem maior proximidade com os valores do CAPWAP, com uma média de diferença percentual igual a -18% apesar de subestimar ligeiramente os valores da resistência mobilizada, seguido da proximidade da fórmula de Weisbach.

A partir da média da relação ($u = \text{Fórmulas dinâmicas}/\text{CAPWAP}$) e valores da diferença percentual das estacas escavadas, observou-se que a fórmula de Janbu apresenta uma boa aproximação com os valores do CAPWAP, além de apresentar um coeficiente de correlação ligeiramente menor ($r = 0,62$), média da relação ($\hat{u} = 0,88$) próximo à unidade, menor coeficiente de variação e, menor valor de variação percentual, seguido da fórmula dos Dinamarqueses.

Nas estacas cravadas a fórmulas dos Dinamarqueses apresentam uma aproximação com resultados do CAPWAP, com um valor da média ($\hat{u} = 0,79$) próximo à unidade, menor coeficiente de variação e diferença percentual, seguido da aproximação da fórmula de Weisbach.

A fórmula dos Dinamarqueses obteve uma melhor correlação, para o caso de estacas metálicas, com menor coeficiente de variação e diferença percentual e, maior coeficiente de correlação.

5.2. Recálculo da Previsão da resistência mobilizada pelas fórmulas dinâmicas

Em relação às fórmulas dinâmicas os cálculos realizados na primeira parte do trabalho, utilizando os parâmetros que constam na tabela (5.2). Verifica-se que há variações entre os métodos utilizados, que podem ser justificados pelos diferentes coeficientes de correção e parâmetros intrínsecos ao método. Porém para ajudar a ter uma melhora potencial e conferir qual fórmula dinâmica é a mais acurada para a previsão da resistência mobilizada das estacas, foi realizado uma análise da revisão dos parâmetros intrínsecos de cada fórmula dinâmica. A análise consiste em determinar que valores dos coeficientes são requeridos para que o resultado da previsão da resistência mobilizada seja próxima aos valores estimados pelo CAPWAP.

A fórmula de Hiley é a equação complexa e discutida até agora, com maior quantidade de variáveis únicas. Os parâmetros ajustados para a fórmula de Hiley são os coeficientes de compressão elástica do capacete, coxim, cepo “ C_1 ”; a compressão elástica do solo (C_3), eficiência do martelo (e_f) e, coeficiente de restituição (η). A partir das tabelas (2.2 e 2.3) dadas por Chellis (1961), estes parâmetros foram escolhidos para este trabalho.

Além disso, na fórmula de Hiley foi realizada uma análise utilizando a ferramenta “solver” do Microsoft Excel. É de salientar que só esta fórmula foi analisada pelo ‘solver’, pois esta apresenta mais coeficientes (C_1 , C_3 , e_f , e ‘ η ’) que variam em relação das outras fórmulas como Weisbach, Dinamarqueses e Janbu, que não foram analisadas pelo solver. Os resultados obtidos pelo ‘solver’ para a fórmula de Hiley foram comparados com os valores iniciais.

A análise consiste na variação dos coeficientes da fórmula de Hiley, considerada como uma equação complexa, para assim obter a mínima quantidade de erro produzido, aumentando o coeficiente de determinação r^2 , tendo um coeficiente angular da linha de tendência mais próximo à unidade. O erro normalizado é dado pela seguinte fórmula.

$$Erro.Normalizado = \frac{\sqrt{(Resistência.fórmula.dinâmica - Resistência.pelo.CAPWAP)^2}}{Resistência.fórmula.dinâmica}$$

Os resultados da análise pela ferramenta ‘solver’ para a fórmula de Hiley são apresentados na tabela (2.4) do anexo (2).

Para as fórmulas de Janbu, Dinamarqueses e Wesibach variou-se a eficiência do martelo de acordo com as tabelas dadas no anexo (01). Para encontrar a melhor correlação com os valores obtidos pelo CAPWAP, foi realizada uma análise de sensibilidade, usando a variação dos valores dos coeficientes para cada fórmula considerada, considerando o limite da faixa dos valores das constantes dadas nas tabelas de Chellis e outros estudados no item (2.3.3). Um resumo da variação dos valores dos coeficientes é mostrado na tabela (5.7)

Tabela 5.7 - Resumo dos coeficientes revisados para cada fórmula dinâmica

| Fórmula dinâmica | Hiley | | | | | Janbu | Dinamarqueses | Weisbach |
|-------------------|-------------------------------------|--|--|--|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| | ef : eficiência do martelo | η : coeficiente de restituição | C_3 (cm): compressão elástica do solo | C_1 (cm): compressão elástica do capacete, cepo e coxim. | | ef : eficiência do martelo | ef : eficiência do martelo | ef : eficiência do martelo |
| | | | | Concreto | Aço | | | |
| Valores iniciais | 0,80 | 0,55 | Foram consideradas das tabelas (2.2) e (2.3) | | | 0,7 | 0,7 | 1,0 |
| Valores revisados | | | | | | | | |
| Faixa de valores | 0,70 a 0,90 | 0,25 a 0,55 | 0 a 0,25 | 0,3 a 1,25 | 0,1 a 0,4 | 0,4a 0,90 | 0,7 a 0,90 | 1,0 a 0,7 |

Para o propósito da previsão da resistência mobilizada para a fórmula de Hiley, foi realizada uma análise de sensibilidade usando valores da compressão elástica do capacete, coxim e cepo (C_1), compressão elástica do solo (C_3), eficiência do martelo (e_f) e coeficiente de restituição (η), para poder refletir melhor as perdas das energias e, obter a melhor correlação para cada tipo de estacas (escavadas e cravadas).

A previsão da resistência mobilizada foi recalculada usando os valores revisados da tabela (5.7). Os resultados são mostrados nas figuras (5.7) ao (5.9) e, as equações da reta de melhor ajuste, são resumidas na tabela (5.8).

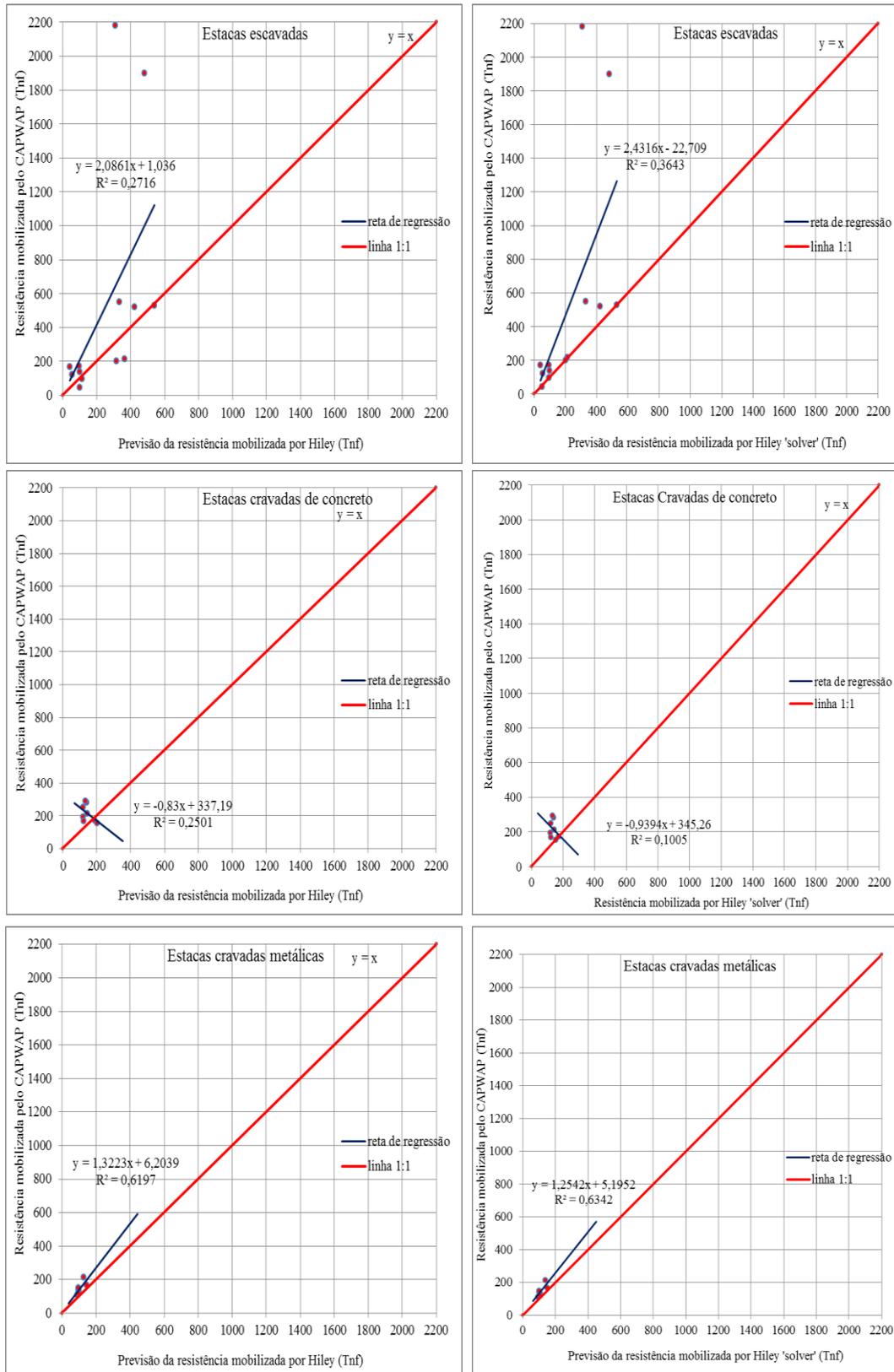


Figura 5.7 – Previsão da resistência mobilizada por Hiley, considerando a variação dos valores dos coeficientes revisados e usando a ferramenta 'solver'.

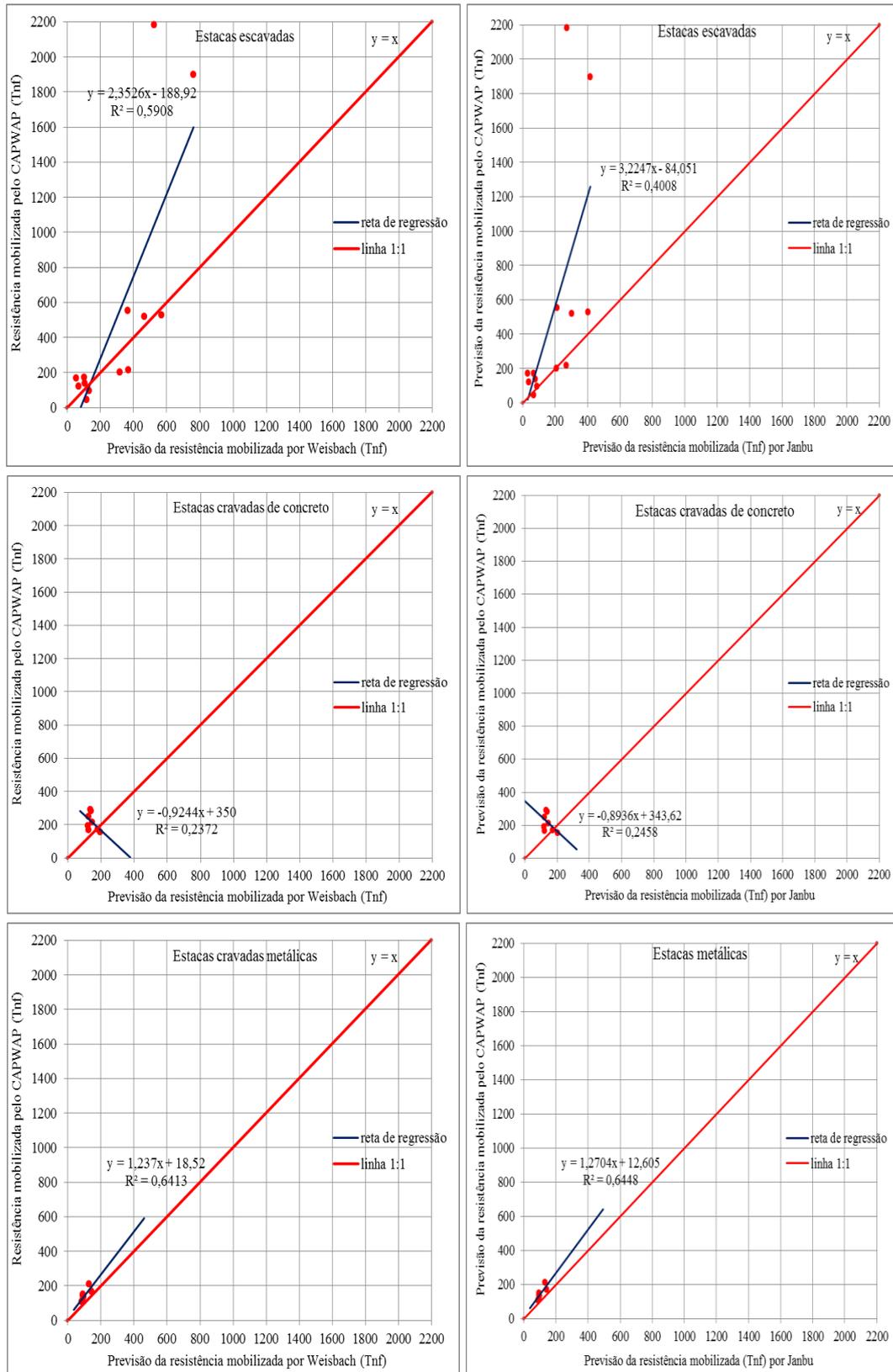


Figura 5.8 - Previsão da resistência mobilizada por Weisbach e Janbu vs. resistência mobilizada pelo CAPWAP, considerando revisão de coeficientes.

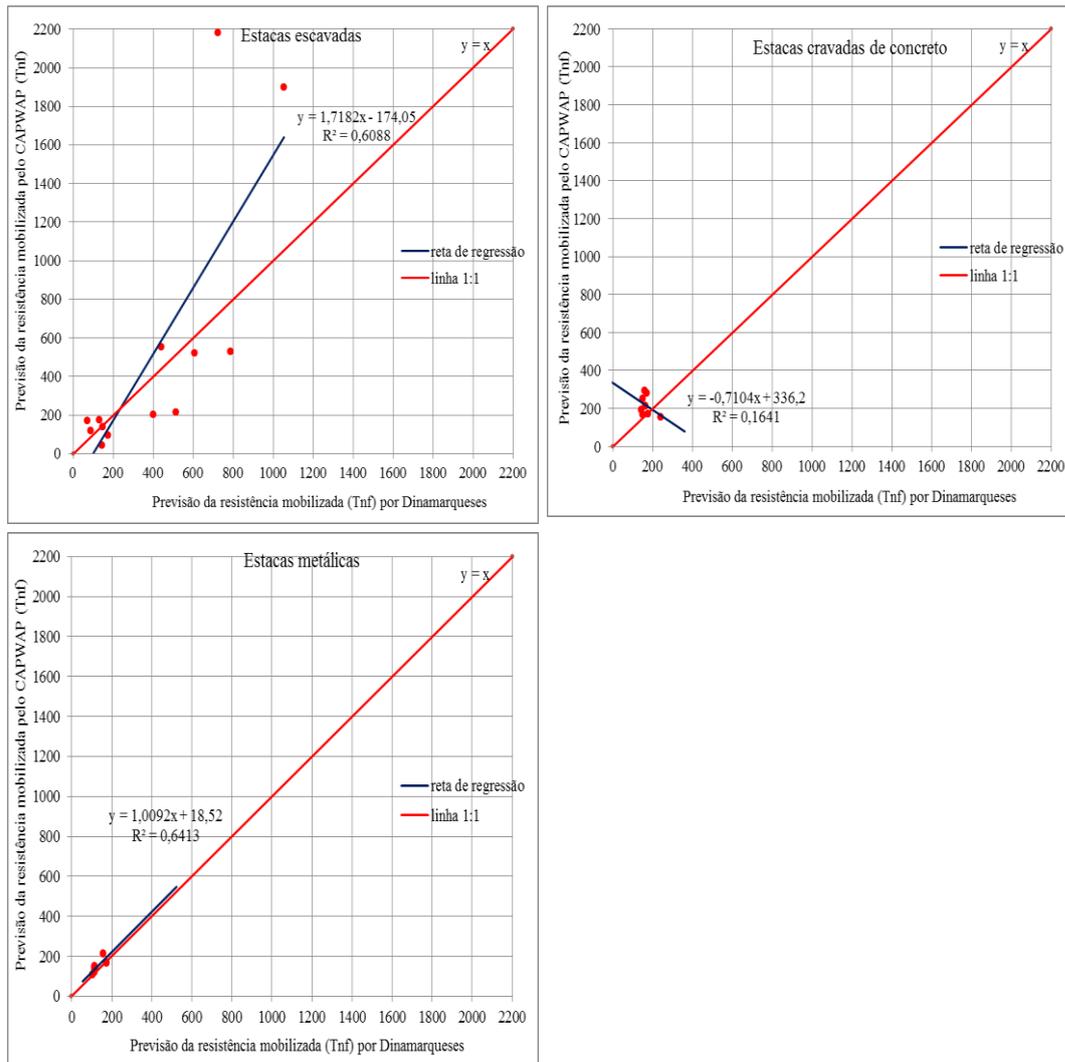


Figura 5.9 - Previsão da resistência mobilizada por Dinamarqueses vs. resistência mobilizada pelo CAPWAP, considerando revisão de coeficientes.

Tabela 5.8 - Resumo das retas de melhor ajuste e do coeficiente de determinação dos gráficos de resistência mobilizada.

| Tipo de estacas | Hiley | Hiley pelo 'solver' | Weisbach | Janbu | Dinamarqueses |
|------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Estacas escavadas in situ | $y = 2,0861x + 1,036$ | $y = 2,4316x - 22,709$ | $y = 2,3526x - 188,92$ | $y = 3,2247x - 84,051$ | $y = 1,7182x - 174,05$ |
| | $R^2 = 0,2716$ | $R^2 = 0,3643$ | $R^2 = 0,5908$ | $R^2 = 0,4008$ | $R^2 = 0,6088$ |
| Estacas cravadas | $y = -0,83x + 337,19$ | $y = -0,9394x + 345,26$ | $y = -0,9244x + 350$ | $y = -0,8936x + 343,62$ | $y = -0,7104x + 336,2$ |
| | $R^2 = 0,2501$ | $R^2 = 0,1005$ | $R^2 = 0,2372$ | $R^2 = 0,2458$ | $R^2 = 0,1641$ |
| Estacas metálicas | $y = 1,3223x + 6,2039$ | $y = 1,2542x + 5,1952$ | $y = 1,237x + 18,52$ | $y = 1,2704x + 12,605$ | $y = 1,0092x + 18,52$ |
| | $R^2 = 0,6197$ | $R^2 = 0,6342$ | $R^2 = 0,6413$ | $R^2 = 0,6448$ | $R^2 = 0,6413$ |

As figuras (5.7) a (5.9) apresentadas acima, foram plotadas para as melhores correlações encontradas. Para o caso de estacas escavadas, estacas cravadas de concreto e metálicas, a fórmula de Hiley obteve uma melhor correlação para os valores da compressão elástica do capacete, coxim e cepo $C_1 = 0,30\text{cm}$, compressão elástica do solo $C_3 = 0,10\text{cm}$, eficiência do martelo $e_f = 0,90$ e coeficiente de restituição “ $n = 0,55$ ”.

Usando a ferramenta ‘solver’ do Microsoft Excel, para a fórmula de Hiley, as melhores correlações com menor erro, foram encontradas valores médios, de ‘ $C_1 = 0,39\text{cm}$ ’, ‘ $C_3 = 0,11\text{cm}$ ’, ‘ $e_f = 0,85$ ’, ‘ $n = 0,48$ ’, para o caso de estacas escavadas.

Para estacas cravadas de concreto, foram encontrados valores médios, de ‘ $C_1 = 0,31\text{cm}$ ’, ‘ $C_3 = 0,13\text{cm}$ ’, ‘ $e_f = 0,90$ ’, ‘ $n = 0,51$ ’. E finalmente para estacas metálicas ‘solver’ encontrou a melhor correlação para valores de ‘ $C_1 = 0,10\text{cm}$ ’, ‘ $C_3 = 0,10\text{cm}$ ’, ‘ $e_f = 0,90$ ’, ‘ $n = 0,55$ ’.

A fórmula de Weisbach obteve a melhor correlação para estacas escavadas com ‘ $e_f = 0,70$ ’ e, para estacas cravadas de concreto e aço, foram para um valor de ‘ $e_f = 0,90$ ’.

A fórmula de Janbu obteve a melhor correlação para estacas escavadas para um valor de ‘ $e_f = 0,40$ ’ e, para estaca cravadas de concreto e aço, foram para valores de ‘ $e_f = 0,90$ ’.

A fórmula dos Dinamarqueses obteve a melhor correlação para um valor de ‘ $e_f = 0,80$ ’ para todos os tipos de estacas. Sendo ‘ $e_f =$ eficiência do martelo’.

5.2.1. Análise estatística

Similarmente, como na análise inicial na previsão da resistência mobilizada pelas fórmulas dinâmicas, foi realizada uma análise estatística dos resultados da previsão da resistência mobilizada usando a revisão dos coeficientes. Esta é apresentada nas tabelas (5.9) ao (5.10), que representam a relação da previsão da resistência pelas fórmulas dinâmicas com os resultados do CAPWAP, diferença percentual, média ($\hat{\mu}$), desvio padrão(S), coeficiente de variação (CV) e coeficiente de correlação da relação “formulas dinâmicas / CAPWAP”.

Tabela 5.9 - Valores da média (\hat{u}), desvio padrão, coeficiente de correlação e, coeficiente de variação da relação das fórmulas dinâmicas sobre os valores estimados pelo CAPWAP. Para uma revisão dos coeficientes.

| Tipo de Estaca | Parâmetro estatístico | Hiley | Hiley pelo 'solver' | Weisbach | Janbu | Dinamarqueses |
|------------------------------|-----------------------|-------------|---------------------|-------------|-------------|---------------|
| Estacas escavadas | Média (u) | 0,89 | 0,69 | 0,99 | 0,64 | 1,30 |
| | Desvio padrão | 0,64 | 0,34 | 0,69 | 0,44 | 0,87 |
| | Coef. de variação | 0,72 | 0,50 | 0,69 | 0,69 | 0,67 |
| | Coef. de correlação | 0,52 | 0,60 | 0,77 | 0,63 | 0,78 |
| Estacas cravadas de concreto | Média (u) | 0,74 | 0,68 | 0,73 | 0,72 | 0,85 |
| | Desvio padrão | 0,32 | 0,22 | 0,29 | 0,30 | 0,33 |
| | Coef. de variação | 0,43 | 0,32 | 0,40 | 0,42 | 0,39 |
| | Coef. de correlação | - 0,50 | - ,32 | - 0,49 | - 0,50 | - 0,41 |
| Estacas metálicas | Média (u) | 0,73 | 0,78 | 0,71 | 0,73 | 0,87 |
| | Desvio padrão | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,09 | 0,10 |
| | Coef. de variação | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| | Coef. de correlação | 0,79 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |

Em geral, usando a revisão dos coeficientes no recálculo da previsão da resistência mobilizada pelas fórmulas dinâmicas em relação às resistências obtidas pelo CAPWAP, algumas fórmulas melhoraram a relação sobre os valores iniciais assim como outras diminuíram dita relação comparadas com as tabelas (5.6) e (5.9). A variação dos dados da relação sobre a média (\hat{u}), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV) variaram para cada tipo de estaca.

A relação obtida para a fórmula de Weisbach sobre a média é diminuída para o caso de estacas escavadas com respeito ao valor original. Com uma média da relação ' $\hat{u}=0,99$ ' próxima à unidade e, um coeficiente de variação maior que Hiley (pelo solver) e Dinamarqueses. Neste grupo de estacas a fórmula Dinamarquesa sofreu um acréscimo com respeito à média ' \hat{u} ', sobre o valor original, portanto superestima a previsão da resistência, com um coeficiente de variação pequeno. A fórmula de Hiley também obteve um acréscimo em relação à média ' \hat{u} ' com maior coeficiente de variação (CV = 0,72) que as outras fórmulas.

Nas estacas cravadas de concreto, as fórmulas dinâmicas de Hiley, Janbu e Dinamarqueses sofreram um acréscimo com respeito à média da relação ' \hat{u} ', sobre o valor original, ainda subestimam a previsão da resistência, com coeficientes de variação maiores que a fórmula de Hiley (pelo solver). A fórmula dos Dinamarqueses apresenta uma média da relação ' $\hat{u} =0,85$ ', próxima à unidade, com menor coeficiente de variação (CV=0,39).

Para as estacas metálicas a relação da média 'û' foi aumentada para todas as fórmulas dinâmicas, sobre os valores iniciais com o mesmo grau de dispersão (CV =0,12), com exceção da fórmula de Weisbach, que sofreu uma diminuição sobre a média (û). A fórmula dos Dinamarqueses obteve maior proximidade aos valores do CAPWAP.

Para uma avaliação mais detalhada da previsão da resistência obtida pelas fórmulas dinâmicas similarmente, a análise inicial, os valores da diferença percentual também são comparados. Apresentadas na tabela (5.10).

Tabela 5.10 - Valores da média da diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas e valores do CAPWAP, para revisão dos coeficientes.

| Tipo de Estaca | Parâmetro estatístico | Hiley | Hiley 'solver' (%) | Weisbach | Janbu | Dinamarqueses |
|------------------------------|-----------------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| Estacas escavadas | Média (%) | - 11,34 | - 30,90 | - 1,06 | - 36,08 | 29,71 |
| | Máximo | 126,53 | 17,97 | 165,70 | 55,07 | 229,18 |
| | Mínimo | - 85,81 | 172,79 | 227,42 | 136,66 | 316,09 |
| Estacas cravadas de concreto | Média (%) | - 26,11 | - 31,50 | - 26,93 | - 27,85 | - 14,96 |
| | Máximo | 32,44 | - 0,00 | 27,85 | 32,13 | 56,70 |
| | Mínimo | - 54,23 | - 54,23 | - 53,77 | - 55,15 | - 45,03 |
| Estacas metálicas | Média (%) | - 26,66 | - 22,14 | - 28,69 | - 27,28 | - 12,60 |
| | Máximo | - 15,15 | - 10,17 | - 15,34 | - 14,85 | 3,77 |
| | Mínimo | - 39,29 | - 34,98 | - 38,75 | - 38,06 | - 24,93 |

Comparando as tabelas (5.10) com (5.6), a diferença percentual entre a previsão da resistência pelas fórmulas dinâmicas e a resistência obtida pelo método de CAPWAP, usando a revisão dos coeficientes, encontrou-se que a para a fórmula de Weisbach a diferença percentual decresce para estacas escavadas comparadas como o valor original. A fórmula de Hiley também sofreu um pequeno acréscimo sobre a média, do valor da variação percentual, sendo estas fórmulas com maior proximidade aos valores do CAPWAP. A fórmula dos Dinamarqueses superestima a previsão devido ao acréscimo da diferença percentual, sobre a média.

Para estacas cravadas de concreto, a fórmula dos Dinamarqueses torna-se próximo aos valores do CAPWAP, devido ao acréscimo do valor da diferença percentual sobre a média (-14,96%), com respeito ao valor inicial.

No caso das estacas metálicas a fórmula dos Dinamarqueses também obteve maior precisão com os valores do CAPWAP, pelo acréscimo do valor da diferença

percentual sobre a média (-12,60%). Referindo-se aos valores da diferença percentual, sobre a média, a fórmula dinâmica tem maior proximidade com os valores do CAPWAP, quando estes valores tendem a zero.

Para quantificar melhor a dispersão, os resultados da diferença percentual são plotadas nos graficos a seguir para cada grupo de estacas.

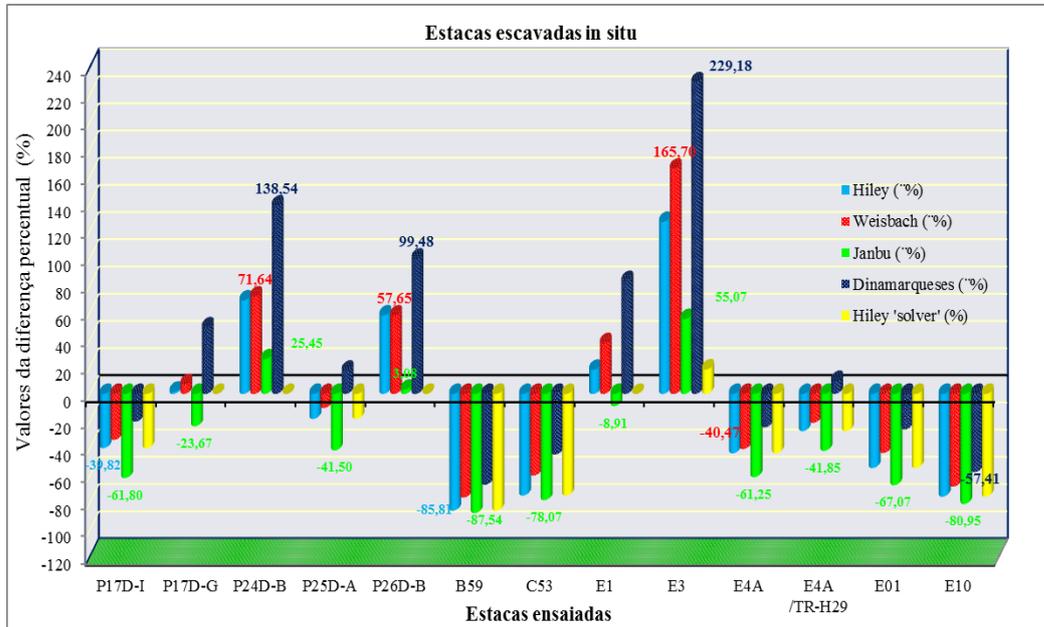


Figura 5.10 – Diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas com os valores do CAPWAP, com revisão dos coeficientes, para estacas escavadas.

Ao comparar os valores da resistência obtida pelas diferentes fórmulas dinâmicas, plotados no gráfico (5.10) e (5.4), observa-se que a dispersão dos resultados para as estacas escavadas permanecem grande, em relação aos resultados em estacas cravadas de concreto e metal, da previsão inicial.

Para estacas escavadas, a fórmula de Janbu para um valor de ' $e_f = 0,40$ ', obteve resultados bastantes conservadores, a diferença dos resultados iniciais nas que elas foram mais próximas aos resultados do CAPWAP, com ' $e_f = 0,70$ '.

A fórmula de Weisbach para um valor de ' $e_f = 0,70$ ', obteve uma redução da variação percentual sobre a média (-1,06%), próximo aos valores do CAPWAP.

Para a fórmula de Hiley, usando valores de ' $C_1 = 0,30\text{cm}$ ', ' $C_3 = 0,10\text{cm}$ ', ' $n = 0,55$ ', ' $e_f = 0,90$ ', obteve-se um acréscimo da variação percentual (-11,34%), sobre a média. Além de ter um coeficiente de variação maior, tem uma proximidade com os valores do CAPWAP. Os resultados da fórmula dos Dinamarqueses para um valor de ' $e_f = 0,80$ ' superestimam a previsão.

Os resultados da fórmula de Hiley ‘pelo solver’, apresentam valores conservadores, subestimam a previsão da resistência mobilizada.

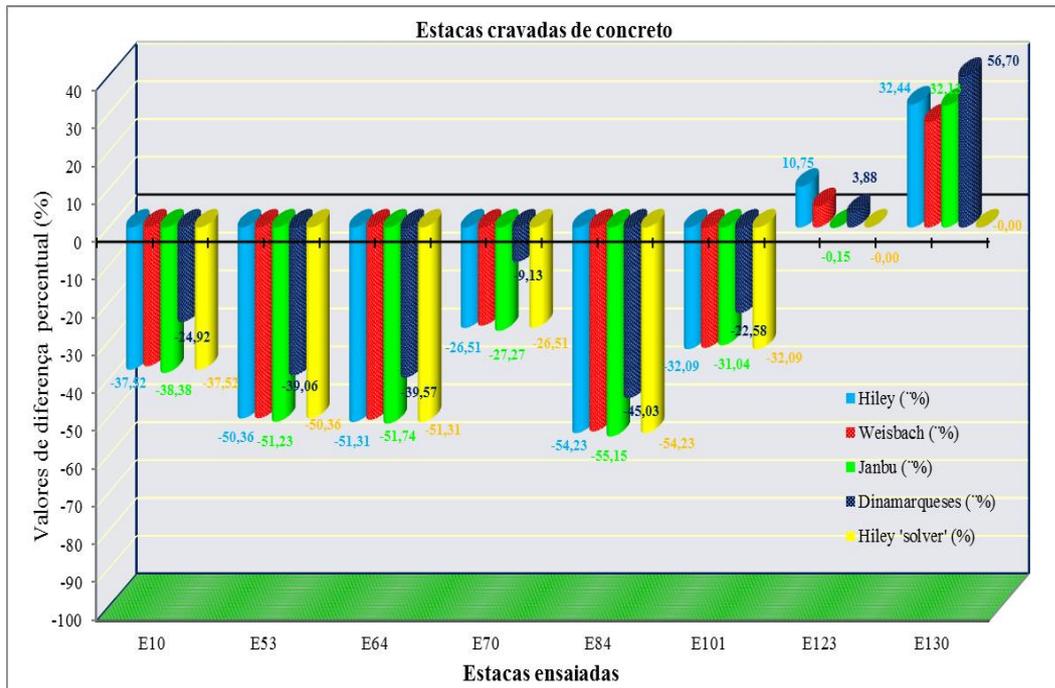


Figura 5.11 – Diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas com os valores do CAPWAP, com revisão dos coeficientes, para estacas cravadas de concreto.

A partir da figura (5.11), para estacas cravadas de concreto, todas as fórmulas dinâmicas para uma revisão dos coeficientes, obtiveram resultados bastante conservadores. A fórmula dos Dinamarqueses para um valor de $e_f=0,80$ fornece uma proximidade com os valores do CAPWAP, além de apresentar, maior coeficiente de correlação, menor diferença percentual e, menor coeficiente de variação, seguido da fórmula de Hiley.

Além disso, pode-se perceber que todas as fórmulas dinâmicas, têm boa aproximação com os valores do CAPWAP para a estaca ‘E123’, mesmo assim superestimam os valores da previsão na estaca ‘E130’. Esta situação poderia ser devido à variação do comprimento da estaca e, a energia aplicada nessas estacas.

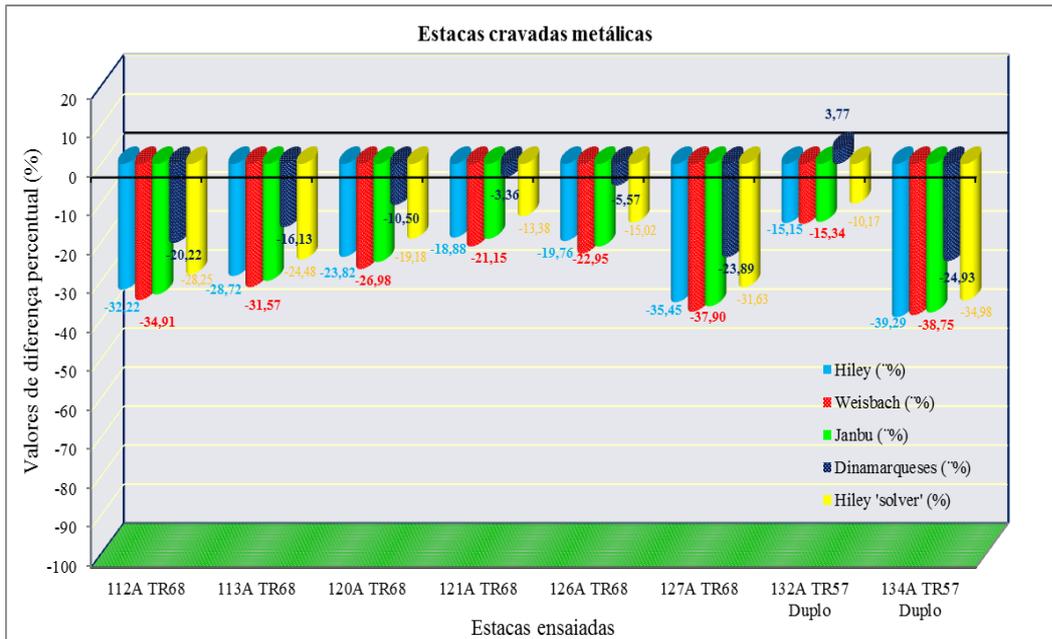


Figura 5.12 - Diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas com os valores do CAPWAP, com revisão dos coeficientes, para estacas metálicas.

Ao analisar os valores da dispersão da diferença percentual sobre a média do gráfico (5.12), verifica-se que o valor da diferença percentual sobre a média na fórmula dos Dinamarqueses sofreu um pequeno acréscimo respeito ao valor inicial (de -18% a -12,6%), para um valor de $e_f = 0,80$. Esta fórmula apresenta a melhor correlação com os valores do CAPWAP, além de ter uma média da relação $\hat{u} = 0,87$ próxima à unidade, seguido da fórmula de Hiley (pelo 'solver').

Portanto encontrou-se que para a fórmula de Hiley, considerando os valores revisados para C_3 , C_1 , e_f e η , em geral permanecem com a mesma dispersão dos pontos do conjunto de dados, para estacas escavadas e cravadas de concreto. Porém, continuam subestimando levemente a previsão da resistência nessas estacas, com respeito aos valores iniciais. Para o caso de estacas metálicas, permanecem com um parecido grau de dispersão e continuam subestimando a previsão da resistência mobilizada em relação aos valores originais.

Da mesma forma, aplicando o valor modificado de $e_f = 0,80$ para a fórmula dos Dinamarqueses não houve nenhuma variação com respeito ao coeficiente de variação para cada tipo de estaca, em relação ao valor inicial. Esta fórmula continuou superestimando a previsão da resistência em estacas escavadas e subestimando em estacas cravadas de concreto armado e metálicas.

Considerando um fator de eficiência do martelo “ e_f ” de 0,40 e 0,90 para estacas escavadas, cravadas de concreto e aço, respectivamente, a fórmula de Janbu, subestima a previsão da resistência para todos os tipos de estacas. No caso de estacas metálicas não sofre nenhuma variação com respeito à dispersão.

Da mesma forma a fórmula de Weisbach, subestima levemente a previsão da resistência em estacas escavadas, para um valor de ‘ $e_f = 0,70$ ’. E continua subestimando a previsão, nas demais estacas para uma eficiência do martelo ‘ $e_f = 0,90$ ’.

5.3.

Comparação dos resultados das fórmulas dinâmicas e valores do CAPWAP, para valores iniciais e, revisão de coeficientes

Para determinar de maneira objetiva que fórmulas dinâmicas analisadas no presente estudo dão uma melhor previsão da resistência mobilizada das estacas, foi feita uma comparação para determinar qual é a mais acurada e próxima aos valores do CAPWAP.

Os parâmetros avaliados que ajudam a determinar que fórmulas são as mais acuradas e com maior precisão são : O coeficiente angular da linha de tendência, intercepto “y”, coeficientes de determinação, relação da média na previsão da resistência mobilizada pelas fórmulas dinâmicas e os valores obtidos pelo CAPWAP, diferença percentual, desvio padrão, coeficiente de variação e, valores de coeficientes de correlação.

Idealmente, a fórmula dinâmica mais acurada seria aquela que resulta com um coeficiente angular igual à unidade, um intercepto ‘y’ zero, um valor de ‘ R^2 ’ de um, uma média da relação na previsão da resistência mobilizada pelas fórmulas dinâmicas e os valores obtidos pelo CAPWAP igual à unidade, assim como um valor da média da diferença percentual , desvio padrão e coeficiente de variação igual a zero e, um coeficiente de correlação igual à unidade.

A tabela (5.12) mostra um resumo da previsão das resistências mobilizadas mais acuradas pelas fórmulas dinâmicas analisadas pelos diferentes métodos adotados, citados anteriormente, as que foram resumidos a partir dos resultados obtidos detalhadas na tabela (5.11).

Tabela 5.11 – Sumário total das equações da reta de melhor ajuste (coeficiente angular e intercepto 'y'), com coeficiente de determinação, média da relação (\hat{u}), desvio padrão, coeficiente de variação e, diferença percentual. Para uma revisão de coeficientes e valores iniciais dos coeficientes.

| | | Previsão da Resistência Mobilizada pelas fórmulas dinâmicas considerando $E_{dinamico do concreto}$ | | | | | | | | |
|----------------------------|------------------------|---|-------------------|-------------------------------|---------------------------|---|----------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------|
| Tipo de Estaca | Parâmetro estatístico | Com valores iniciais | | | | Revisão de coeficientes | | | | |
| | | Hiley : C1 = 0,30; C3 = 0,25; ef=0,80; n = 0,55 | Weisbach 'ef = 1' | Janbu 'e _r = 0,70' | Dinamarqueses 'ef = 0,70' | Hiley : C1 = 0,30; C3 = 0,10; ef=0,90; n = 0,55 | Hiley "pelo solver" (combinados) | Weisbach 'ef=0,70' | Janbu 'ef = 0,40' | Dinamarqueses 'ef = 0,80' |
| Estacas escavadas | coeficiente angular | 2,2008 | 1,9568 | 2,3908 | 1,8394 | 2,0861 | 2,4316 | 2,3526 | 3,2247 | 1,718 |
| | Intercepto "Y" | 58,28 | -191,73 | -88,06 | -171,27 | 1,04 | -22,71 | -188,92 | -84,05 | 174,05 |
| | R ² | 0,2167 | 0,5850 | 0,3878 | 0,6110 | 0,2716 | 0,3643 | 0,5908 | 0,4008 | 0,6088 |
| | média da relação | 0,76 | 1,20 | 0,88 | 1,20 | 0,89 | 0,69 | 0,99 | 0,64 | 1,30 |
| | Media Difer.percentual | -24,20 | 20,07 | -12,06 | 20,27 | -11,34 | -30,90 | -1,06 | -36,08 | 29,71 |
| | desvio padrão | 0,55 | 0,84 | 0,62 | 0,80 | 0,64 | 0,34 | 0,69 | 0,44 | 0,87 |
| | coef. de variação | 0,73 | 0,70 | 0,70 | 0,67 | 0,72 | 0,50 | 0,69 | 0,69 | 0,67 |
| | coef. Correlação | 0,47 | 0,76 | 0,62 | 0,78 | 0,52 | 0,60 | 0,77 | 0,63 | 0,78 |
| cravadas de concreto | coeficiente angular | -0,949 | -0,863 | -1,013 | -0,727 | -0,830 | -0,939 | -0,924 | -0,894 | -0,7104 |
| | Intercepto "Y" | 340,10 | 348,40 | 342,11 | 330,24 | 337,19 | 345,26 | 350,00 | 343,62 | 336,20 |
| | R ² | 0,2290 | 0,2397 | 0,2286 | 0,1501 | 0,250 | 0,101 | 0,237 | 0,246 | 0,1641 |
| | média da relação | 0,66 | 0,77 | 0,63 | 0,79 | 0,74 | 0,68 | 0,73 | 0,72 | 0,85 |
| | Media Difer.percentual | -33,97 | -22,66 | -37,15 | -20,98 | -26,11 | -31,50 | -26,93 | -27,85 | -14,96 |
| | desvio padrão | 0,27 | 0,31 | 0,26 | 0,31 | 0,32 | 0,22 | 0,29 | 0,30 | 0,33 |
| | coef. de variação | 0,41 | 0,40 | 0,41 | 0,39 | 0,43 | 0,32 | 0,40 | 0,42 | 0,39 |
| | coef. Correlação | -0,48 | -0,49 | -0,48 | -0,39 | -0,50 | -0,32 | -0,49 | -0,50 | -0,41 |
| Estacas cravadas metálicas | coeficiente angular | 1,470 | 1,174 | 1,441 | 1,079 | 1,322 | 1,254 | 1,237 | 1,270 | 1,0092 |
| | Intercepto "Y" | 7,30 | 18,52 | 12,61 | 18,52 | 6,20 | 5,20 | 18,52 | 12,61 | 18,52 |
| | R ² | 0,6061 | 0,6413 | 0,6448 | 0,6413 | 0,620 | 0,634 | 0,641 | 0,645 | 0,6413 |
| | média da relação | 0,65 | 0,75 | 0,64 | 0,82 | 0,73 | 0,78 | 0,71 | 0,73 | 0,87 |
| | Media Difer.percentual | -34,52 | -24,84 | -35,87 | -18,25 | -26,66 | -22,14 | -28,69 | -27,28 | -12,60 |
| | desvio padrão | 0,08 | 0,09 | 0,08 | 0,10 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,09 | 0,10 |
| | coef. de variação | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| | coef. Correlação | 0,78 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,79 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |

A escolha da previsão das fórmulas dinâmicas mais próximas aos valores do CAPWAP foi usando o método de ‘fatores de ponderação’ que é uma análise de caráter qualitativo ou quantitativo. Ver tabela (2.3) do anexo (02)

Portanto, fazendo-se uma analogia de comparação a partir do gráfico (5.12), a fórmula dos Dinamarqueses para estacas escavadas, é a fórmula dinâmica que mais correlação tem com os valores obtidos pelo CAPWAP, para o caso de coeficientes iniciais, usando ‘ $e_f = 0,70$ ’. Para estacas cravadas de concreto e estacas metálicas encontrou-se a melhor correlação para uma revisão de coeficientes, usando ($e_f=0,80$). Tomou-se em conta que o coeficiente angular seja próximo à unidade, intercepto ‘y’ menor possível e, um coeficiente de determinação próximo à unidade.

No caso da fórmula de Hiley comparadas com os valores do CAPWAP, obteve uma melhor correlação, para uma revisão dos coeficientes ($e_f = 0,90$; $n=0,55$; $C_1 = 0,30\text{cm}$ e $C_3 = 0,10\text{cm}$) para o caso de estacas escavadas e estacas cravadas de concreto. Da mesma forma para estacas metálicas, encontrou-se uma proximidade aos valores do CAPWAP, para valores encontrados pelo ‘solver’ ($e_f = 0,90$; $n=0,55$; $C_1 = 0,10\text{cm}$ e $C_3 = 0,10\text{cm}$).

Entretanto, a fórmula Weisbach fornece uma melhor correlação na previsão da resistência mobilizada, para uma revisão de coeficiente com ‘ $e_f = 0,70$ ’, para o caso estacas escavadas. Porém, para estacas cravadas de concreto e estacas metálicas foi encontrada uma melhor correlação para o caso de valores iniciais com ‘ $e_f = 1$ ’.

E finalmente a fórmula de Janbu foi comparada para cada caso de estudo, encontrando-se as melhores correlações para, estacas escavadas, considerando um valor inicial do coeficiente ($e_f = 0,70$). Para o caso de estacas cravadas de concreto e metálicas foi encontrado uma boa correlação, para uma revisão de coeficientes com ‘ $e_f = 0,90$ ’.

Tabela 5.12 - Sumário estatístico das fórmulas dinâmicas mais acuradas, com melhor aproximação aos valores do CAPWAP.

| | Tipo de Estacas | Fórmulas Dinâmicas | | | |
|------------------------------|------------------------------|--|---|--|---|
| | | Hiley | Weisbach | Janbu | Dinamarqueses |
| Variação para cada caso | Estacas escavadas in situ | Revisão de coeficientes 'E dinâmico do concreto' $C_1 = 0,30$, $C_3 = 0,10$, $e_f = 0,90$, $n = 0,55$. | revisão de coef. com 'E dinâmico' $e_f = 0,70$ | valores iniciais com 'E dinâmico' e ' $e_f = 0,70$ ' | valores iniciais com 'E dinâmico' e ' $e_f = 0,70$ ' |
| | Estacas cravadas de concreto | Revisão de coeficientes 'E dinâmico do concreto' $C_1 = 0,30$, $C_3 = 0,10$, $e_f = 0,90$, $n = 0,55$. | valores iniciais com 'E dinâmico do concreto' e ' $e_f = 1$ ' | Revisão de coef. 'E dinâmico do concreto' e ' $e_f = 0,90$ ' | Revisão de coeficientes 'E dinâmico do concreto' com $e_f = 0,80$ |
| | Estacas Cravadas metálicas | Hiley pelo solver : $C_1 = 0,10$; $C_3 = 0,10$; $e_f = 0,90$; $n = 0,55$ | valores iniciais com ' $e_f = 1$ ' | Revisão de coef. ' $e_f = 0,90$ ' | Revisão de coeficientes com $e_f = 0,80$ |
| Tipo de Estaca | Parâmetro estatístico | Hiley | Weisbach | Janbu | Dinamarqueses |
| Estacas escavadas in situ | coeficiente angular | 2,0861 | 2,3526 | 2,3908 | 1,8394 |
| | Intercepto "Y" | 1,04 | -188,92 | -88,06 | -171,27 |
| | R ² | 0,2716 | 0,5908 | 0,3878 | 0,6110 |
| | Média da relação | 0,89 | 0,99 | 0,88 | 1,20 |
| | Média Difer.percentual | -11,34 | -1,06 | -12,06 | 20,27 |
| | Desvio padrão | 0,64 | 0,69 | 0,62 | 0,80 |
| | coef. de variação | 0,72 | 0,69 | 0,70 | 0,67 |
| | coef. Correlação | 0,52 | 0,77 | 0,62 | 0,78 |
| Estacas cravadas de concreto | coeficiente angular | -0,830 | -0,863 | -0,894 | -0,710 |
| | Intercepto "Y" | 337,19 | 348,40 | 343,62 | 336,20 |
| | R ² | 0,2501 | 0,2397 | 0,246 | 0,164 |
| | Média da relação | 0,74 | 0,77 | 0,72 | 0,85 |
| | Média Difer.percentual | -26,11 | -22,66 | -27,85 | -14,96 |
| | Desvio padrão | 0,32 | 0,31 | 0,30 | 0,33 |
| | coef. de variação | 0,43 | 0,40 | 0,42 | 0,39 |
| | coef. Correlação | -0,50 | -0,49 | -0,50 | -0,41 |
| Estacas cravadas metálicas | coeficiente angular | 1,254 | 1,174 | 1,270 | 1,009 |
| | Intercepto "Y" | 5,20 | 18,52 | 12,61 | 18,52 |
| | R ² | 0,6342 | 0,6413 | 0,6448 | 0,641 |
| | Média da relação | 0,78 | 0,75 | 0,73 | 0,87 |
| | Média Difer.percentual | -22,14 | -24,84 | -27,28 | -12,60 |
| | Desvio padrão | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,10 |
| | coef. de variação | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| | coef. Correlação | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |

O coeficiente de variação ($CV = s/\mu$) e desvio padrão (s) são medidas de dispersão, ou seja, medidas utilizadas quando se deseja saber, quão próximo ou quão afastado estão os valores da previsão da resistência mobilizada em relação à média ($\mu = \text{Fórmula dinâmica}/\text{CAPWAP}$). A partir deste conceito foi avaliada a precisão das melhores fórmulas dinâmicas e, além de considerar valores da diferença percentual, apresentadas nos gráficos seguintes (5.13) e (5.14).

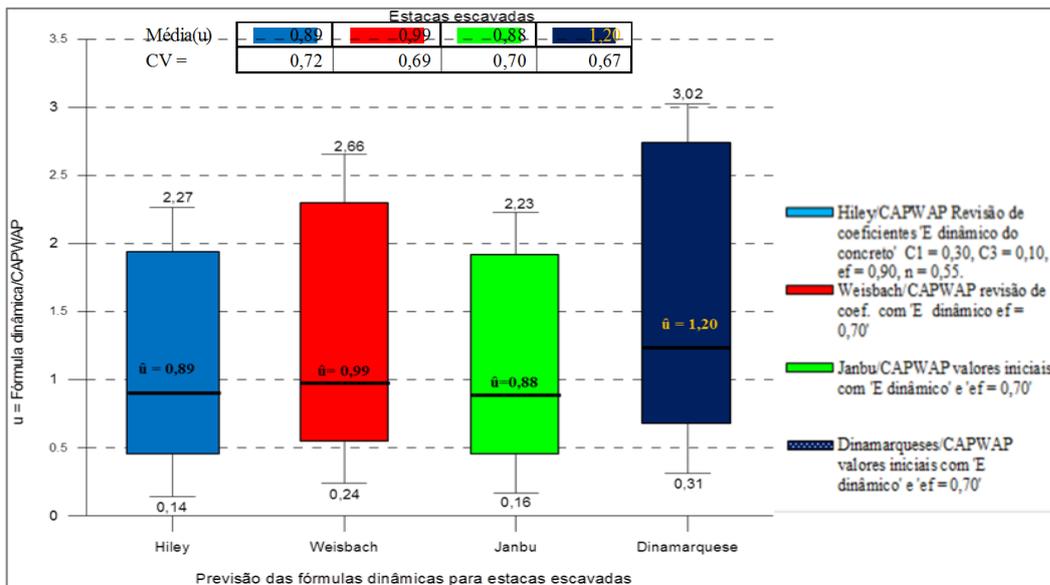


Figura 5.13 - Relação ($u = \text{Fórmula dinâmica}/\text{CAPWAP}$) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas escavadas.

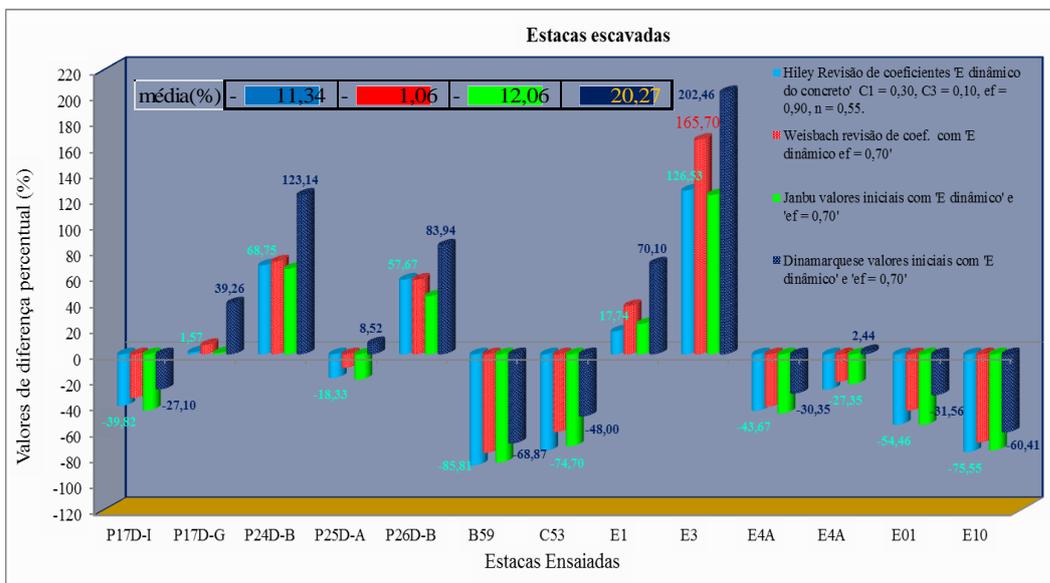


Figura 5.14 – Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas escavadas.

A partir das figuras (5.13) e (5.14), observa-se a grande dispersão dos resultados das fórmulas dinâmicas, para estacas escavadas. No entanto a fórmula de Weisbach tem uma aproximação com os valores do CAPWAP, apesar de apresentar um coeficiente de determinação menor que a fórmula dos Dinamarqueses, menor diferença percentual (-1,06%) sobre a média, melhor média da relação ($\hat{u}=0,99$) e, menor coeficiente de variação ($CV = 0,69$). Portanto a dispersão da fórmula Weisbach é menor, seguida da fórmula de Hiley com menor variação percentual (-11,34%), média da relação ($\hat{u}=0,89$) próxima à unidade e, coeficiente de variação ($CV = 0,72$).

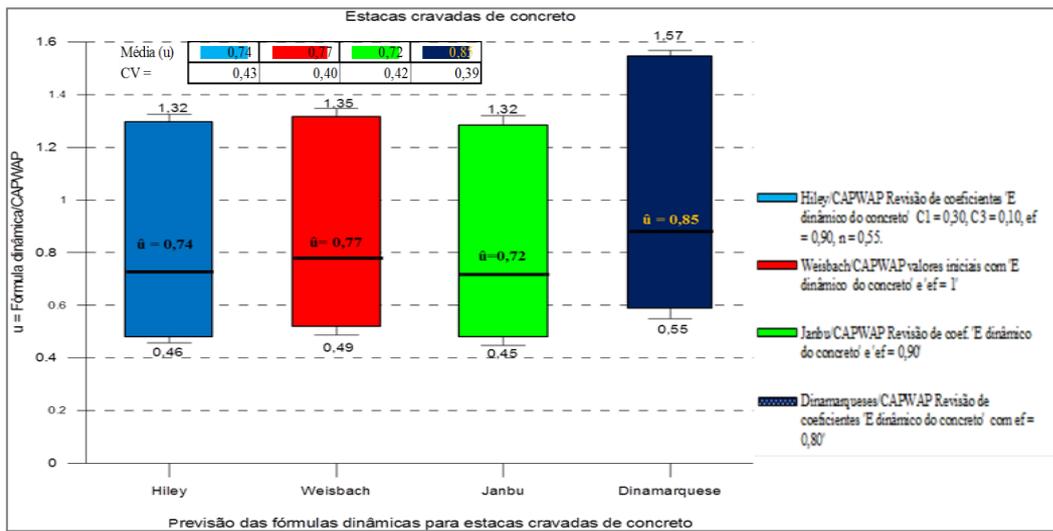


Figura 5.15 - Relação ($u = \text{Fórmula dinâmica/CAPWAP}$) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas cravadas de concreto.

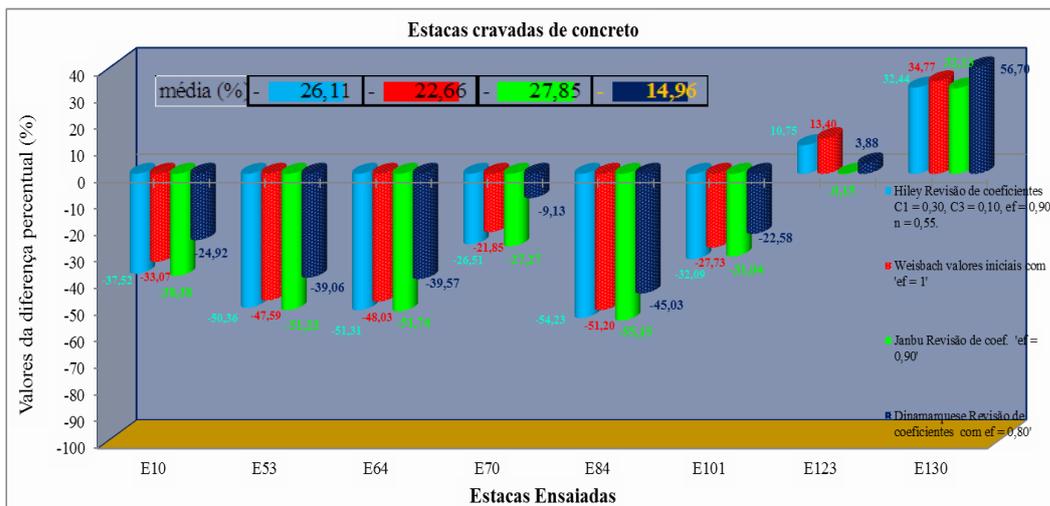


Figura 5.16 – Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas cravadas de concreto.

Note-se que na tabela (5.12) a correlação encontrada pelas fórmulas dinâmicas para estacas cravadas é negativa, com valores baixos. Porém nas figuras plotadas (5.15) e (5.16), encontra-se que a previsão das fórmulas dos Dinamarqueses tem uma proximidade com os valores do CAPWAP, além de ter um coeficiente de determinação baixo, menor variação percentual, menor coeficiente de variação, e ter uma média ($\hat{u}=0,85$) próxima à unidade, seguida da aproximação das fórmulas de Weisbach e Hiley.

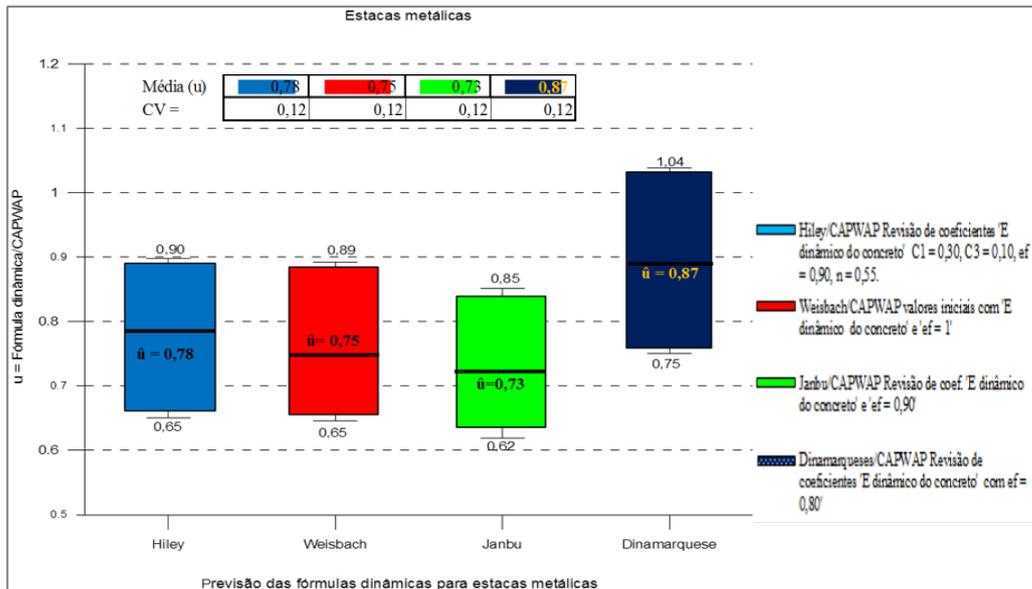


Figura 5.17 - Relação ($u = \text{Fórmula dinâmica}/\text{CAPWAP}$) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas metálicas.

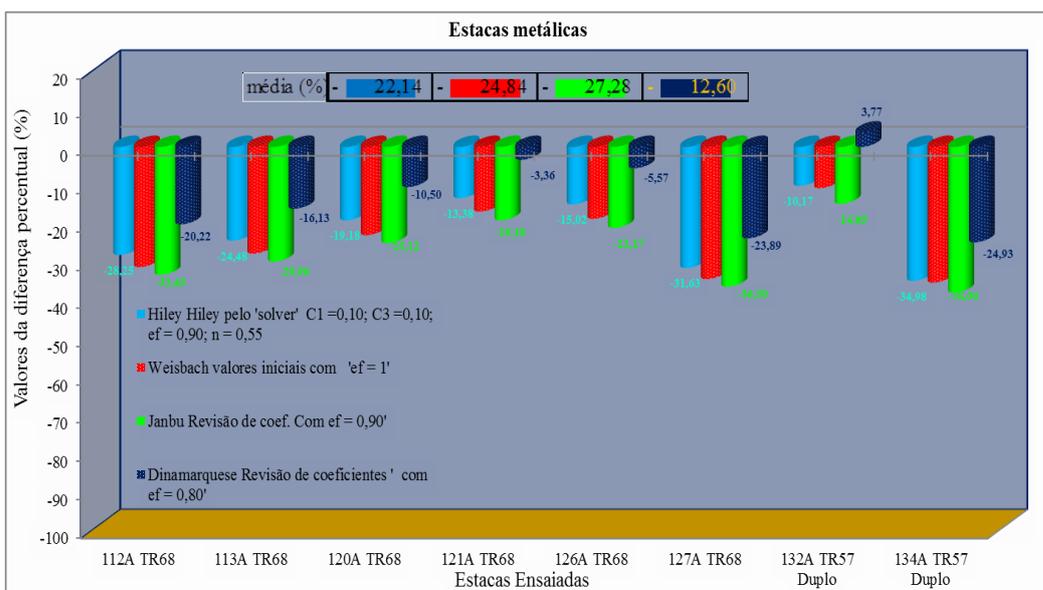


Figura 5.18 – Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas metálicas.

Na figura (5.17) e (5.18), se percebe que a fórmula dos Dinamarqueses é a mais próxima aos valores do CAPWAP, com melhor coeficiente de determinação, média da relação (\hat{u}) próxima á unidade, menor valor de diferença percentual, e um coeficiente de variação igual às outras fórmulas dinâmicas. Seguido da precisão das fórmulas de Hiley e Weisbach.

Vale salientar, que nas figuras plotadas a relação ‘ $u = \text{fórmula dinâmicas/CAPWAP}$ ’, estas representam a máxima relação (u), mínima e, a média da relação (\hat{u}) com os valores do CAPWAP.

5.4.

Comparação dos resultados das fórmulas dinâmicas usando módulo de elasticidade dinâmico e estático do concreto, com os resultados do CAPWAP

Na primeira parte da análise realizada, na estimativa da previsão da resistência mobilizada pelas fórmulas dinâmicas, foi usando o módulo de elasticidade dinâmico do concreto, parâmetro usado na avaliação do método de CAPWAP.

Segundo Metha e Monteiro (2008), para análise de tensões em estruturas sujeitas a cargas de impacto é mais adequado utilizar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto, por ser um método mais preciso. Geralmente o módulo dinâmico é de 10%, 20% e 40% maior que o módulo estático, para concretos de grande, média e baixa resistência, respectivamente.

Neste item foi calculada a previsão das resistências mobilizadas pelas fórmulas dinâmicas, usando o módulo de elasticidade estático, tanto para estacas escavadas ou moldadas in loco de concreto e, estacas cravadas de concreto. A norma ABNT/NBR 6118 considera que o módulo de elasticidade secante ‘ E_{sc} ’, ou por simplicidade chamada pela própria norma módulo de elasticidade estático, é calculado a partir da expressão:

$$E_{cs} = 0,85E_{ci} = 0,85 * 5600\sqrt{f_{ck}} = 4760 * \sqrt{f_{ck}}$$

Onde o valor da resistência à compressão ‘ f_{ck} ’, foram consideradas a partir dos relatórios, resumidos na tabela (5.2).

Os cálculos foram realizados para os mesmos casos em que foi empregado o módulo de elasticidade dinâmico, cujos resultados das melhores fórmulas, com maior acurácia, foram comparados com os resultados da tabela (5.12), com a

finalidade de observar a variação da previsão da resistência mobilizada das estacas. Os resultados são apresentados no anexo (3).

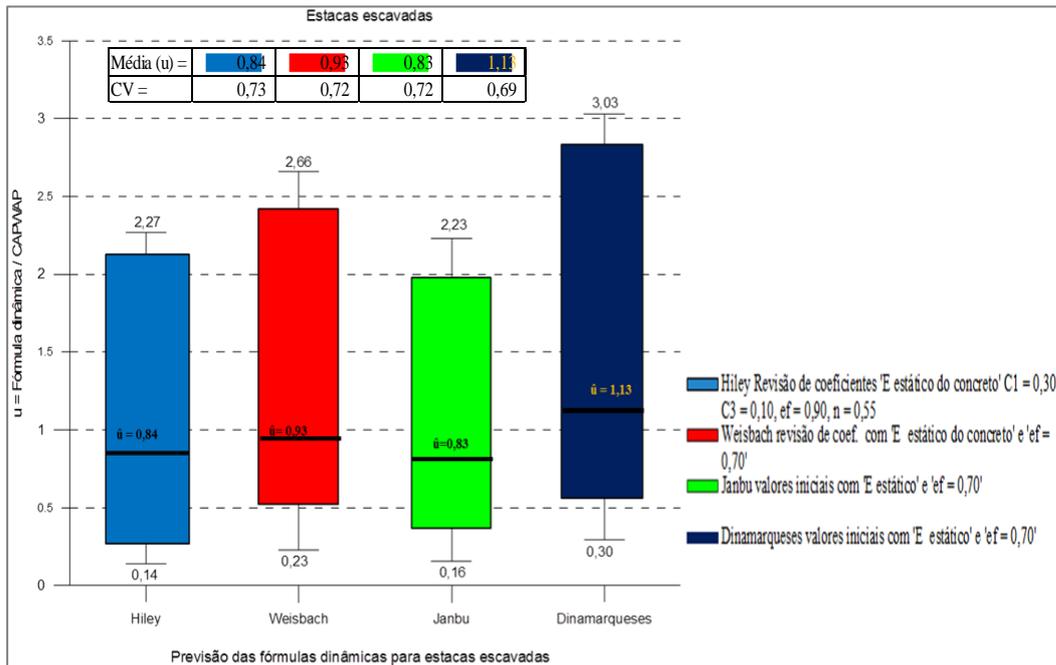


Figura 5.19 - Relação (u =Fórmula dinâmica/CAPWAP) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas escavadas com módulo de elasticidade estático.

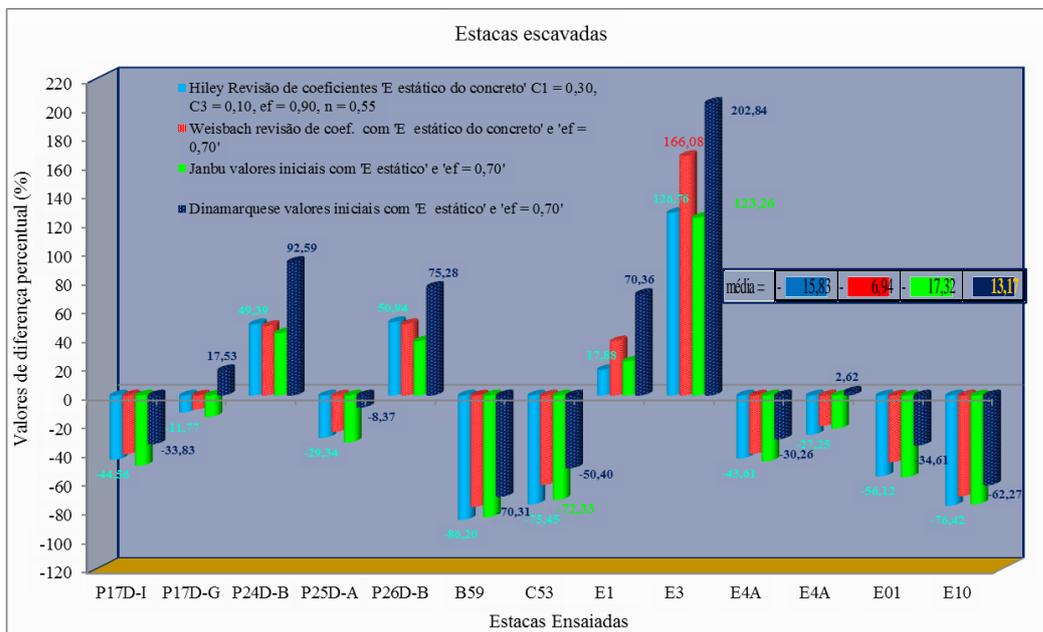


Figura 5.20 – Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas escavadas considerando módulo de elasticidade estático.

A partir dos gráficos (5.19) e (5.20), comparam-se os valores das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, usando módulo de elasticidade estático e, módulo de elasticidade dinâmico do concreto plotadas nas figuras (5.13) e (5.14), para estacas escavadas.

Percebe-se que a média da relação ($u = \text{fórmula dinâmica}/\text{CAPWAP}$) é diminuída para todas as fórmulas dinâmicas, quando é utilizado módulo de elasticidade estático, por exemplo, a fórmula dinâmica dos Dinamarqueses (com $e_f = 0,70$), a média da relação foi de ($u = 1,20$), agora usando módulo de elasticidade estático é obtida um valor de ($u = 1,13$).

No caso da média da diferença percentual também é diminuída, para todas as fórmulas dinâmicas, por exemplo, para a mesma fórmula dos Dinamarqueses (com $e_f = 0,70$) a variação percentual foi de (20,27%), agora usando o módulo de elasticidade estático é obtida um valor de (13,17%). A fórmula dos Dinamarqueses (com $e_f = 0,70$) apresenta maior correlação, com coeficiente de determinação maior ($R^2 = 0,67$), média da relação ($u = 1,13$), menor coeficiente de variação. Portanto esta fórmula, usando módulo de elasticidade estático tem menor dispersão que as demais fórmulas, seguida da fórmula de Weisbach.

Observa-se que os resultados das fórmulas dinâmicas usando módulo de elasticidade estático para estacas escavadas, apresentam-se bastantes conservadores em relação ao uso do módulo dinâmico na previsão.

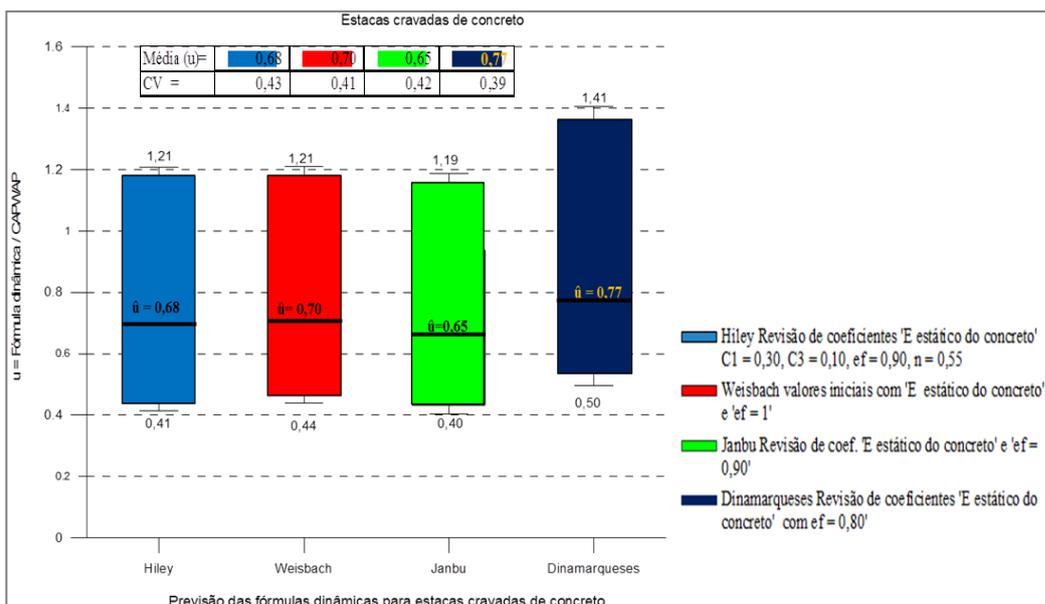


Figura 5.21 - Relação ($u = \text{Fórmula dinâmica}/\text{CAPWAP}$) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas cravadas de concreto, com módulo de elasticidade estático.

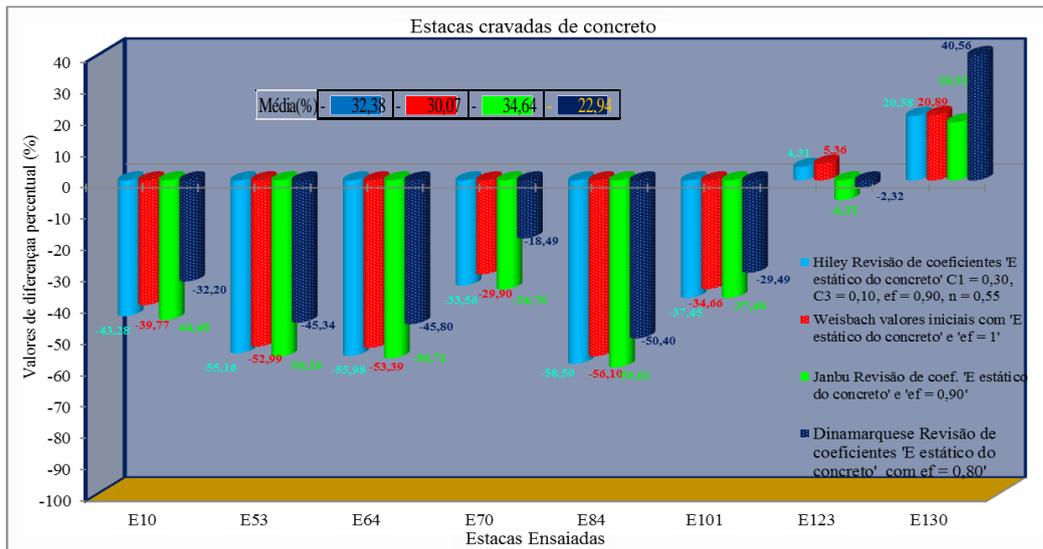


Figura 5.22 – Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas cravadas de concreto, considerando módulo de elasticidade estático.

Ao comparar os resultados para o caso de estacas cravadas de concreto a partir dos gráficos (5.21) e (5.22), com os gráficos plotados (5.15) e (5.16). Verifica-se que a relação ($u = \text{Fórmula dinâmica} / \text{CAPWAP}$) e a diferença percentual são diminuídas sobre a média para todas as fórmulas dinâmicas usando módulo de elasticidade estático.

A fórmula dos Dinamarqueses para uma revisão de coeficiente com ' $e_f = 0,80$ ', usando módulo de elasticidade estático, além de ter menor diferença percentual, média da relação ($\hat{u} = 0,77$) próxima à unidade e, menor valor de coeficiente de variação, apresenta uma proximidade com os valores do CAPWAP, seguido da fórmula de Weisbach com ' $e_f = 1$ ' e a fórmula de Hiley com coeficientes ' $C_1 = 0,30$ ', ' $C_3 = 0,10$ ', ' $e_f = 0,90$ ', ' $n = 0,55$ '.

Os resultados das fórmulas dinâmicas em todos os casos são subestimados quando é usado o módulo de elasticidade estático. Além disso, foi observado que o coeficiente de determinação para cada fórmula dinâmica, sofreu um pequeno acréscimo para cada caso de estudo.

5.5.

Previsão da resistência mobilizada pelas fórmulas, sem fator de correção, usando módulo de elasticidade dinâmico

Conforme discutido no item (5), as fórmulas dinâmicas consideradas neste estudo contém diversos fatores de correção. Estas fórmulas dinâmicas são estabelecidas com base a diferentes hipóteses, seus resultados são bastante diferentes e, portanto, o coeficiente de correção depende da fórmula utilizada e pode variar numa faixa bastante ampla (entre 2 a 10).

Alguns autores consideram que a resistência à cravação estimada pelas fórmulas dinâmicas, pode ser obtida dividindo por um fator de correção, que fará o desconto da resistência dinâmica (Velloso e Lopes, 2002).

Entretanto, outros autores consideram, que o uso dos fatores de correção não esta ligado à segurança, mas sim à imprecisão da fórmula, se a fórmula fornece a resistência à ruptura com uma certa precisão o fator de correção deveria ser algo em entorno a 2, que é sugerido pela norma NBR 6122 (De Rosa,2000).

Algumas fórmulas dinâmicas fornecem a resistência mobilizada, outras a resistência à ruptura. As fórmulas dinâmicas que utilizam o repique elástico como Chellis (1961), Uto (1985), fornecem a resistência mobilizada, então quando o resultado da fórmula dinâmica for a resistência mobilizada é possível de correlacionar diretamente com os valor do CAPWAP. Entretanto lembre-se que este fornece a resistência mobilizada sim fator de segurança.

No livro de Chellis (1961) apresenta inúmeras fórmulas, umas com 'R' (resistência mobilizada) e 'Ru' (resistência última). A maioria delas resulta da fórmula completa (2.3.2). A separação entre a resistência à 'ruptura' e 'mobilizada' depende do autor, principalmente quando a fórmula deriva-se de correlações empíricas (p.e. a fórmula Eytelwein). Entendendo-se que a resistência à ruptura pelo geral, é a resistência máxima sob ponto do vista geotécnico (por oposição estrutural).

Então na maioria destas fórmulas que fornecem a resistência última devem ser incluído por um fator de correção, para poder realizar as comparações com os valores do CAPWAP.

Com a finalidade de conferir a possibilidade de que algumas fórmulas dinâmicas como Janbu, que foi estabelecido a través de correlações empíricas, a previsão da resistência mobilizada pelas fórmulas dinâmicas é recalculada sem

considerar os fatores de correção. A partir destes resultados, foi analisada a possibilidade que a fórmula dinâmica forneça resistência mobilizada ou resistência á ruptura.

O procedimento foi avaliado para os mesmos casos em que foi usado o módulo de elasticidade dinâmico, apresentando-se as melhores fórmulas dinâmicas plotadas nos gráficos (5.23) a (5.28), resumidas na tabela (3.4) no anexo (4).

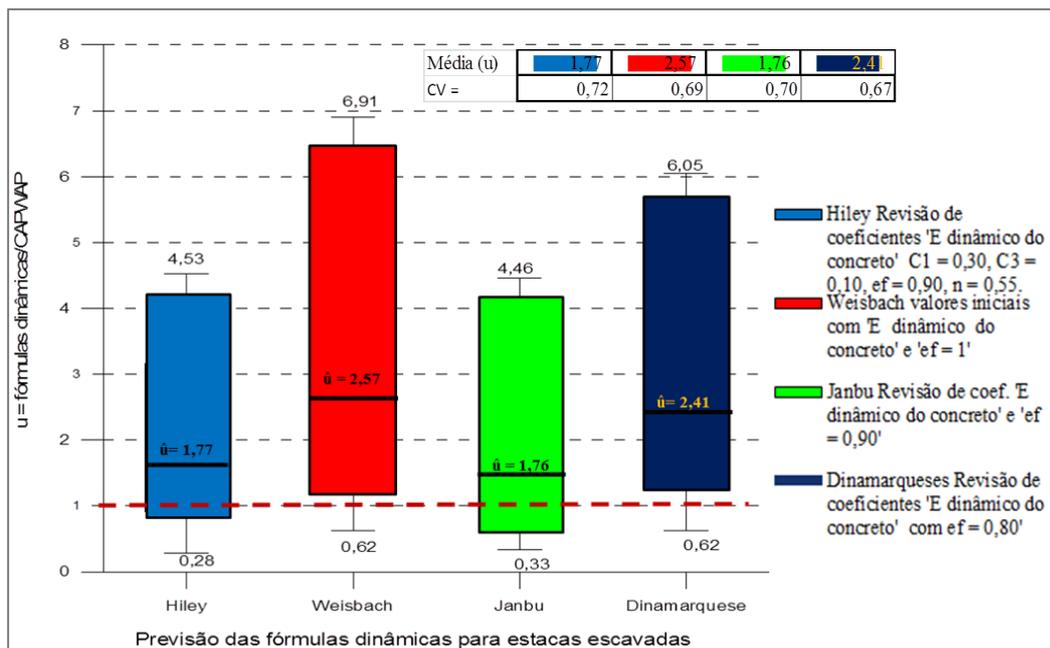


Figura 5.23 - Relação ($u = \text{Fórmula dinâmica}/\text{CAPWAP}$) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas escavadas, sem fator de correção.

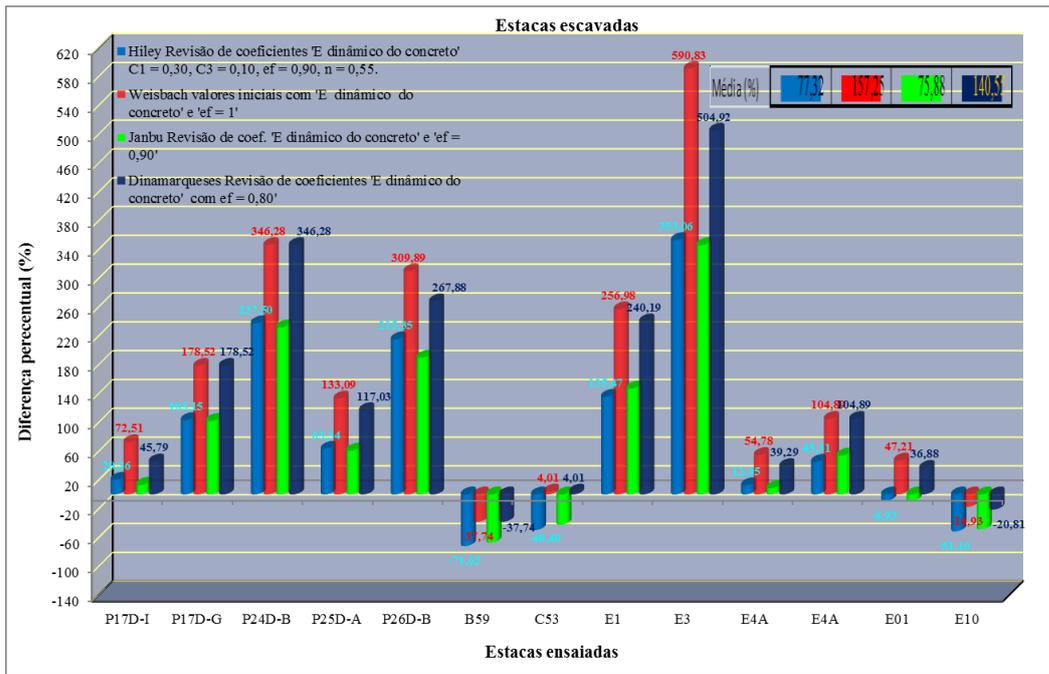


Figura 5.24 – Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas escavadas, sem fator de correção.

Ao analisar os resultados dos gráficos (5.23) e (5.24) para estacas escavadas, percebe-se que a fórmula de Janbu sem usar fator de correção tem uma proximidade regularmente com os valores do CAPWAP, com um valor da média da relação ($\hat{u}=1,76$) ligeiramente superestimado, menor diferença percentual que as outras fórmulas dinâmicas, apesar de ter menor coeficiente de correlação que a fórmula dos Dinamarqueses. Porém estas fórmulas dinâmicas têm uma grande dispersão, devido ao alto valor do coeficiente de variação em relação às outras fórmulas.

No caso das fórmulas dinâmicas de Weisbach, Hiley e Dinamarqueses, superestimam no geral os valores da previsão da resistência.

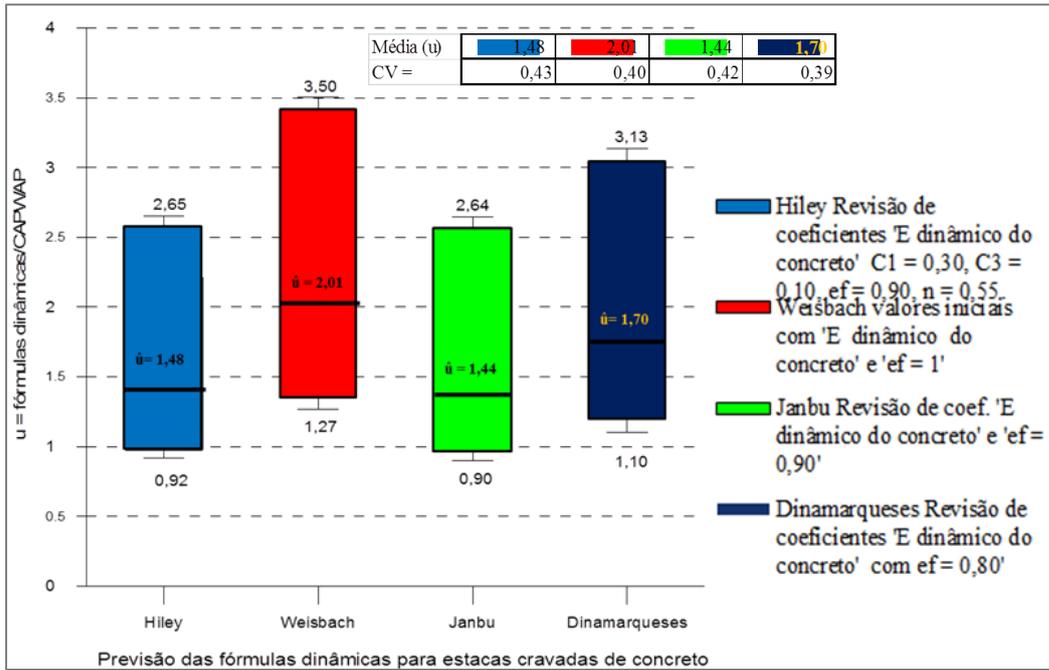


Figura 5.25 - Relação (u =Fórmula dinâmica/CAPWAP) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas cravadas de concreto, sem fator de correção.

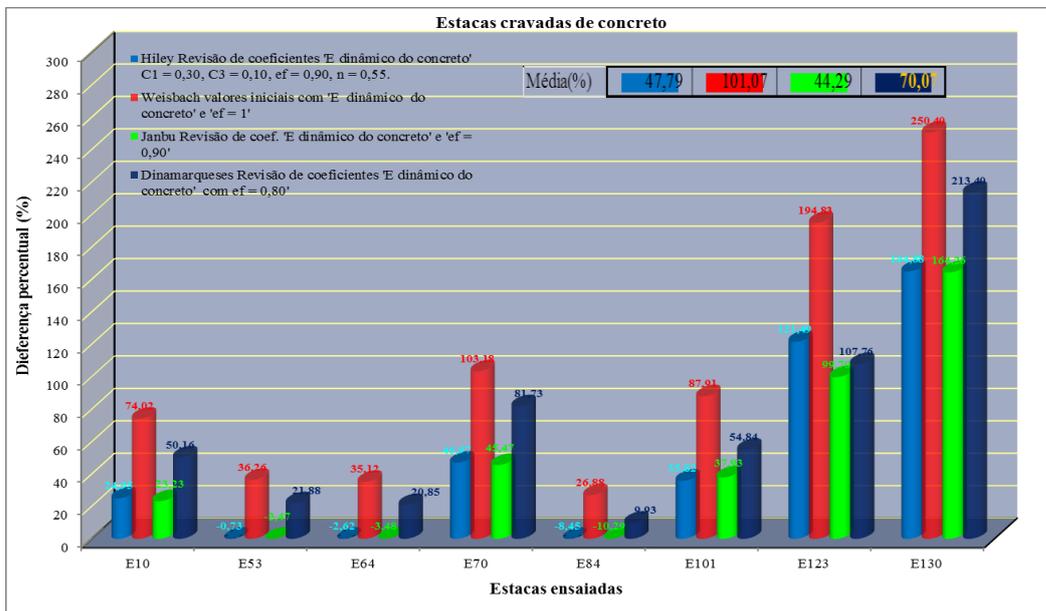


Figura 5.26 – Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas cravadas de concreto, sem fator de correção.

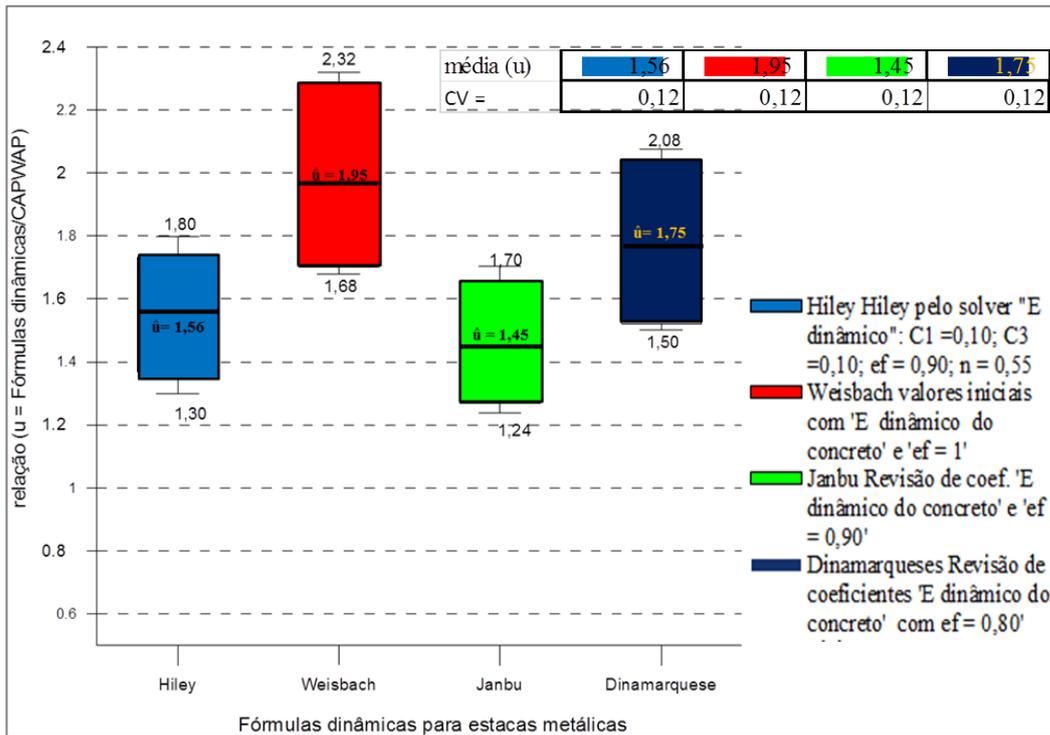


Figura 5.27 - Relação (u =Fórmula dinâmica/CAPWAP) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas metálicas, sem fator de correção.

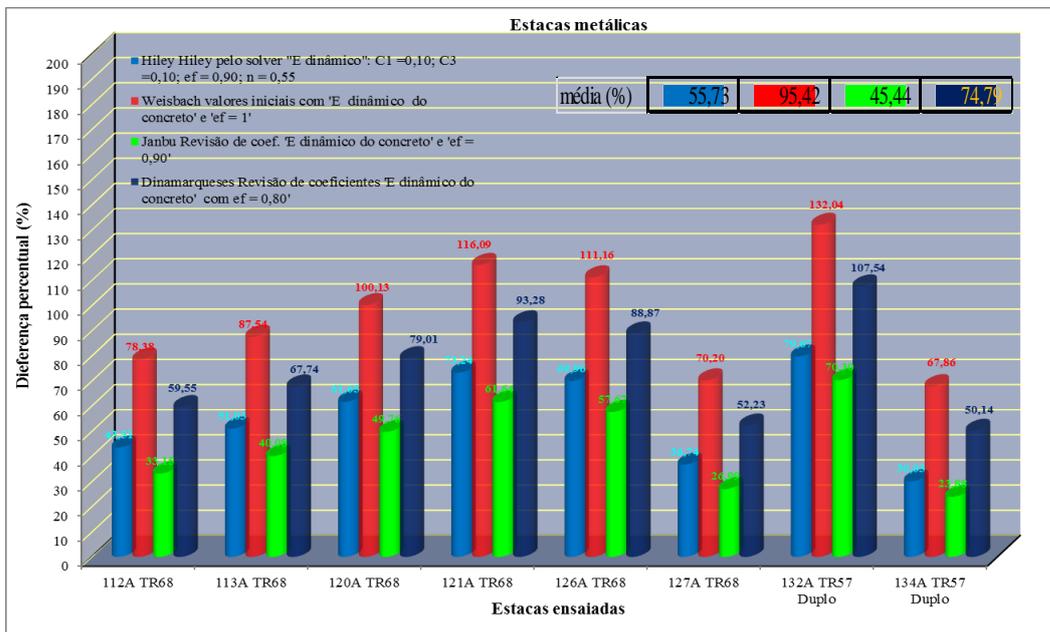


Figura 5.28 – Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas metálicas, sem fator de correção.

Nas figuras apresentadas (5.25) a (5.28), observa-se que as fórmulas dinâmicas de Janbu e Hiley fornecem resultados conservadores tanto para estacas cravadas de concreto e metálicas sem usar fator de correção. No caso das fórmulas de Weisbach e Dinamarqueses, superestimam os resultados ao ser comparados com os valores do CAPWAP.

Pelo citado acima, observa-se que as fórmulas dinâmicas de Hiley, Weisbach e Dinamarqueses, superestimam a previsão em cada caso, provavelmente estas fórmulas fornecem resistências últimas. Entanto para ser comparadas com os valores do CAPWAP, precisam de um fator de correção, na faixa de valores considerados por cada autor.

No caso da fórmula dinâmica de Janbu tem uma proximidade com os valores do CAPWAP em cada caso de estudo, com menor diferença percentual e média da relação (\hat{u}) pouco afastado da unidade, provavelmente esta fórmula fornece a resistência mobilizada das estacas. Portanto pode ser comparado diretamente com os valores do CAPWAP, sem o uso de um fator de correção.