IX SINMCA
IX Simpósio do Noroeste Mineiro de Ciências Agrárias e
VIII Semana Acadêmica
25 a 27 de novembro de 2025

Comparando valores de resistência à penetração do solo: influência do tipo de equipamento, classe de solo e da umidade.

Henrique C. Lopes [1,*], Maria T. Q. Santos [2], Northon M. S. Castro [3], Lorena A. Santos [1], Flávia M. Silva [1], Ingrid H. Terra [4] e Fabrício S. Terra [4]

[1] *Graduando em Engenharia Agrícola e Ambiental - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, Unaí-MG*
[2] *Engenheira Agrícola e Ambiental - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM, Unaí/MG*
[3] *Mestre em Produção Vegetal, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, Diamantina/MG*
[4] *Professora adjunta, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM, Unaí/MG*

***E-mail do autor principal:** Henrique.lopes@ufvjm.edu.br

RESUMO EXPANDIDO

INTRODUÇÃO

A resistência à penetração (RP) é uma variável física amplamente reconhecida na ciência do solo por sua capacidade de expressar, de forma indireta, o grau de compactação e a qualidade estrutural dos horizontes superficiais e subsuperficiais. Trata-se de uma propriedade intimamente associada à densidade, à textura, ao teor de umidade e ao arranjo das partículas do solo, influenciando diretamente o crescimento radicular, a absorção de nutrientes e a circulação de água e ar no perfil (Doran; Parkin. 1994).

No contexto agrícola, a RP tem ganhado destaque como ferramenta essencial de diagnóstico da degradação física dos solos, especialmente em regiões tropicais onde o uso intensivo de máquinas agrícolas tem promovido modificações severas na estrutura. A compactação, resultado da aplicação de pressões mecânicas acima da capacidade de suporte do solo, reduz a macroporosidade e compromete processos hidrológicos e biológicos (Soane; Van Ouwerkerk, 1994). Além de restringir o crescimento radicular, a compactação altera o balanço hídrico, reduzindo a infiltração e aumentando o escoamento superficial, com implicações diretas na erosão e na perda de nutrientes.

A avaliação da resistência mecânica à penetração é realizada por meio de equipamentos denominados penetrômetros, que medem a força necessária para que um cone padronizado penetre o solo. Tais equipamentos fornecem informações rápidas, permitindo diagnósticos em campo e laboratório. Existem diferentes tipos, sendo os mais comuns o Penetrômetro de Impacto (PI), o Penetrômetro de Anel Dinamométrico (PAD) e o Penetrômetro de Bancada (PB). Cada modelo possui princípios físicos distintos de funcionamento, o que pode resultar em leituras variáveis para o mesmo solo, especialmente sob diferentes condições de umidade (Beutler et al. 2007).

Em solos tropicais, onde a variação de umidade e densidade é acentuada, a comparação entre métodos de medição torna-se essencial. O comportamento da RP é altamente dependente do teor de água. Solos secos apresentam maior resistência devido à força de coesão entre partículas, enquanto solos úmidos têm resistência reduzida, pois o filme de água atua como lubrificante. Esta relação inversa foi amplamente demonstrada por (Souza; Alves 2003), que observaram reduções de até 80% na RP em Latossolos após reumidificação controlada.

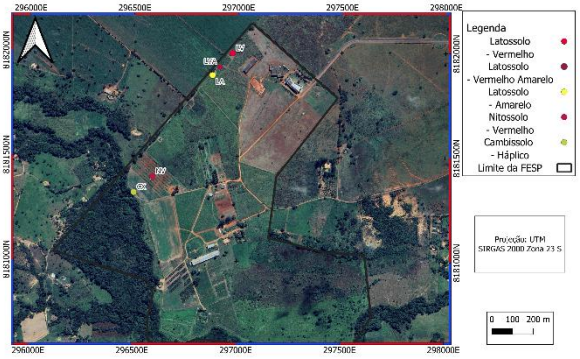
Neste contexto, a padronização das medições entre penetrômetros é um desafio metodológico e científico. Estudos comparativos indicam que a calibração entre equipamentos de campo e laboratório é necessária para garantir a comparabilidade dos resultados e possibilitar interpretações mais precisas sobre o estado estrutural dos solos (Reinert; Reichert, 2007; Beutler et al., 2007).

Desta forma, o presente estudo teve como objetivo comparar o desempenho dos penetrômetros PI, PAD e PB em diferentes classes de solo e sob condições contrastantes de umidade, a fim de propor equações de calibração que permitam a padronização das medições. Buscou-se, assim, compreender as limitações e potencialidades de cada método, fornecendo subsídios técnicos para a interpretação de parâmetros físicos relacionados à compactação e qualidade estrutural dos solos.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido na Fazenda Experimental Santa Paula (FESP/ICA/UVFJM) (Figura 1), localizada no município de Unaí (MG). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é tropical de savana (Aw), caracterizado por verão chuvoso e inverno seco. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.450 mm, e a temperatura média situa-se entre 22°C e 24°C. O relevo predominante é plano a suavemente ondulado e a altitude média é 615 m.

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Autor 2025

Foram selecionadas cinco classes de solos distintas: Cambissolo Háplico (CX), Nitossolo Vermelho (NV), Latossolo Amarelo (LA), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho (LV). Os solos foram amostrados em duas condições hídricas: seca e úmida. Cada condição foi analisada em triplicata, totalizando quinze pontos de medição por equipamento, distribuídos no entorno de trincheiras representativas de cada classe.

Os equipamentos utilizados foram os seguintes: Penetrômetro de Impacto (PI) (Figura 2), Penetrômetro de Anel Dinamométrico (PAD) (Figura 3) e Penetrômemtro de Bancada (PB) (Figura 4). O PI mede a profundidade alcançada pelo cone após impactos sucessivos de um martelo padrão. A energia acumulada é convertida em RP (kgf/cm²) por equações empíricas baseadas no número de impactos e na massa do equipamento. O PAD utiliza um anel metálico calibrado que se deforma elasticamente sob compressão, permitindo medir diretamente a força aplicada. O PB é um equipamento estático de laboratório (Solotest CSL-20Kgf), no qual amostras indeformadas são submetidas à penetração controlada, permitindo medições precisas sob condições padronizadas de umidade e densidade.

Figura 2. Penetrômetro de impacto modelo Stolf



Fonte: Soilcontrol

Figura 3:Penetrômetro de Anel Dinamométrico.



Fonte: Marberg

Figura 4:Penetrômetro de Bancada.



Fonte: Autor 2025

Antes das medições, as amostras foram preparadas e classificadas segundo a textura e densidade aparente. As variáveis determinadas incluíram: umidade gravimétrica (UG), umidade volumétrica (UV) e densidade do solo (DS). As análises seguiram metodologias descritas pela (Embrapa 2017).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com os fatores “tipo de solo” e “condição de umidade”. A análise estatística dos dados envolveu ANOVA e teste de Tukey a 5% de probabilidade. As correlações entre equipamentos foram calculadas pelo coeficiente de Pearson (r), e modelos de regressão linear foram ajustados para as relações significativas ($r \geq 0,5$), obtendo-se as equações de calibração entre pares de equipamentos (PI×PB, PAD×PB e PI×PAD). Estas equações foram utilizadas para avaliar a concordância entre métodos e a viabilidade de substituir equipamentos mais sofisticados por alternativas portáteis em campo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados mostraram que a resistência à penetração é fortemente influenciada pela umidade do solo e pela densidade aparente, confirmando a sensibilidade da RP a variações estruturais. Em condições secas, os valores médios de RP foram significativamente maiores, atingindo 112,78 kgf cm^{-2} no CX (Tabela 1).

Tabela 1: Valores médios de resistência do solo à penetração, entre equipamentos, e valores médios de umidade volumétrica e densidade do solo na condição seca.

Classe		PI	PAD	PB	U.V	DS
			(kgf cm^{-2})		(%)	(g cm^{-3})
CX	Média	112,78	18,24	75,84	2,57	1,30
	DP	28,64	15,21	7,39	0,37	0,08
	Var	820,49	231,47	54,68	0,14	0,01
NV	Média	78,93	19,88	77,10	7,27	1,24
	DP	32,23	23,48	25,24	1,74	0,01
	Var	1558,03	826,72	955,58	4,54	0,00
LA	Média	96,64	17,06	99,62	6,78	1,26
	DP	36,33	9,67	33,96	3,64	0,10
	Var	1320,15	93,44	1153,16	13,22	0,01
LVA	Média	97,47	19,04	44,39	9,75	1,04
	DP	32,48	12,29	21,92	1,66	0,01
	Var	1054,94	150,95	480,66	2,74	0,00
LV	Média	103,21	23,44	62,68	10,50	1,27
	DP	29,28	10,10	11,50	1,39	0,12
	Var	857,17	101,96	132,21	1,94	0,01
Média Geral		97,80 [a]	19,53 [b]	71,92 [a]	7,37	1,22
DP Geral		34,96	15,71	29,68	3,58	0,13
Var. Geral		1140,50	230,47	822,15	11,99	0,02

Fonte: Santos T.Q Maria.2024

Em contrapartida, em solos úmidos, especialmente no Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), as leituras diminuíram para 10,17 kgf/cm² (PB) (Tabela 2), indicando que a água reduz a coesão entre as partículas e, consequentemente, a resistência mecânica à penetração.

Tabela 2: Valores médios de resistência do solo à penetração, entre equipamentos, e valores médios de umidade volumétrica e densidade do solo na condição úmida.

Classe		PI	PAD	PB	U.V	DS
			(kgf cm^{-2})		(%)	(g cm^{-3})
CX	Média	62,32 1	0,43	80,80	17,38	1,29
	DP	50,78	4,98	3,90	5,09	0,05
	Var	1719,08	16,50	10,16	17,29	0,00
NV	Média	45,41	1,90	81,10	26,47	1,14
	DP	10,61	0,21	3,92	5,46	0,06
	Var	74,99	0,03	10,22	19,86	0,00
LA	Média	55,36 1	0,74	31,90	36,15	1,02
	DP	14,32	4,29	36,47	9,88	0,03
	Var	205,13	18,41	1330,30	97,66	0,00
LVA	Média	47,71	2,37	10,17	32,86	0,96
	DP	23,90	0,31	9,47	0,89	0,01
	Var	380,91	0,06	59,80	0,53	0,00
LV	Média	27,78	2,16	16,23	42,04	1,01
	DP	10,62	0,22	2,30	7,54	0,05
	Var	112,85	0,05	5,27	56,87	0,00
Média Geral		46,71 [a]	4,07 [b]	40,19 [a]	32,47	1,06
DP Geral		25,72	3,86	36,30	9,46	0,12
Var. Geral		591,37	13,39	1227,82	79,57	0,01

Fonte: Santos T.Q Maria.2024

De acordo com (Beutler et al. 2007), essa relação inversa entre RP e umidade é típica de solos tropicais, nos quais as partículas finas e o alto teor de óxidos de ferro aumentam a coesão em condições secas. Resultados semelhantes foram observados por (Souza; Alves. 2003), que constataram redução de até 70% na RP em Latossolos após reumidificação controlada, reforçando a importância de considerar o estado hídrico nas avaliações de compactação.

Entre equipamentos, PB apresentou os menores coeficientes de variação e as maiores correlações, dessa forma a análise de correlação entre os equipamentos mostrou que, em condições úmidas, houve maior concordância entre os equipamentos, com destaque para a relação entre PI e PB no LVA. Em condições secas, as discrepâncias tornaram-se mais pronunciadas, especialmente envolvendo o PAD, em algumas classes de solo, evidenciando limitações na detecção de variações de resistência em solos mais duros.

O PB demonstrou o melhor desempenho geral, apresentando consistência nos valores medidos e sensibilidade suficiente para refletir diferenças estruturais entre classes de solo e estados hídricos distintos.

PI mostrou eficácia principalmente em solos secos, como o CX e LA, fornecendo medições coerentes com os valores de referência do PB, mas sua precisão depende do operador e do número de impactos, conforme destacado em estudos clássicos sobre penetrômetros de impacto. Por outro lado, o PAD, embora prático e portátil, apresentou limitações na capacidade de refletir com fidelidade as variações de RP em solos mais densos e secos.

sendo considerado o padrão de referência. PI mostrou boa eficiência em solos mais densos e secos, mas sua precisão variou conforme o operador e o número de golpes aplicados, como descrito em estudos clássicos sobre penetrômetros de impacto. PAD apresentou menor reprodutibilidade em solos com baixa umidade, possivelmente devido à variação na deformação do anel sob cargas mais elevadas.

As correlações mais elevadas foram observadas entre PI e PB em condições úmidas no LVA, enquanto as menores correlações ocorreram entre PAD e PB em solos secos (Tabela 3).

Tabela 3: Correlações dos valores de resistência do solo à penetração entre equipamentos por classe de solo conjuntamente.

Classe de solo	Períodos	PI vs PAD	PI vs PB	PB vs PAD
Todas as classes	Seco e úmido	0,92	-0.01	0,77
	Seco	0,51	-0,11	0,62
	Úmido	0,45	-0,48	0,48
CX	Seco e úmido	0,29	-0,14	-0,77
	Seco	-0.04	0,72	-0,72
	Úmido	0,40	-0,82	-0,86
NV	Seco e úmido	0,91	-0.18	-0,55
	Seco	0,91	-0.19	-0,58
	Úmido	0,65	0,91	0,28
LA	Seco e úmido	0,47	0,33	0,80
	Seco	0,15	0,14	1,00
	Úmido	0,83	-0,21	0,37
LVA	Seco e úmido	0,92	0,95	0,94
	Seco	1,00	0,91	0,93
	Úmido	-0,91	0,92	-0,67
LV	Seco e úmido	0,90	0,71	0,79
	Seco	0,69	-0,68	0,06
	Úmido	-0,22	0,25	-1,00

Fonte: Santos T.Q Maria.2024

Os modelos de regressão linear ajustados apresentaram coeficientes de determinação (R^2) entre 0,52 e 1,00 indicando que, embora existam diferenças construtivas entre os penetrômetros, é possível estabelecer equações de equivalência confiáveis. (Tabela 4)

Tabela 4: Equações com melhores interações entre as classes de solo, condições de umidade e equipamentos conjuntamente.

Classe	Períodos	Equipamento	Função Linear	R^2
CX	Seco	PB vs PI	0.1871x+54.741	0.53
NV	Seco	PD vs PI	0.6653x-32.637	0.83
	Úmido	PB vs PI	0.3348x+65349	0.82
	Geral	PD vs PI	0.5920x-25.885	0.83
LA	Seco	PB vs PD	3.5129x+39.683	1.00
	Úmido	PD vs PI	0.2484x-5.3887	0.69
	Geral	PB vs PD	3.8293x+29.449	0.64
LVA	Seco	PB vs PI	0.6171x-15.756	0.84
	Seco	PD vs PI	0.3779x-17.787	1.00
	Seco	PB vs PD	1.6629x-12.722	0.87
	Úmido	PB vs PI	0.3644x-7.2186	0.85
	Geral	PD vs PI	0.3025x-11.252	0.84
	Geral	PB vs PI	0.6198x-17.275	0.89
	Geral	PB vs PD	1.8449x-7.5231	0.88
LV	Geral	PD vs PI	0.264x-4.4858	0.81
	Geral	PB vs PI	0.4011x+13.182	0.50
	Geral	PB vs PD	1.5251x+19.928	0.63

Fonte: Santos T.Q Maria.2024

Estes resultados estão de acordo com Reinert e Reichert (2007) que destacaram a importância de manter uma taxa constante de penetração para reduzir erros operacionais, e com Beutler et al. (2007), que discutiram a calibração e precisão de diferentes modelos de penetrômetros. Além disso, Bono et al. (2012) demonstraram que a compactação afeta negativamente a infiltração de água e o balanço hídrico, evidenciando o impacto da RP sobre a dinâmica da água no solo.

De modo geral, a análise comparativa mostrou que a padronização entre equipamentos é possível e necessária para garantir a confiabilidade das medições em diferentes condições de campo. O uso do PB como referência permite calibrar os demais penetrômetros, garantindo maior precisão nas avaliações de resistência à compactação. A combinação dos resultados obtidos com os de Souza e Alves (2003) e Beutleet al. (2007) reforça que o controle da compactação deve integrar o manejo físico do solo, visando manter a estrutura e a sustentabilidade da produção agrícola.

CONCLUSÃO

Os resultados indicam que existe diferença nas medições de RP entre equipamentos e que a calibração entre estes é essencial para garantir a comparabilidade das medições. A interpretação dos valores de RP obtidos é dependente da umidade e do tipo de solo.

Este estudo mostra que a escolha do equipamento mais adequado depende das condições do solo e do objetivo da avaliação: o PB permanece como referência de precisão e sensibilidade, o PI é indicado para solos secos e mais densos com medições rápidas, enquanto o PAD deve ser utilizado com cautela, especialmente em solos de maior resistência, reforçando a importância da calibração e da interpretação criteriosa dos resultados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo financiamento da bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

BEUTLER, A. N. et al. Uso de penetrômetros na agricultura: uma revisão. *Engenharia Agrícola*, 27(1), 179–193, 2007.

BONO, F. et al. Impacto da compactação do solo sobre o balanço hídrico e infiltração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 112–123, 2012.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, 3–21, 1994.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Brasília: Embrapa, 2017.

REINERT, D.; REICHERT, J. M. Comparação de métodos de penetração de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 301–310, 2007.

SANTOS T.Q MARIA. Resistência à penetração do solo: Análise comparativa entre diferentes penetrômetros. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em *Engenharia Agrícola e Ambiental - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, Unaí-MG,2024.*

SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production*, 1–9, 1994.

SOUZA, Z. M.; ALVES, A. C. Efeito da reumidificação sobre a resistência à penetração em Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27, 415–423, 2003