

## Referências bibliográficas

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR's 6459/1986, 6508/1984, 7183/1982 e 7181/198**, Rio de Janeiro.

ABRAMENTO, M. & PINTO, C. S., Resistência ao Cisalhamento de Solo Coluvionar Não Saturado das Encostas da Serra do Mar, **Solos e Rochas**, **16 (3)**, 145-158, 1993.

ABRAMENTO, M., **Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados: Considerações Teóricas e Estudo Experimental sobre Solo Coluvionar das Encostas da Serra do Mar**, Dissertação de Mestrado, EPUSP/SP, São Paulo, 1988.

ABRAMENTO, M. & CARVALHO, C. S., Geotechnical Parameters for Study of Natural Slopes Instabilization at Serra do Mar, Brazil, **Proc. 12th Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Engn.**, Rio de Janeiro, Balkema, vol.2, 1599-1602, 1989.

AITCHISON, G. D.; RUSSAM, K. & RICHARDS, B. G., Engineering Concepts of Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils. **Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas**, Butterworths, Sidney, Australia, 66-84, 1965.

ALONSO, E. E.; GENS, A. & HIGHT, D. W., Special Problems Soils, **Proceedings 9th E.C.S.M.F.E.**, Dublin, General Report, Session 5, 5.1-5.60, 1987.

ASTM D 5298-92, Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper, **ASTM Standards**, vol 15.09, 264-268, 1992.

BARBOUR, S. L., Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium, The Soil-Water Characteristic Curve: a Historical Perspective, **Canadian Geotechnical Journal**, **35**, 873-894, 1998.

BENEVELI, R. M., **Estudo dos Efeitos de Umedecimento e Secagem na Resistência ao Cisalhamento de um Solo Compactado em Laboratório**, Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, RJ, 2002.

BISHOP, A. W., The Principle of Effective Stress, **Tecknisk Ukeblad**, **106** (39), 859-863, 1959.

BISHOP, A. W.; ALPAN, I.; BLIGHT, G. E. & DONALD, I. B., Factors Controlling the Shear Strength of Partly Saturated Cohesive Soils, **Proceedings Conference on Shear Strength of Cohesive Soils**, 503-552, Univ. of Colorado, Boulder, 1960.

BLIGHT, G. E., Aspects of the Capillary Model for Unsaturated Soils, **Proceedings 7th Asian Reg. Conf. on S.M.F.E.**, Haifa, v1, 1-7, 1983.

BOCKING, K. A. & FREDLUND, D. G., Limitations of the Axis Translation Technique, **Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils**, **1**, 117-135, Denver, Colorado, 1980.

BRESSANI, L. A.; HORN, M. R.; BICA, A. V. D. & GEHLING, W. Y. Y., Estudo da Resistência ao Cisalhamento de um Solo Residual de Granito da Região de Porto Alegre, RS, **Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, **1**, 199-206, Rio de Janeiro, 1997.

BRITO, A. T. A., **Estudo Químico e Mineralógico de um Perfil de Alteração de Gnaisse Migmatítico do Campo Experimental da PUC-RJ, Gávea, Rio de Janeiro**, Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, RJ, 1981.

CARVALHO, A. C. M. G., **Desenvolvimento de um Difusímetro para Solos Não Saturados**, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CHANDLER, R. J. & GUTIERREZ, C. I., The Filter Paper Method of Suction Measurement, **Geotechnique**, **36**, 265-268, 1986.

CHANDLER, R. J., CRILLY, M. S. & MONTGOMERY-SMITH, G., A Low Cost Method of Assessing Clay Desiccation for Low- Rise Buildings, **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, Vol. 92, No. 2, 82-89, 1992.

CHING, R. K. H. & FREDLUND, D. G., A Small Saskatchewan Town Copes with Swelling Clay Problems, **Proc. 5th Int. Conf. Expansive Soil**, 306-310, 1984.

DAS, B. M.; YEN, S. C. & DASS, R. N, Brazilian Tensile Strength Test of Lightly Cemented Sand, Technical Note, **Canadian Geotechnical Journal**, **32**, 166-171, 1995.

DAYLAC, R., **Desenvolvimento e Utilização de Uma Célula Para Medição de Ko Com Controle de Sucção**, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994.

DE ARAÚJO, R. C., **Estudo da Erodibilidade de Solos da Formação Barreiras-RJ**, Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2000.

DE CAMPOS, L. E. P., **Influência da Sucção na Estabilidade de Taludes Naturais em Solos Residuais**, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1984.

DE CAMPOS, T. M. P., *Comunicação Pessoal* (1988).

DE CAMPOS, T. M. P. & CARRILLO, C. W., Direct Shear Testing on na Unsaturated Soil from Rio de Janeiro, **Proceedings Unsaturated Soils**, **1**, 31-38, Paris, 1995.

DE CAMPOS, T. M. P. ET AL., Determinação da Curva Característica de Sucção em Laboratório, 1º COBRAE, RJ, **Anais...** 835-851, 1992.

DE CAMPOS, T. M. P., Equipamento e Técnicas para a Determinação da Sucção no Campo, **Anais do 2º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, **1**, 9-18, Recife, 1994.

DE CAMPOS, T. M. P., Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados, **Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, 2, 399-417, Rio de Janeiro, 1997.

DE CARVALHO, J. C.; GUIMARÃES, R. C. & PEREIRA, J. H. F., Corbes de Retention d'eau d'un Profil d'alteration, **Unsaturated Soils**, Recife, v.1, 289-294, 2002.

DE CARVALHO, J. C. & LEROUEIL, S., Curva Característica de Sucção Transformada, **Solos e Rochas**, 27 (3), 231-242, 2004.

DELGADO, C. W. C., **Resistência ao Cisalhamento dos Solos Coluvionares e Residuais Não Saturados da Vista Chinesa, RJ**, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993.

DONALD, I. B., Effective Stress Parameters in Unsaturated Soils, **In Proceedings 4th Australia–New Zealand Conf. Soil Mech. Found. Eng. Adelaide**, South Australia, 41–46, 1963.

DRUMRIGHT, E. E. & NELSON, J. D., The Shear Strength of Unsaturated Tailings Sand, **Proceedings Unsaturated Soils**, 1, 45-50, Paris, 1995.

DUARTE, A. P. L., **Avaliação de Propriedades Termo-Hidráulicas de Solos Requeridas na Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica**, Tese de Doutorado, DEC, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2004.

EDIL, T. B.; MOTAN, S. E. & TOHA, F. X., Mechanical Behavior and Testing Methods of Unsaturated Soils, **Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM**, STP 740, 114-129, 1981.

ESCARIO, V., Suction Controlled Penetration and Shear Test, **Proceedings 4th Int. Conf. Expansive Soils**, 2, 781-797, Denver, 1980.

ESCARIO, V. & JUCA, J. F. T., Strength and Deformation Partly Saturated Soils, **In Proceedings of the 12th International Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.**, 3, 43-46, Rio de Janeiro, Brazil, 1989.

ESCÁRIO, V. & SÁEZ, J., The Shear Strength of Partly Saturated Soils, **Géotechnique**, **36** (3), 453-456, 1986.

FAVARETTI, M., Tensile Strength of Compacted Clays, **Proceedings Unsaturated Soils**, **1**, 51-56, Paris, 1995.

FONSECA, E. C., **Ensaio de Cisalhamento Direto Com Sucção Controlada em Solos Não Saturados**, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

FONSECA, E. C.; CAMPOS, L. E. P.; PRESA, E. P. & MACHADO, S. L., Ensaio Triaxiais de Estágios Múltiplos com Controle de Sucção em Solos Residuais de Granulito, **Anais do 2º Simpósio sobre Solos Não saturados**, UFPE, Recife, 45-51, 1994.

FREDLUND, D. G., Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate Concepts and Technology for Unsaturated Soils, **Canadian Geotechnical Journal**, **16** (3), 521-531, 1979.

FREDLUND, D. G. & XING, A., Equations for the Soil-Water Characteristic Curve, **Canadian Geotechnical Journal**, 521-532, 1994.

FREDLUND, D. G. & MORGENSTERN, N. R., Stress State Variables for Unsaturated Soils, **Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE**, **103 GT5**, 447-466, 1977.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. & WIDGER, R. A., The Shear Strength for Unsaturated Soils, **Canadian Geotechnical Journal**, **15** (3), 313-321, 1978.

FREDLUND, D.G.; XING, A.; FREDLUND, M.D. & BARBOUR, S.L, The Relationship of the Unsaturated Soil Shear Strength to the Soil-Water Characteristic Curve, **Canadian Geotechnical Journal**. **33** (3), 440-448, 1996.

FREDLUND, M. D.; FREDLUND, D. G. & WILSON, G. W, Prediction of the Soil-Water Characteristic Curve from Grain-Size Distribution and Volume-Mass

Properties, **Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, **1**, 13-23, Rio de Janeiro, 1997.

FREDLUND, D. G. & RAHARDJO, H., **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**, John Wiley & Sons, USA, 1993.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. & GAN, J., Nonlinearity of Strength Envelope for Unsaturated Soils, **Proceedings 6th International Conference Expansive Soils**, **1**, 49-54, New Delhi, India, 1987.

FREDLUND, D. G.; XING, A. & HUANG, S., Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the Soil Water Characteristic Curve, **Canadian Geotechnical Journal**, **31**, 533-546, 1994.

FUTAI, M. M.; ALMEIDA, M. S. S. & LACERDA, W. A., Resistência ao Cisalhamento de Solos Tropicais Não-Saturados, **Anais do 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, 43-54, São Carlos, SP, 2004.

GALLEN, P. M., **Measurement of Soil Suction Using the Filter Paper Methods: A Literature Review**, Final Report, Internal Report, Transportation and Geotech. Group, Dep. of Civil Eng, Univ. of Saskatchewan, Saskatoon, Sask., Canada, 1985.

GAN, J. K. M. & FREDLUND, D. G., Multistage Direct Shear Testing of Unsaturated Soils, American Society for Testing Materials, **Geotechnical Testing Journal**, **11 (2)**, 132-138, 1988.

GAN, J. K. M. & FREDLUND, D. G., Shear Strength Behavior of Two Saprolitic Soils, **Proceedings Unsaturated Soils**, **1**, 71-76, Paris, 1995.

GARDNER, R., A Method of Measuring the Capillary Tension of Soil Moisture over a Wide Moisture Range, **Soil Science**, Vol. 43, 277-283, 1937.

GIBSON, R. E. & HENKEL, D. J., Influence of Duration of Tests at Constant Rate of Strain on Measured Drain Strength, **Geotechnique**, **4 (1)**, 6-15, 1954.

GREACEN, E. L.; WALKER, G. R., & COOK, P. G., Evaluation of the Filter Paper Method for Measuring Soil Water Suction, **International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status**, pp. 137–143, 1987.

GULHATI, S. K. & SATIJA, B. S., Shear Strength of Partially Saturated Soils, **Proceedings 10th I. C. S. M. F. E.**, **1**, 609-612, Estocolmo, 1981.

GUTIERREZ, C. I. G., Assessment of Filter Paper Technique for the Measurement of Soil Water Suction, **Master of Science Dissertation**, Imperial College, London, 1985.

HILF, J. W., An Investigation of Pore-water Pressures in Compacted Cohesive Soils, **Technical Memorandum, Bureau of Reclamation U. S. Department of Interior**, **654**, Denver, Colorado, 1956.

HILLEL, D., Soil and Water: Physical Principles and Processes, **Academic Press**, New York, 1971.

HO, D. Y. F., **Measurement of Soil Suction Using the Filter Paper Technique**, Internal Report, IR-11, Transportation and Geotech. Group, Dep. Of Civil Eng., Univ. of Saskatchewan, Saskatoon, Sask., Canada, 1979.

HO, D. Y. F. & FREDLUND, D. G., Increase in Strength Due to Suction for Two Hong Kong Soils, **Proceedings of the Geotechnical Conference on Eng. and Const. In Tropical Residual Soils**, 263-295, Honolulu, 1982.

HOUSTON, S. L.; HOUSTON, W. N. & WAGNER, A. M., Laboratory Filter Paper Suction Measurements, **Geotechnical Testing Journal**, **17 (2)**, 185-194, 1994.

IGNACIUS, S.G.; TOGNON, A.A.; SAAD, A. M. & CARVALHO, C.S., Ensaios Geotécnicos em Solos Não-Saturados no Intuito de Pesquisas Tecnológicas – IPT, SP, **Anais do Simpósio Sobre Solos Não-Saturados**, 50-70, UnB, Brasília, 1991.

JENNINGS, J. E. B. & BURLAND, J. B., Limitations to the Use of Effective Stresses in Partly Saturated Soils, **Géotechnique**, **12 (2)**, 125-144, 1962.

KAKEHI, S.; REIS, R. M. & VILAR, O. M., Estimativa da Envoltória de Resistência de um Solo Não Saturado a Partir de Ensaios de Compressão Simples, **Anais do 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, 55-60, São Carlos, SP, 2004.

KHAN, A. H., **Evaluation of Laboratory Suction Tests by Filter Paper Technique for Prediction of Heave in Expansive Soils**, Report nº GM-81-001, Dep. of Civil Eng., Univ. of Western Australia, 1981.

KRISHNAYYA, A. V. G. & EINSENSTEIN, Z., Brazilian Tensile Test for Soils, **Canadian Geotechnical Journal**, **11**, 632-642, 1974.

LAMBE, T. W. & WITHMAN, R. V., **Soil Mechanics**, 51 v., Ed. John Wiley e Sons, New York, 1979.

LEE, H. C. & WRAY, W. K., Techniques to Evaluate Soil Suction - A Vital Unsaturated Soil Water Variable, **Proceedings Unsaturated Soils**, Paris, 615-622, 1995.

LEONG, E. C.; HE, L. & RAHARDJO, H., Factors Affecting the Filter Paper Method for Total and Matric Suction Measurements, **Geotechnical Testing Journal**, **25 (3)**, 2002.

LINS, A. H. P., **Resistência e Poro-Pressões Desenvolvidas em Um Solo Compactado Não Saturado em Laboratório**, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro, 1991.

LYTTON, R. L., Foundations and Pavements on Unsaturated Soils, Unsaturated Soils, ed. Alonso and Delage, **Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils**, Paris, Balkema, vol.3, 1021-1220, 1996.

MACCARINI, M., **Ensaio Triaxiais e de Cisalhamento Direto no Solo Residual Gnáissico Jovem do Campo Experimental da PUC/RJ Gávea RJ**, Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1980.

MACIEL, I. C. Q., **Aspectos Microestruturais e Propriedades Geomecânicas de Um Perfil de Solo Residual de Gnaisse Facoidal**, Dissertação de mestrado, DEC, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1991.

MARINHO, F. A. M., **Características de Deformabilidade do Solo Residual do Campo Experimental II da PUC/RJ Obtidas a Partir de Ensaio Triaxiais Axissimétricos**, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1986.

MARINHO, F. A. M., Medição de Sucção com o Método do Papel Filtro, **X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**, 2, 515-522, 1994.

MARINHO, F. A. M., Medição de Sucção em Solos, **Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, 2, 373-398, Rio de Janeiro, 1997.

MASHHOUR, M. M.; IBRAHIM, M. I. & EL-EMAM, M. M., Variation of Unsaturated Soil Shear Strength Parameters With Suction, **Proceedings Unsaturated Soils**, 2, 1487-1493, Paris, 1995.

MCKEEN, R. G., Suction Studies: Filter Paper Method, Design of Airport Pavements for Expansive Soils: Final Report, **U. S. Dep. of Transportation, Federal Aviation Administration, Systems Research and Development Service**, Washington, DC, 1981.

MCKEEN, R. G., Validation of Procedures for Pavement Design on Expansive Soil Behavior, **Report No. DOT/FAA/PM- 85/15**, Washington, DC, 1985.

MCQUEEN, I. S. & MILLER, R. F., Approximating Soil Moisture Characteristics From Limited Data: Empirical Evidence and Tentative Model, **Water Resource Research**, 10, (3), 521-527, 1974.

MOREIRA, B. D. M., **Estudo Experimental da Permeabilidade Saturada-Não Saturada de um Solo de uma Encosta do Rio de Janeiro**, Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1998.

ÖBERG, A. L. & SALLFORS, G., Determination of Shear Strength Parameters of Unsaturated Silts and Sands Based on Water Retention Curve, **Geotechnical Testing Journal**, **20** (1), 40-48, 1997.

OLIVEIRA, O. M. & MARINHO, F. A. M., Aspectos da Curva de Retenção de Água de um Solo Residual Compactado, **Anais do 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, 279-287, São Carlos, SP, 2004.

OLSON, R. E. & LANGFELDER, L. J., Pore Water Pressure in Unsaturated Soils, **Jnl. of the Soil Mech. and Found. Div., A.S.C.E**, v.91, SM4, 127-160, 1965.

PINTO, C. S., **Curso Básico de Mecânica dos Solos**, Oficina de Textos, São Paulo, 2000.

PRESA, E. P., **Indeformabilidad de Las Arcillas Expansivas Bajo Succion Controlada**, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1982.

RAHARDJO, H.; LIM, T. T.; CHANG, M. F. & FREDLUND, D. G., Shear Strength Characteristics of a Residual Soil, **Canadian Geotechnical Journal**, **32**, 60-75, 1995.

RAMIDAM, M. A. S., **Estudo de um Processo de Voçorocamento Próximo a UHE de Itumbiara-GO**, Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2003.

REIS, M. R. & VILAR, O. M., Resistência ao Cisalhamento de Dois Solos Residuais de Gnaisse Não-Saturados, **Anais do 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, 109-114, São Carlos, SP, 2004.

RIDLEY, A. M. & WRAY, W. K., Suction Measurement: A Review of Current Theory and Practices, **Proceedings Unsaturated Soils**, **3**, 1293-1322, Paris, 1995.

ROHM, S. A. & VILAR, O. M., Shear Strength of an Unsaturated Sandy Soil, **Proceedings Unsaturated Soils**, **1**, 189-193, Paris, 1995.

ROHM, S. A., **Resistência ao Cisalhamento de um Solo Arenoso Laterizado Não Saturado da Região de São Carlos**, Tese de Doutorado, EESC/SP, São Carlos, 1992.

SATIJA, B. S., **Shear Behavior of Partially Saturated Soils**, Ph.D. Thesis, Indian Institute of Technology, Delhi, 1978.

SERTÃ, H. B. C., **Aspectos Geológicos e Geotécnicos do Solo Residual do Campo Experimental II da PUC/RJ**, Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1986.

SNYDER, V. A. & MILLER, R. D., Tensile strength of unsaturated soils, **Soil Sci. Soc. Am. J.**, **49**, 58-65, 1985.

SWARBRICK, G. E., Measurement of Soil Suction Using the Filter Paper Method, **Proceedings Unsaturated Soils**, **2**, 653-658, Paris, 1995.

TEIXEIRA, R. S. & VILAR, O. M., Resistência ao Cisalhamento de um Solo Compactado Não Saturado, **Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, **1**, 161-169, Rio de Janeiro, 1997.

TERZAGHI, K., The Shear Resistance of Saturated Soils, **Proceedings 1st Int. Conf. Soil Mechanics Foundations Engineering**, **1**, 54-56, Cambridge, 1936.

VANAPALLI, D. G.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E. & CLIFTON, A. W., Model for the Prediction of Shear Strength with Respect to Soil Suction, **Canadian Geotechnical Journal**, **33**, 379-392, 1996.

VANAPALLI, S. K. & FREDLUND, D. G., Comparison of Different Procedures to Predict Unsaturated Soil Shear Strength, ASTM Proceedings, **Unsaturated Soils, Geo-Denver**, 2000.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G. & PUFAHL, D. E., The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of a Compacted Till, **Geotechnique**, **49**, 143-159, 1999.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G. & PUFAHL, D. E., The Relationship Between the Soil Water Characteristic Curve and the Shear Strength of a Compacted Glacial Till, **Geotechnical Testing Journal**, **19**, 259-268, 1996.

VANAPALLI, S. K.; SILLERS, W. S. & FREDLUND, M. D., The Meaning and Relevance of Residual Water Content to Unsaturated Soils, **51st Canadian Geotechnical Conference**, Edmonton, 101-108, 1998.

VANAPALLI, S. K.; WRIGHT, A. & FREDLUND, D. G., Shear Strength of Two Unsaturated Silty Soils Over the Suction Range From 0 to 1,000,000Kpa, **53<sup>rd</sup> Canadian Geotechnical Conference**, Montreal, October 15-18, 1161-1168, 2000.

VILLAR, L. F. S. & DE CAMPOS, T. M. P., Obtenção de Uma Curva Característica de Sucção Pelo Uso Combinado de Técnicas Diversas, **Anais do 4<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, 337-353, Porto Alegre, 2001.

VILLAR, L. F. S., **Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita**, Tese de Doutorado, DEC, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2002.

WOODBURN, J. A. & LUCAS, B., New Approaches to the Laboratory and Field Measurement of Soil Suction, **Proceedings Unsaturated Soils**, Paris, 1995.

## **Apêndice A**

### **Calibração dos Instrumentos Elétricos e Saturação do Disco Cerâmico**

#### **A.1.**

##### **Calibração dos Instrumentos Elétricos de Medição**

Os instrumentos elétricos de medição utilizados no equipamento CDSC, foram dois transdutores de pressão, dois transdutores de deslocamento, duas células de carga e um medidor de variação volumétrica. A correta calibração desses instrumentos é de fundamental importância para a transformação de grandezas elétricas em grandezas físicas de engenharia desejadas. As principais características desses instrumentos elétricos estão mostradas na tabela A.1.

Para a aquisição dos dados foi utilizado um sistema de aquisição de dados da marca Solotron Mobrey modelo SI 3531D, com capacidade de aquisição de 8 canais por tarefa, com um total de 7 tarefas. A conversão dos dados foi feita através do programa Orion, sendo estes convertidos em padrão Excel. Uma fonte de tensão de 10V, da marca HP, foi utilizada para a excitação dos instrumentos elétricos. O conjunto sistema de aquisição de dados e fonte reguladora é mostrado na figura 18.

**Tabela A.1:** Características dos instrumentos elétricos de medição.

<b>Instrumento</b>	<b>Capacidade</b>	<b>Sensibilidade</b>	<b>Ganho</b>	<b>Resolução</b>	<b>Referência</b>
Transdutor de deslocamento horizontal	25,80 mm	1,393 mV/V.mm	1	0,0127 (mm)	LSCDT (WF)
Transdutor de deslocamento vertical	13,90 mm	1,393 mV/V.mm	1	0,0072 (mm)	LSCDT (WF)
célula de carga horizontal	5 kN	0,400 mV/V.kN	250	0,0024 (kN)	Wikeham Farrance
célula de carga vertical	25 kN	0,081 mV/V.kN	500	0,0061 (kN)	Wikeham Farrance
Transdutor de pressão de ar	1000 kPa	0,01 mV/V.kPa	100	0,2464 (kPa)	Druck Limited
Transdutor de pressão de água	1000 KPa	0,01 mV/V.kPa	100	0,2486 (kPa)	Druck Limited
Medidor de variação volumétrica	14 cm <sup>3</sup>	2,995 mV/V.cm <sup>3</sup>	1	0,0068 (cm <sup>3</sup> )	Belofram com LSCDT (WF)

Os transdutores de deslocamento (LSCDT) horizontal e vertical foram calibrados utilizando um micrômetro de precisão, onde eram impostos variações de deslocamento de 1,27mm em todo o seu curso. As curvas de calibração, assim como suas respectivas equações obtidas a partir de ajustes lineares, são apresentadas na figura A.1.

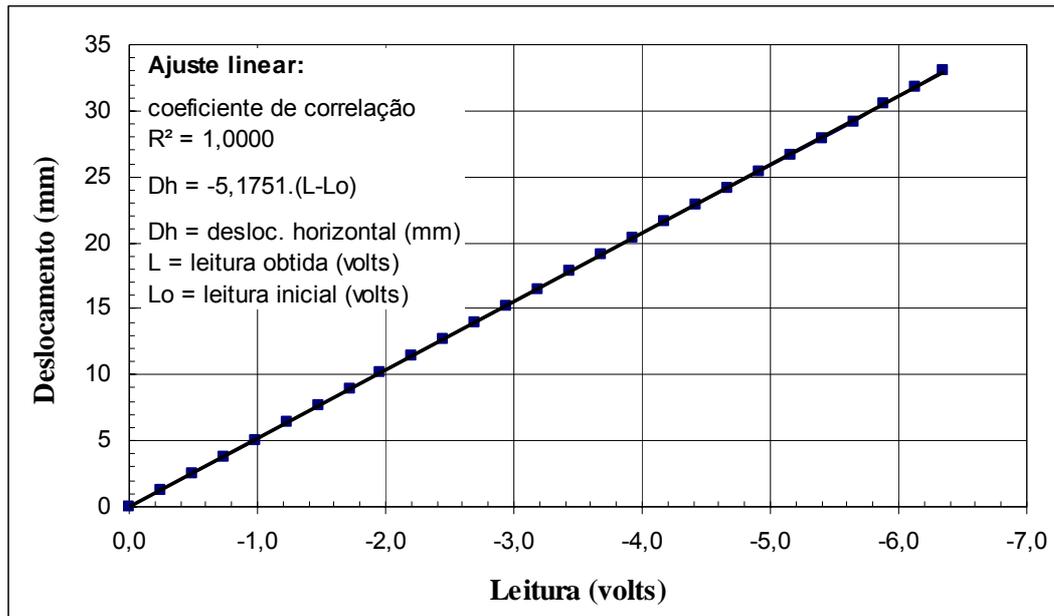
As calibrações das células de carga horizontal e vertical foram feitas na prensa de cisalhamento com o uso do pendural e braço de alavanca, colocando-se pesos conhecidos. As curvas e suas respectivas equações de calibração obtida do ajuste linear são apresentadas na figura A.2.

Os transdutores de pressão de ar e água foram calibrados com o uso do equipamento de pressão Budenberg, onde foram aplicados valores conhecidos de

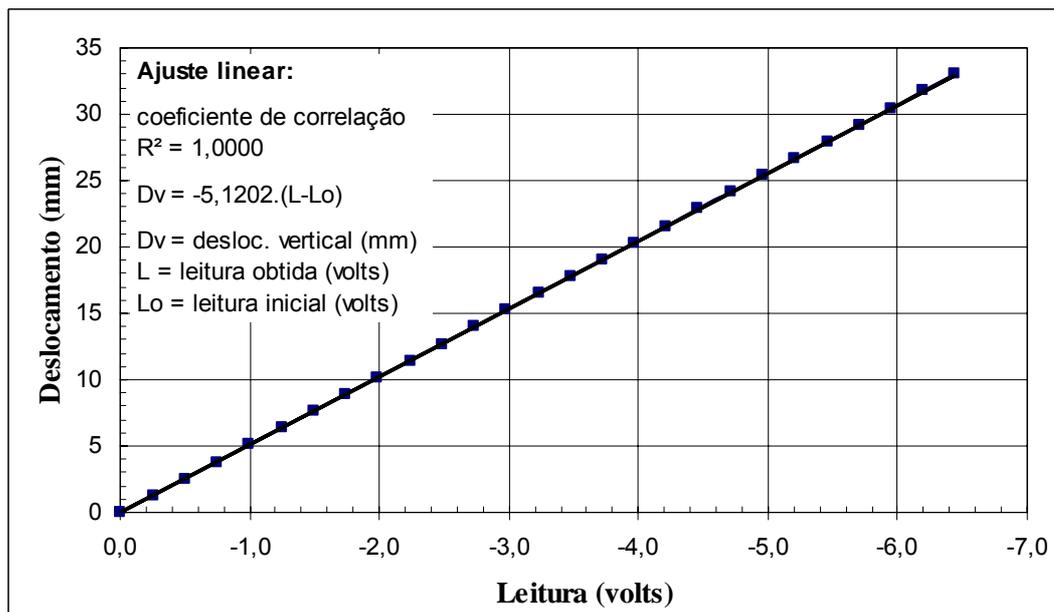
pressão. A figura A.3 apresenta as curvas e suas respectivas equações de calibração obtida do ajuste linear.

O medidor de variação volumétrica foi calibrado com o uso da bureta graduada com precisão de  $0,01\text{cm}^3$ , onde eram feitas medições de volume quando era gerado um fluxo. As curvas e suas respectivas equações de calibração obtida do ajuste linear são apresentadas na figura A.4.

Cada instrumento de medição foi calibrado no mínimo três vezes para uma maior confiabilidade nos resultados. As curvas de calibração apresentadas nas figuras A.1 a A.4, mostram os valores médios dessas calibrações.

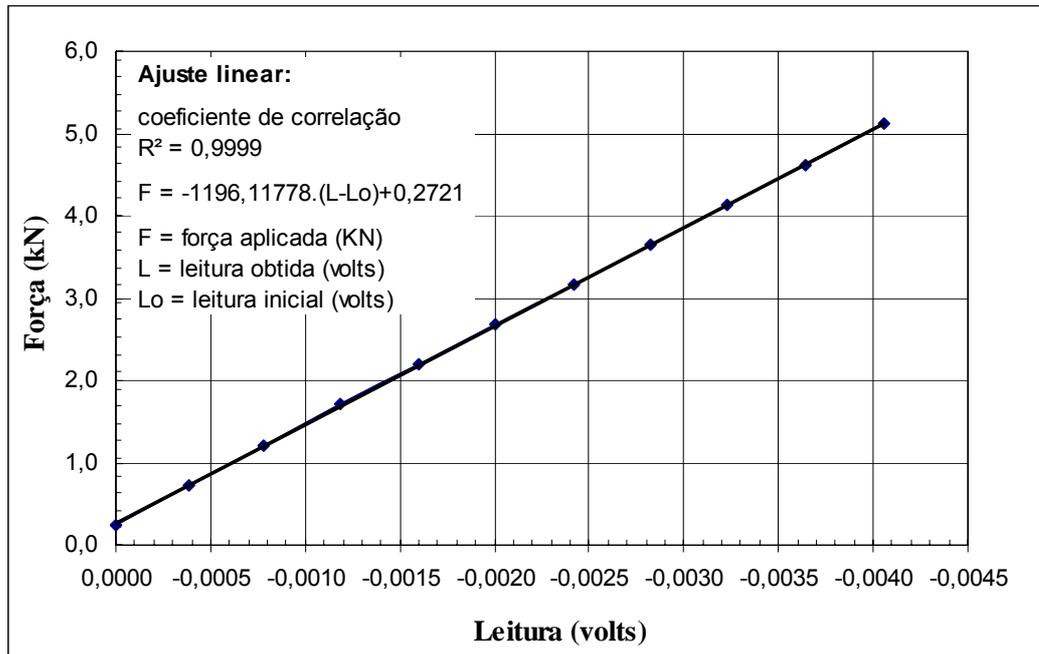


(a)

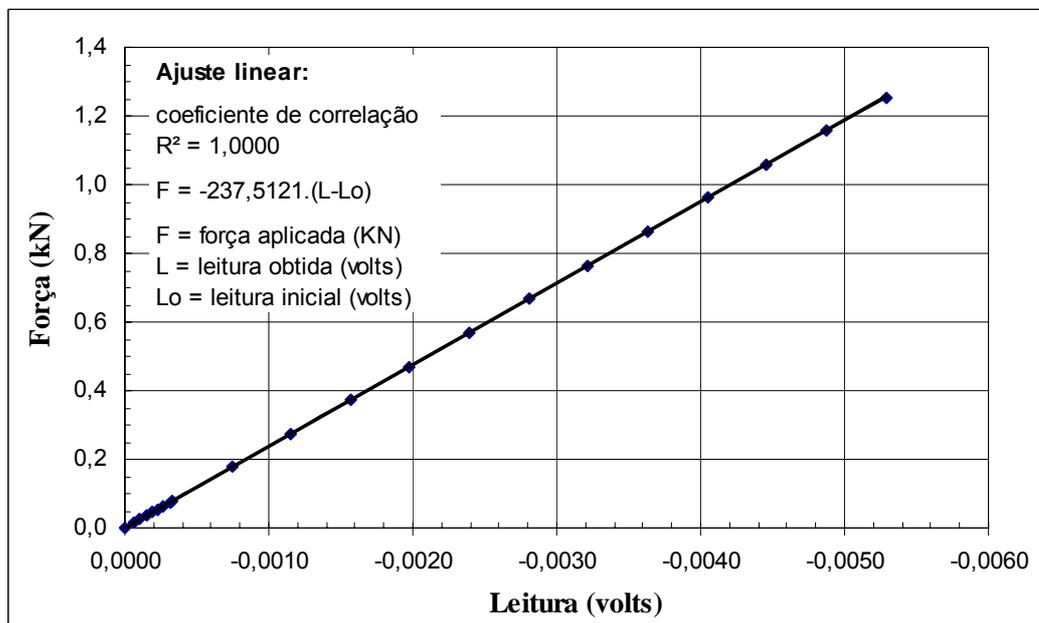


(b)

**Figura A.1:** Curva de calibração do transdutor de deslocamento:  
 (a) horizontal; (b) vertical.

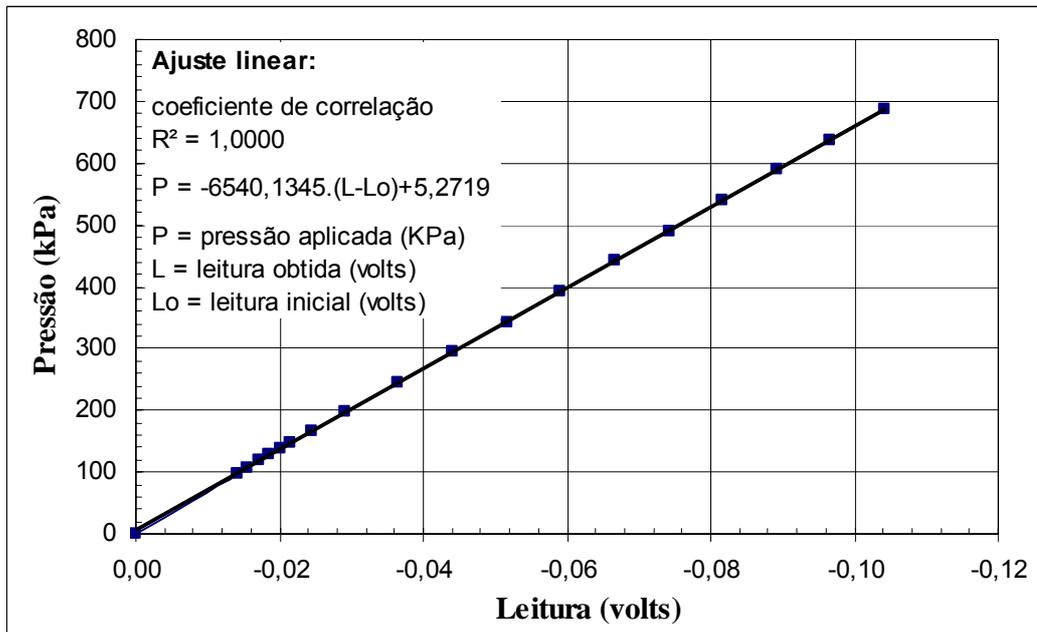


(a)

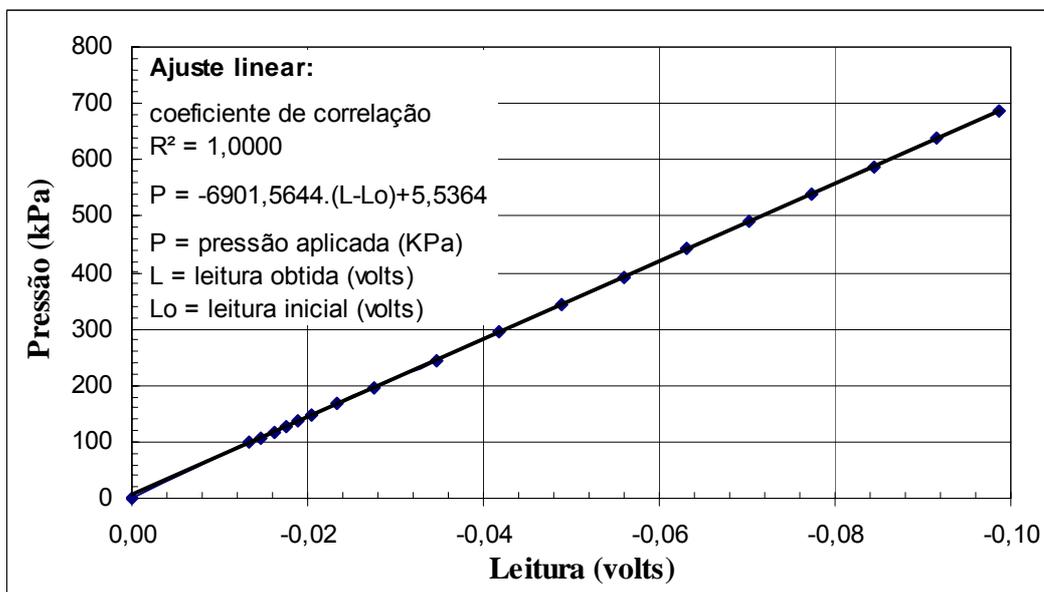


(b)

**Figura A.2:** Curva de calibração da célula de carga: (a) vertical; (b) horizontal.

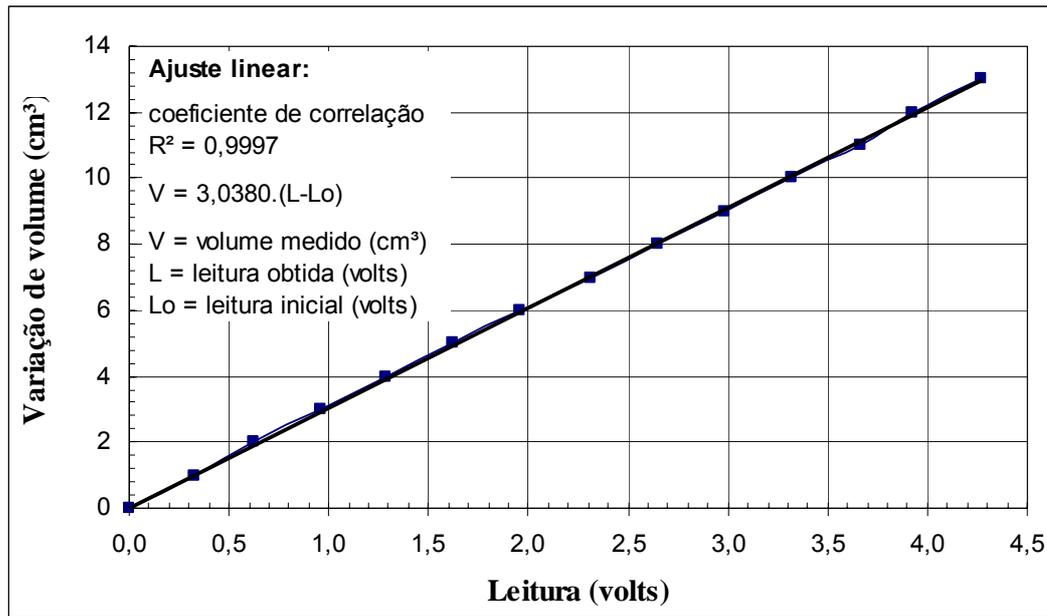


(a)



(b)

**Figura A.3:** Curva de calibração do transdutor de pressão: (a) água; (b) ar.



**Figura A.4:** Curva de calibração do medidor de variação volumétrica.

## A.2.

### Saturação do Disco Cerâmico de Alto Valor de Entrada de Ar

O disco cerâmico de alto valor de entrada de ar tem 7,3mm de espessura, 146mm de diâmetro e pressão de borbulhamento de 3bar (300kPa).

Sua saturação foi feita colocando-se água deaerada sobre o disco e aplicando-se uma diferença entre a pressão de ar e a de água da ordem de 10kPa, sendo a pressão de ar maior que a pressão de água.

Considera-se o disco saturado quando a curva variação de volume de água pelo tempo atinge uma inclinação constante. A figura A.5 mostra a curva da vazão do disco cerâmico, assim como seu coeficiente de permeabilidade.

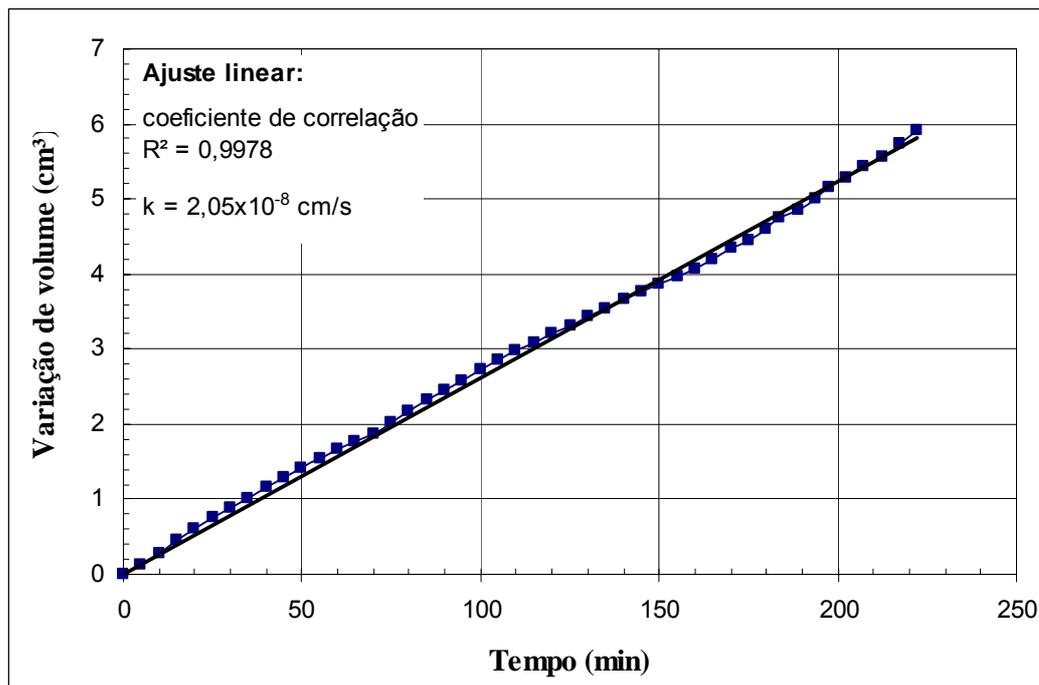


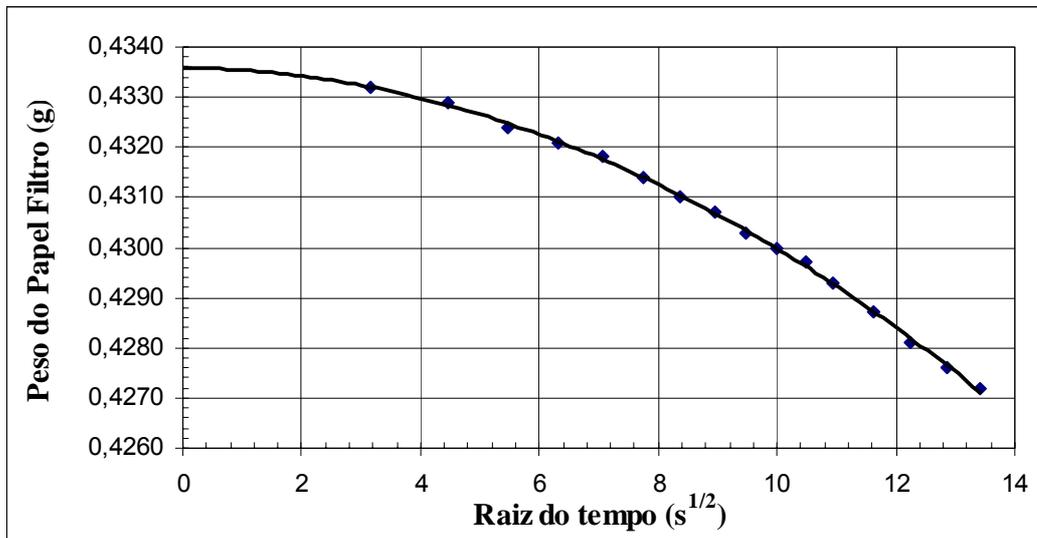
Figura A.5: Saturação disco cerâmico de alta entrada de valor de ar.

## **Apêndice B**

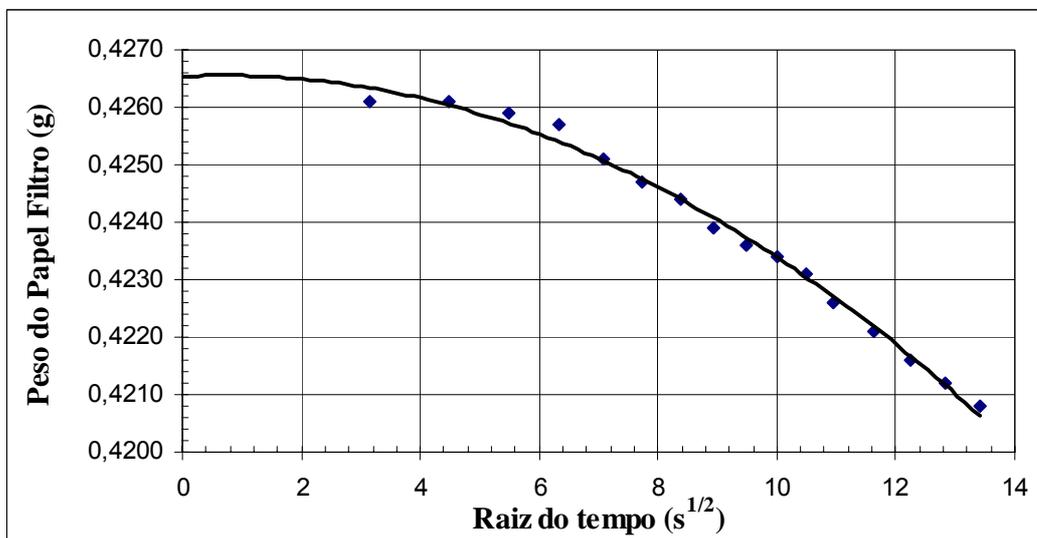
### **Curvas para a Determinação da Umidade do Papel Filtro**

A seguir são apresentadas as curvas obtidas para a determinação da umidade do papel filtro no tempo zero. A correlação dessa umidade com a sucção é feita através de uma curva de calibração do papel filtro. A técnica é apresentada em detalhes no capítulo 4.

Os gráficos do peso do papel filtro pela raiz do tempo, para cada ponto utilizado na determinação da curva característica, são mostrados nas figuras B.1 a B.20. Para cada ponto da curva foram feitos dois ensaios, isto é, em cada anel foi colocado um papel filtro no topo e outro na base, sendo que a sucção foi determinada através da média das umidades dos dois papeis filtro. Para a determinação do peso do papel filtro no tempo zero, os dados foram interpolados pela curva que melhor se ajusta aos pontos. Após o papel filtro ser retirado do contato com o solo, este perde peso e quando o mesmo é retirado da estufa, há um ganho de peso. Isso ocorre devido ao fato de que o papel filtro tende a entrar em equilíbrio com a umidade ambiente.



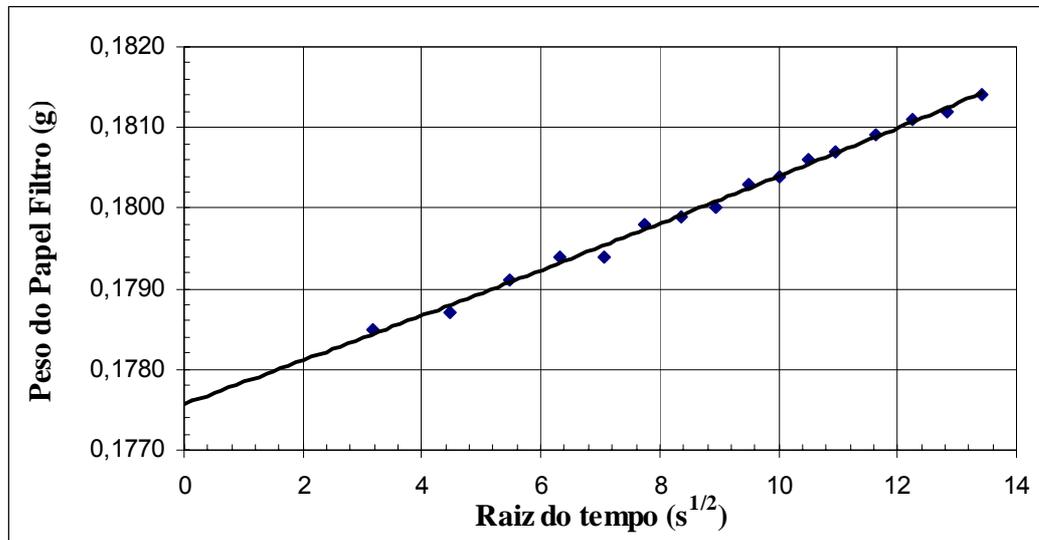
(a)



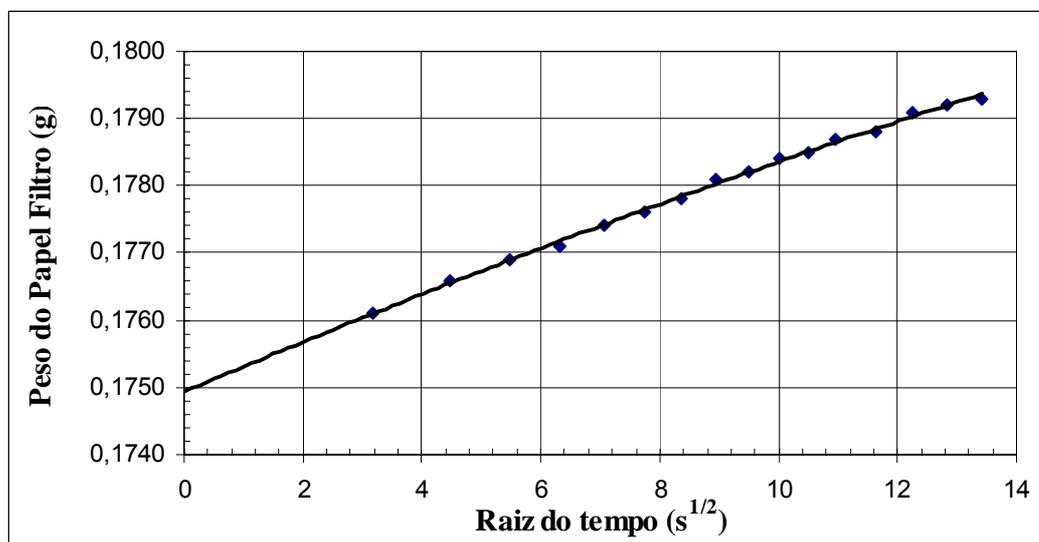
(b)

**Figura B.1:** Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 1):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



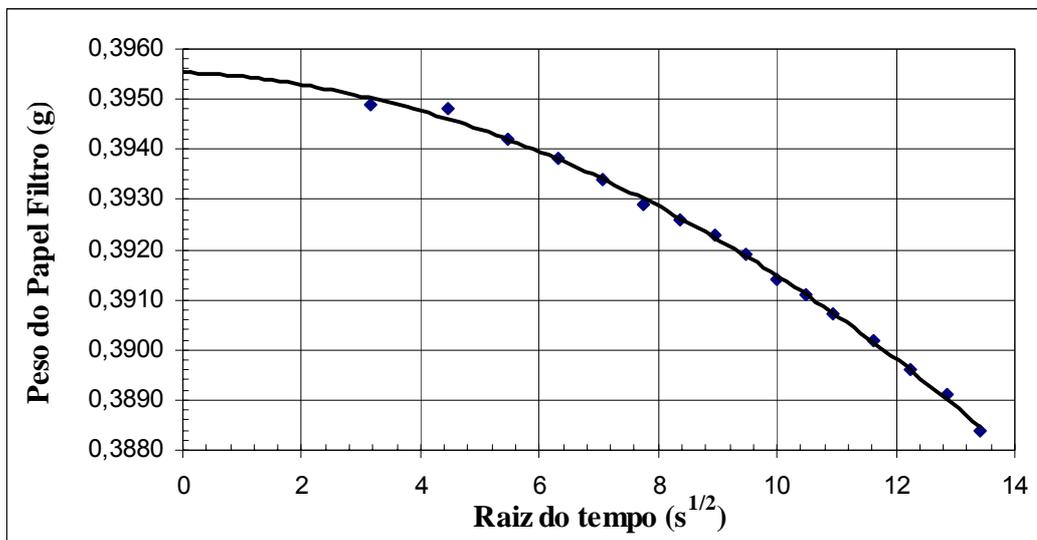
(a)



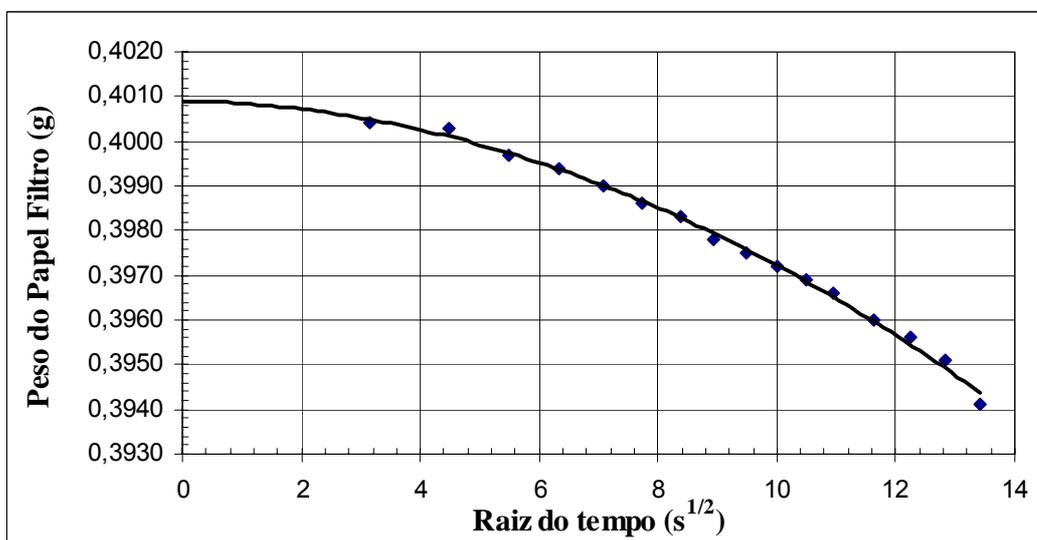
(b)

**Figura B.2:** Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 1):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



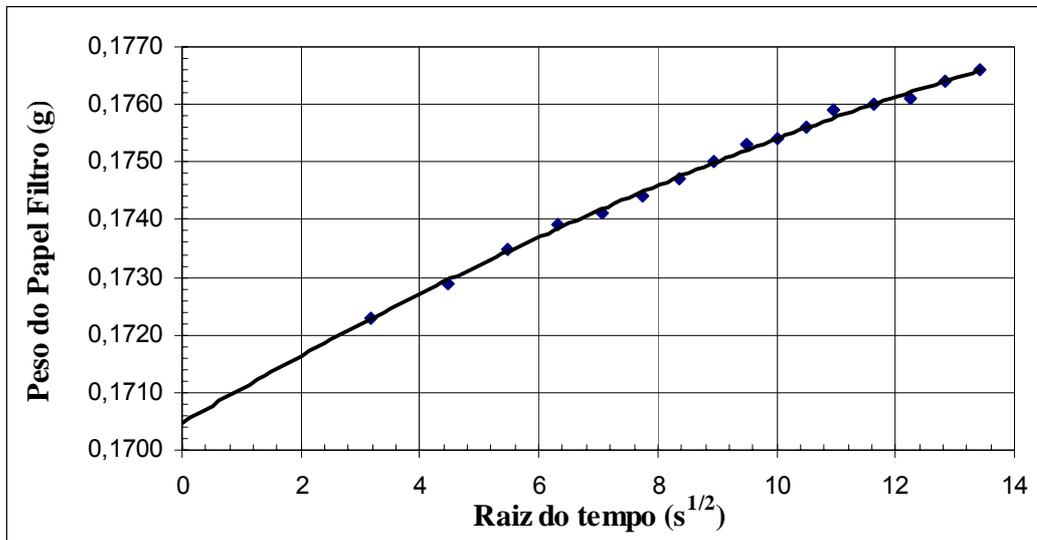
(a)



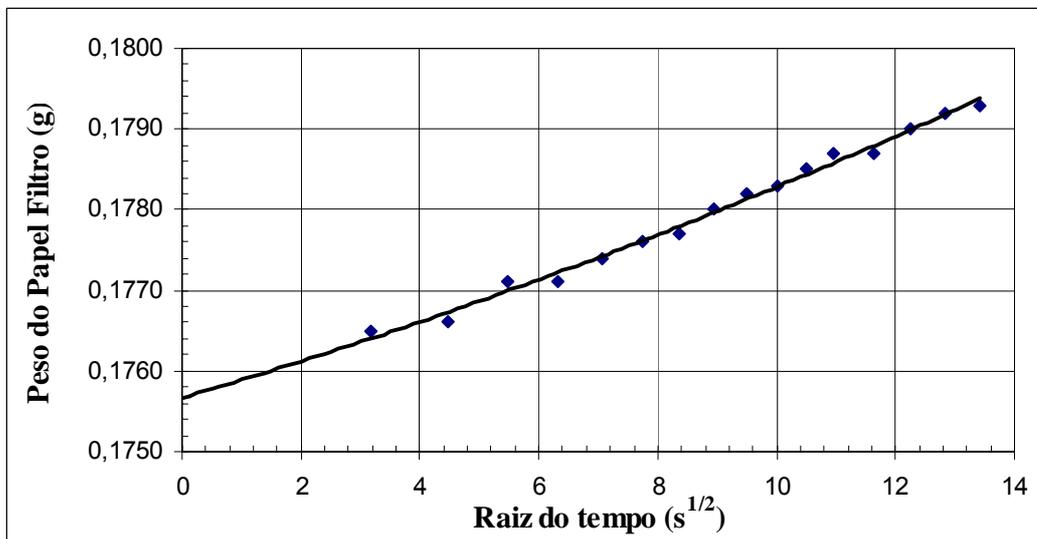
(b)

**Figura B.3:** Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 2):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



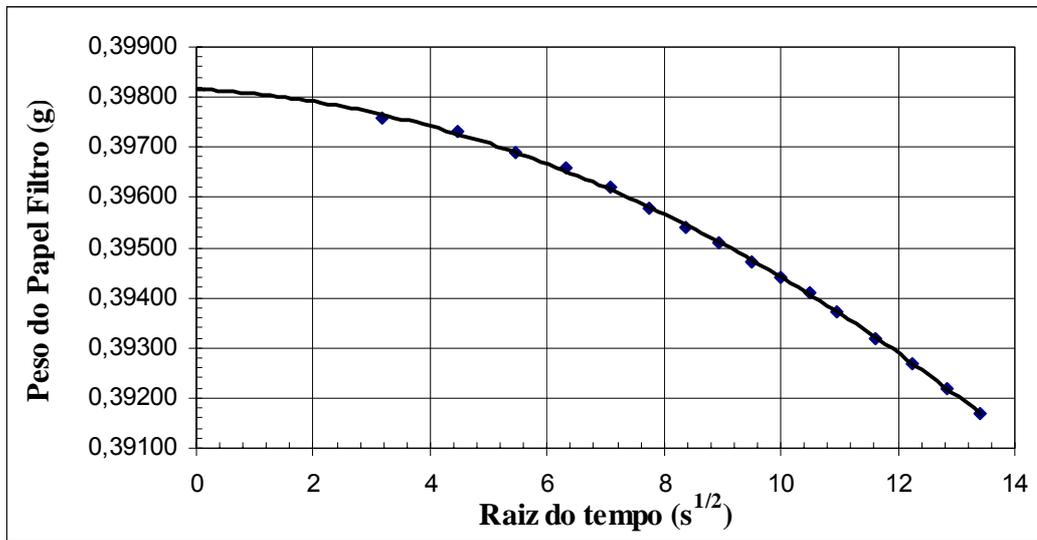
(a)



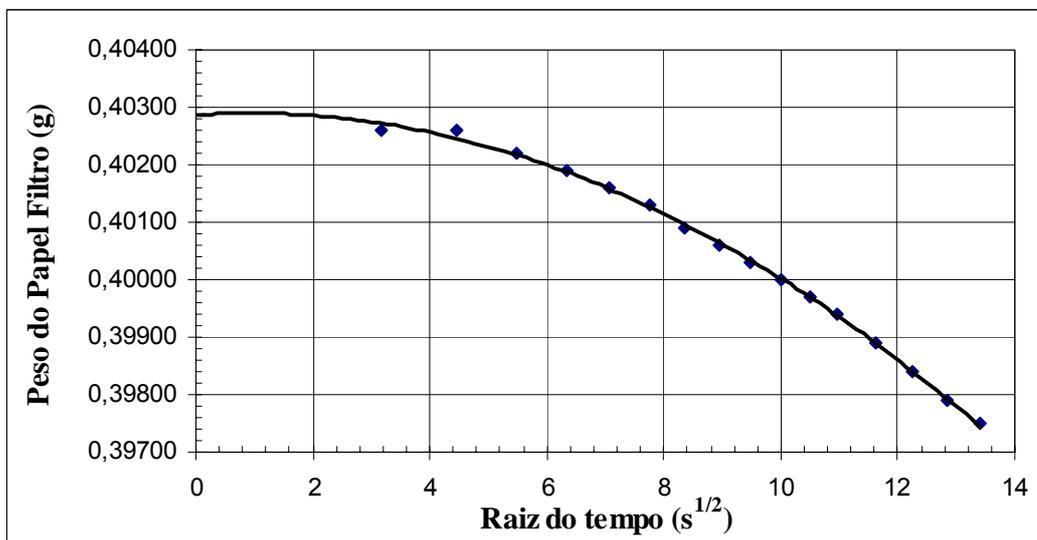
(b)

**Figura B.4:** Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 2):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



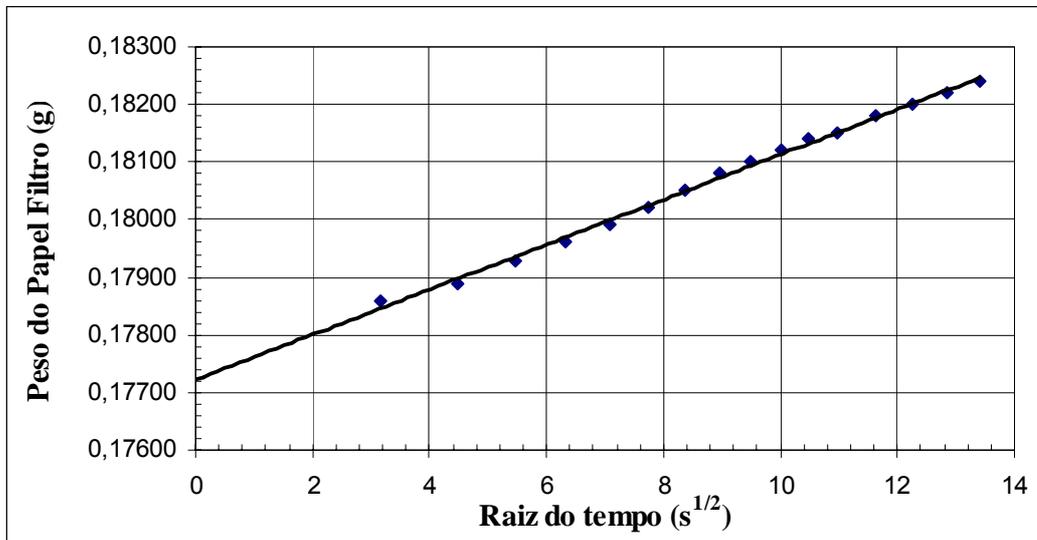
(a)



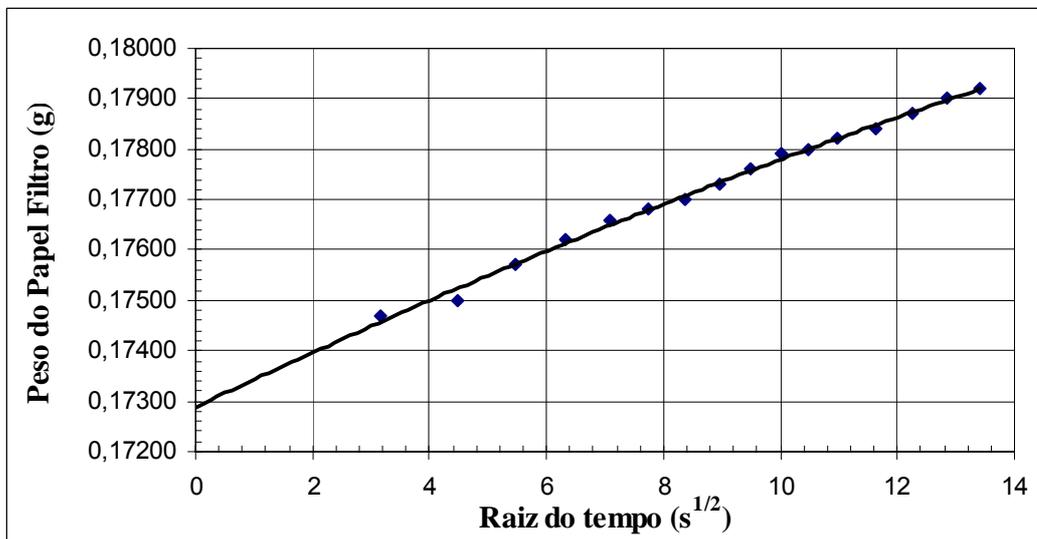
(b)

**Figura B.5:** Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 3):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



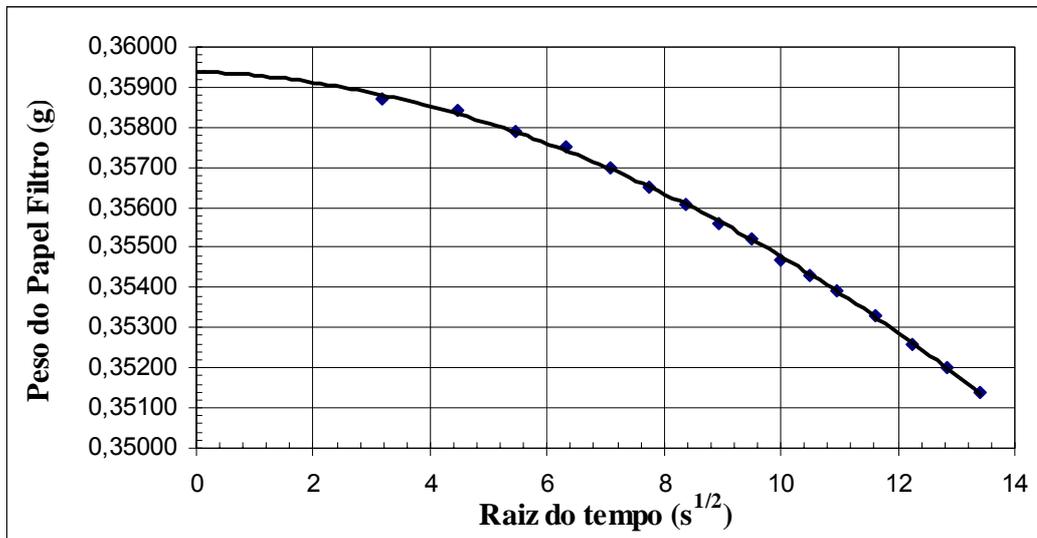
(a)



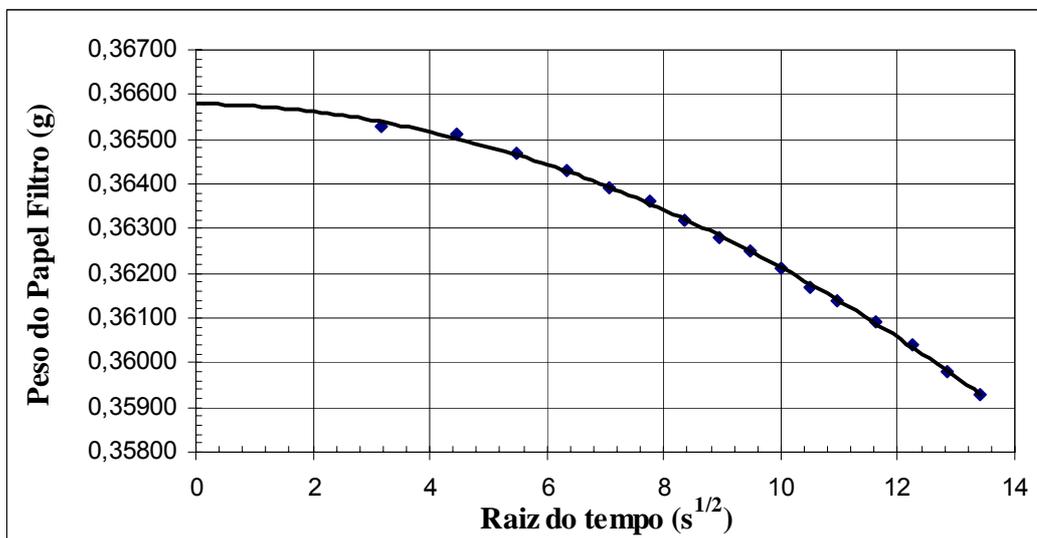
(b)

**Figura B.6:** Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 3):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



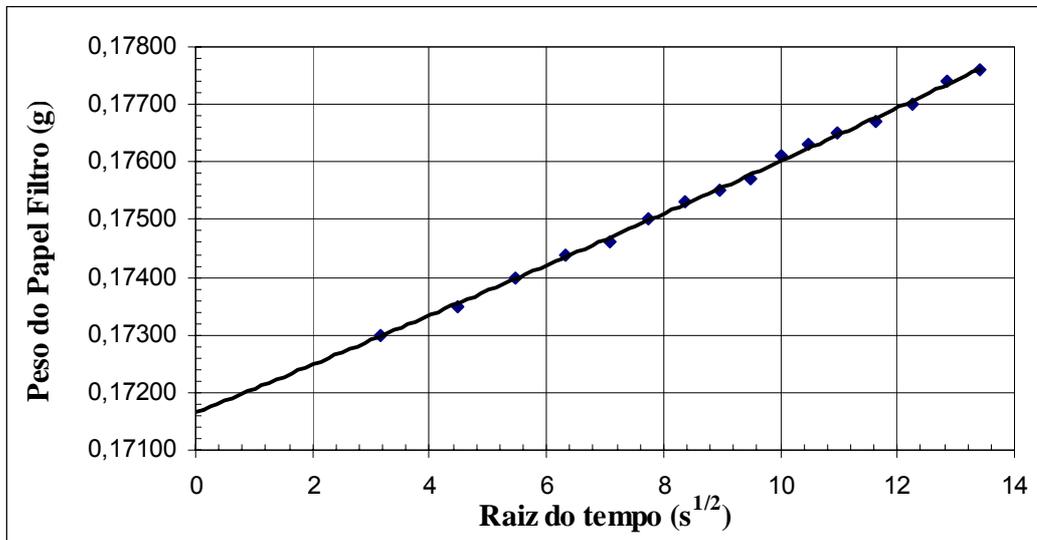
(a)



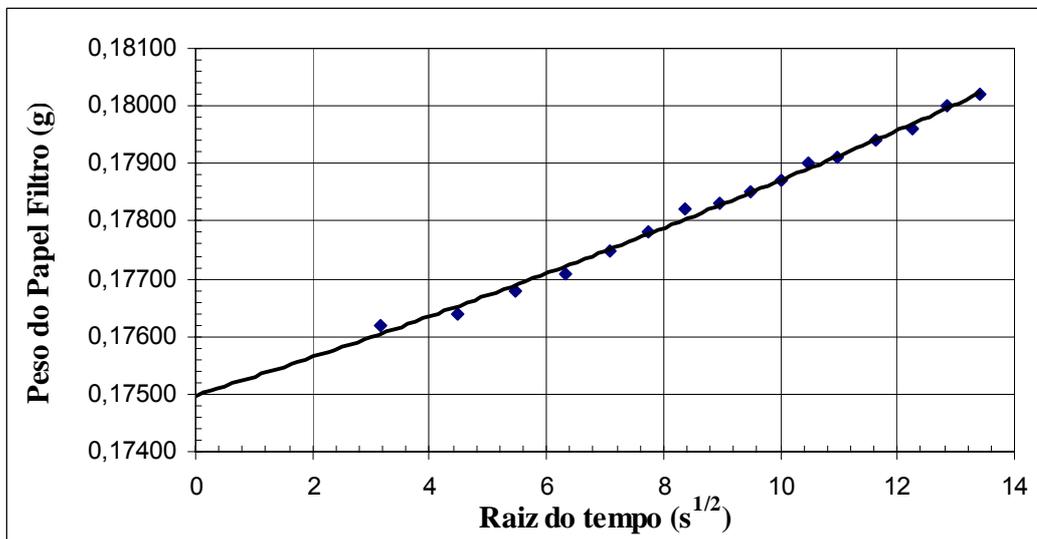
(b)

**Figura B.7:** Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 4):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



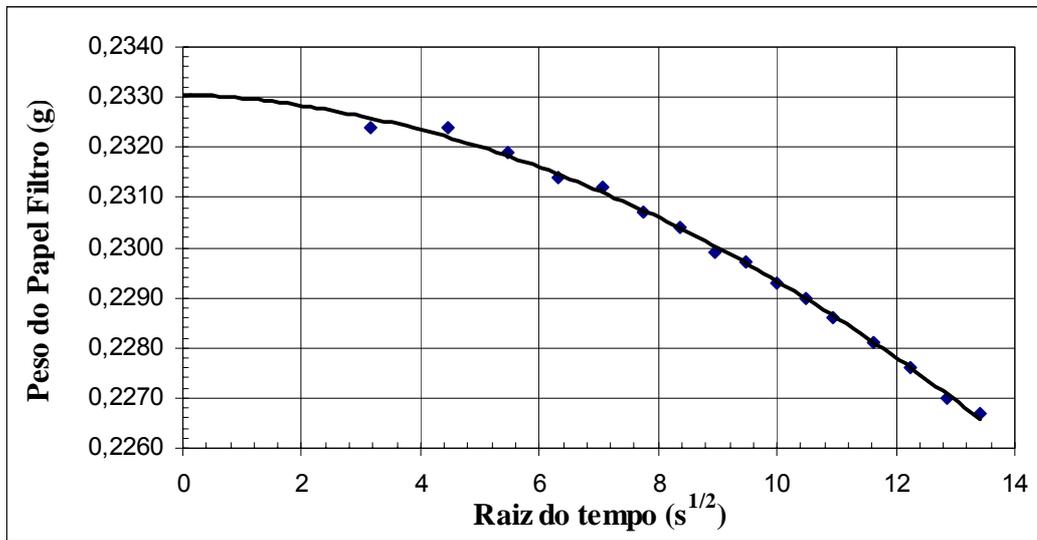
(a)



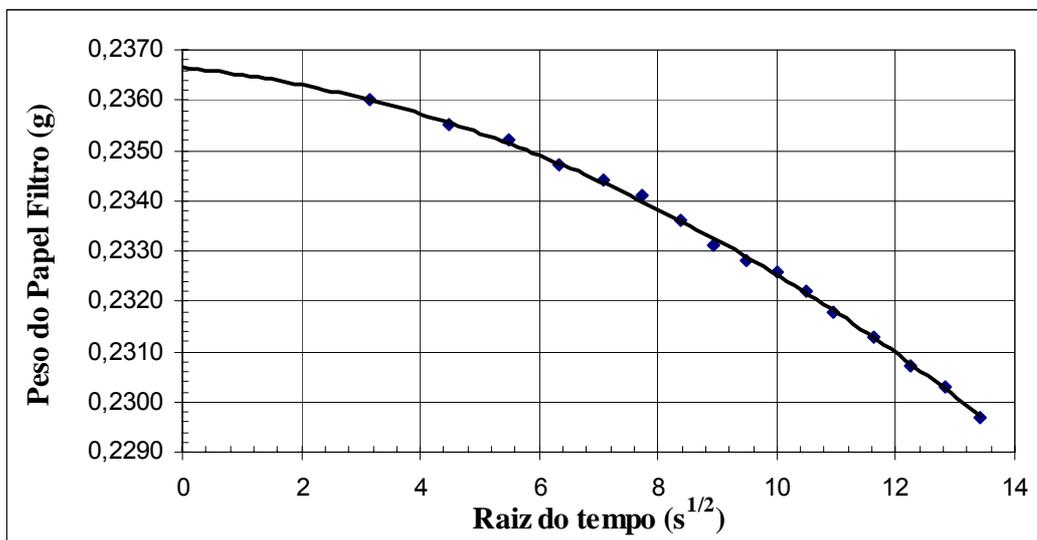
(b)

**Figura B.8:** Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 4):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



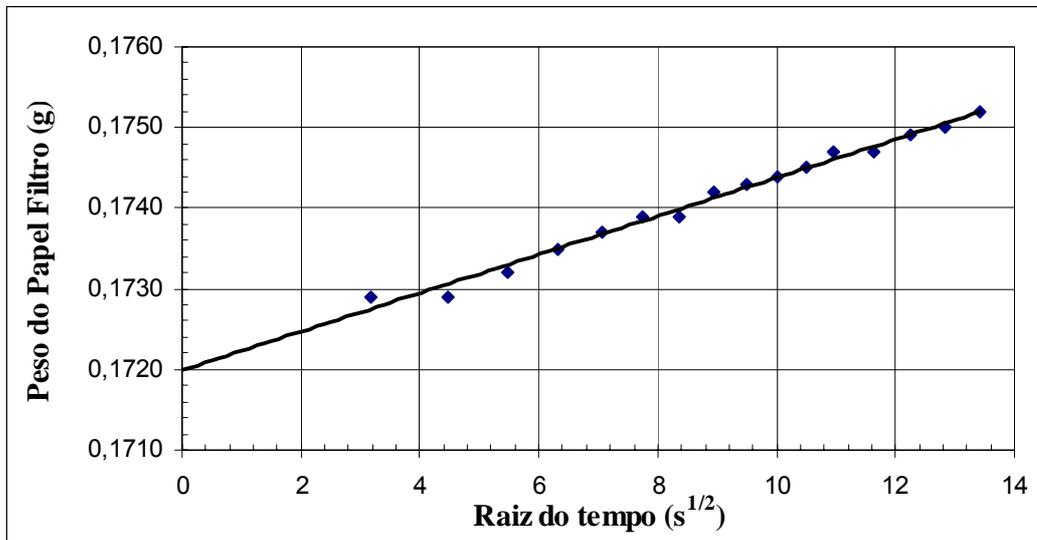
(a)



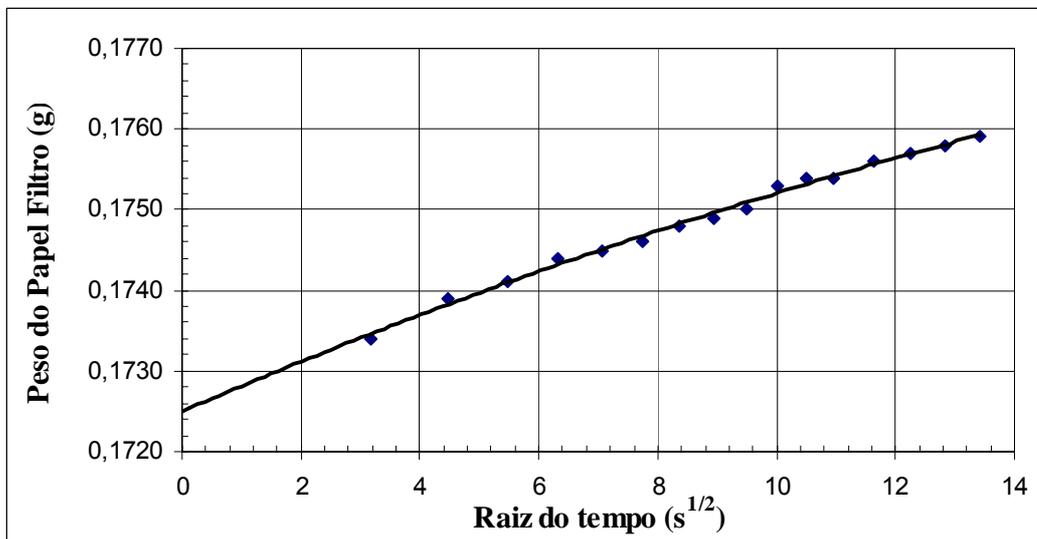
(b)

**Figura B.9:** Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 5):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



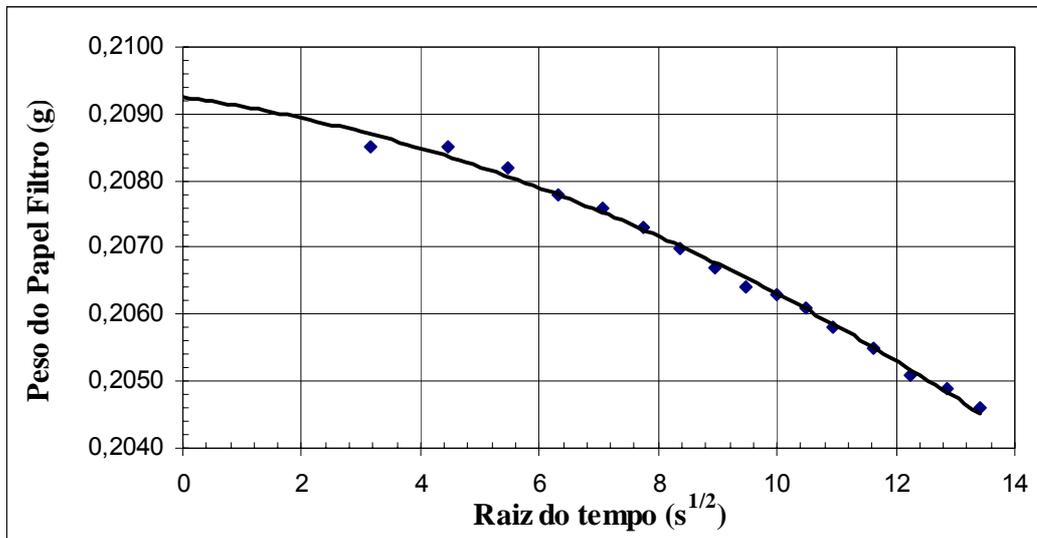
(a)



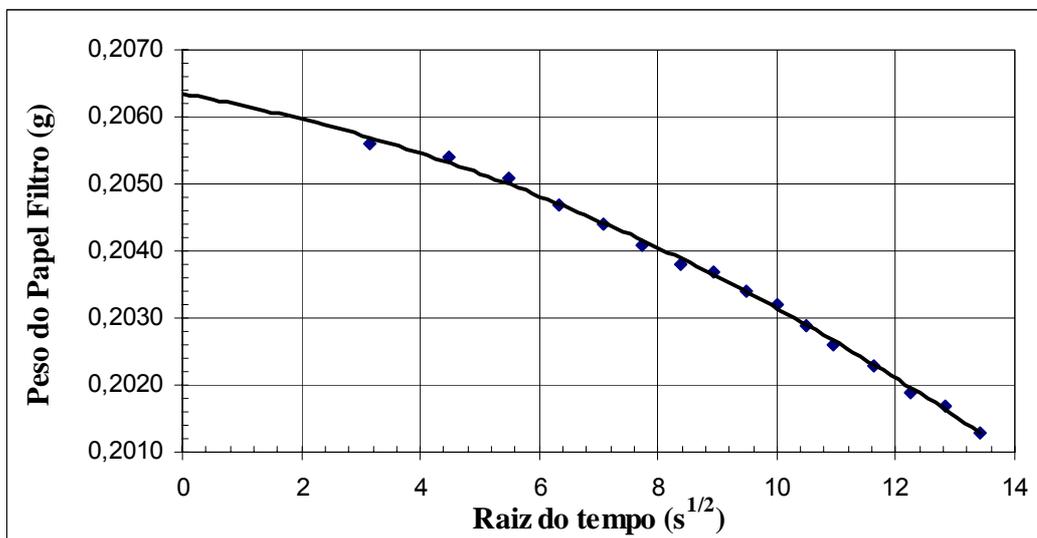
(b)

**Figura B.10:** Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 5):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



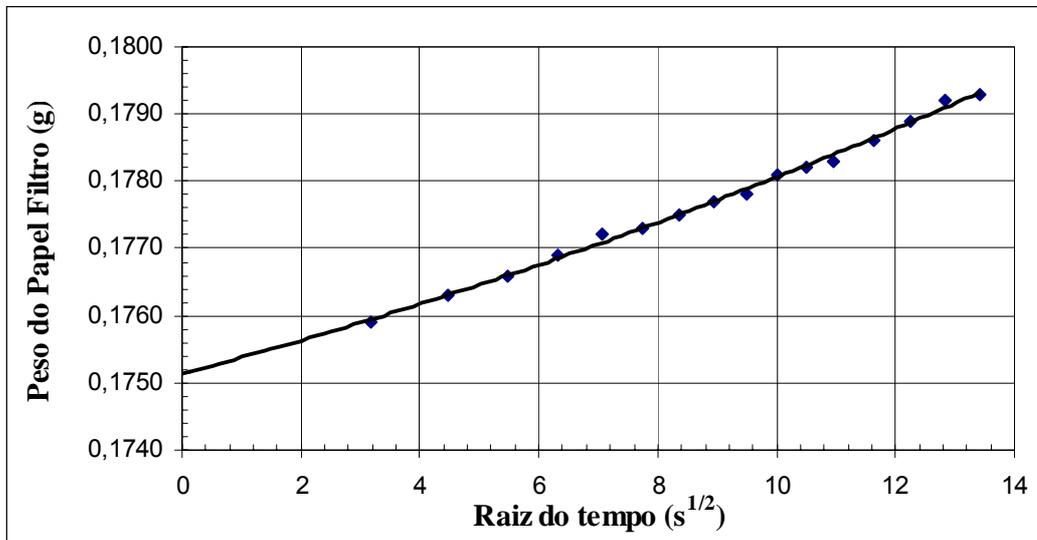
(a)



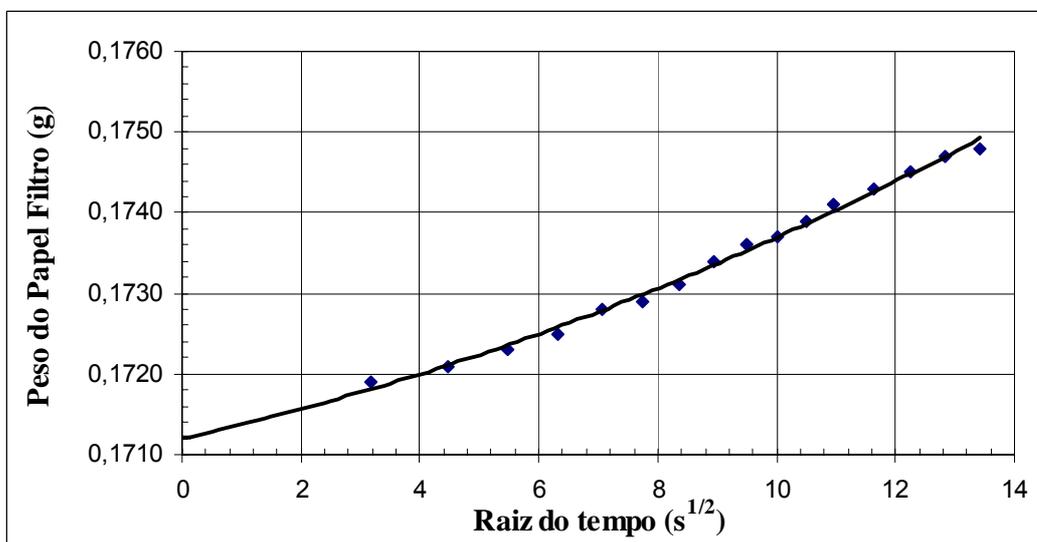
(b)

**Figura B.11:** Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 6):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



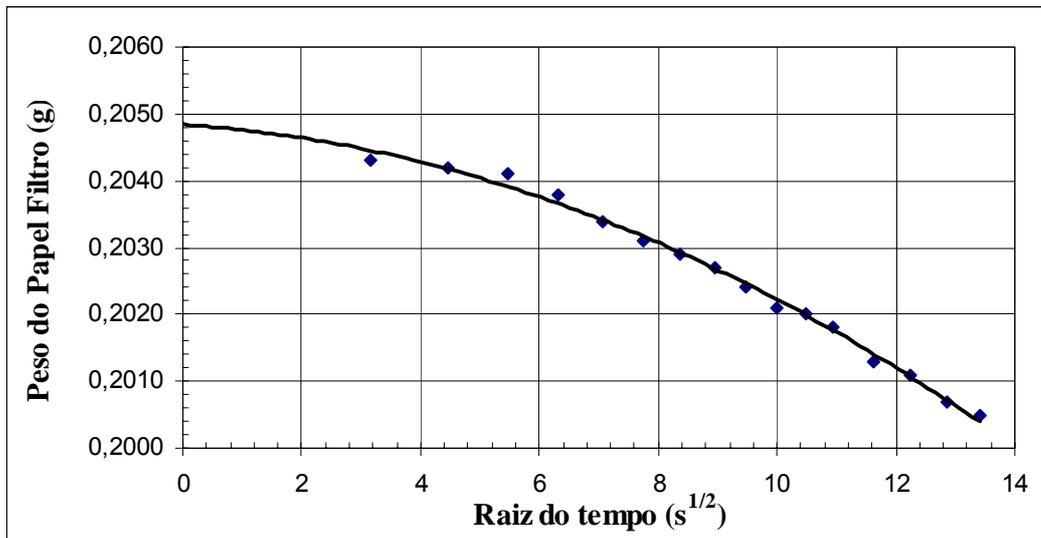
(a)



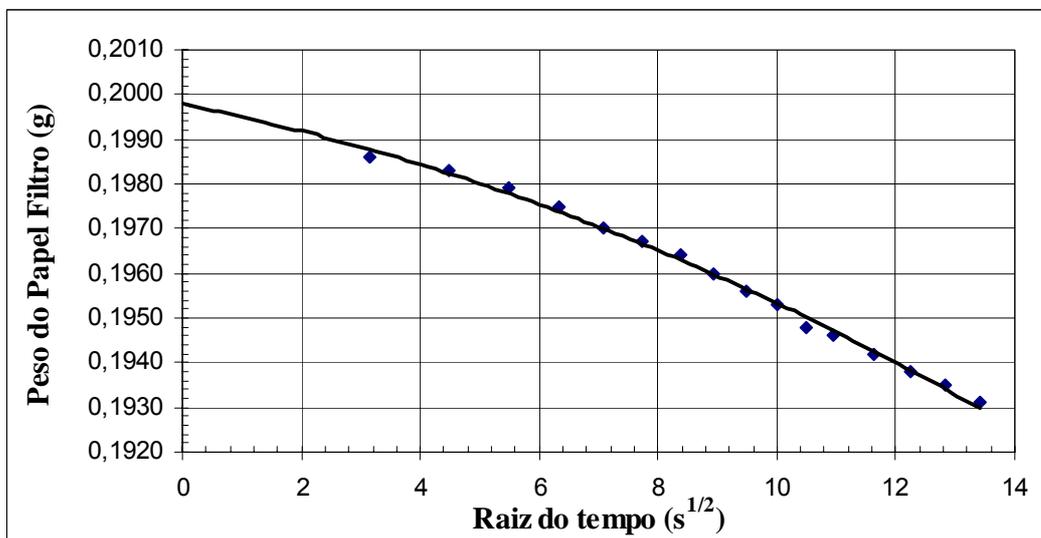
(b)

**Figura B.12:** Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 6):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



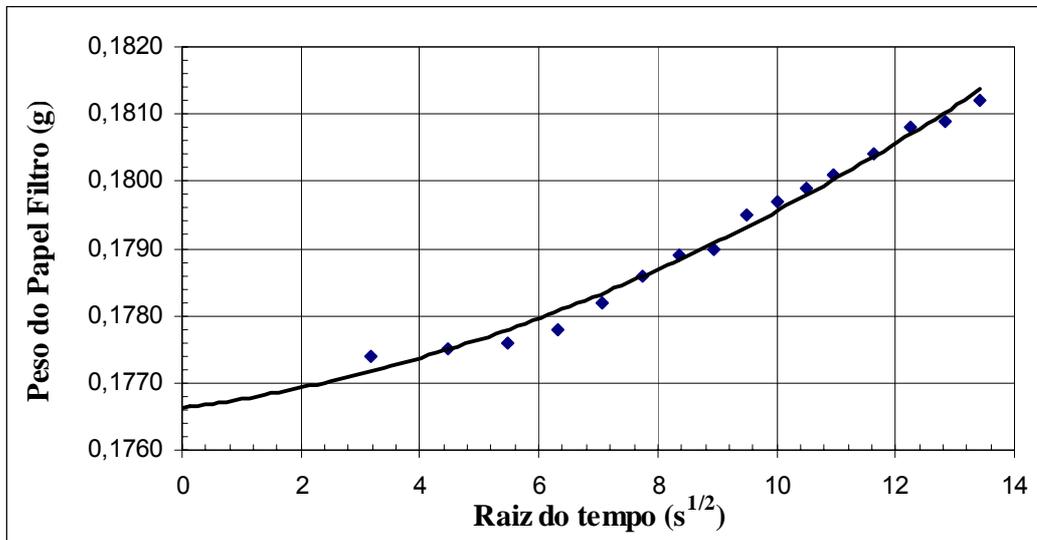
(a)



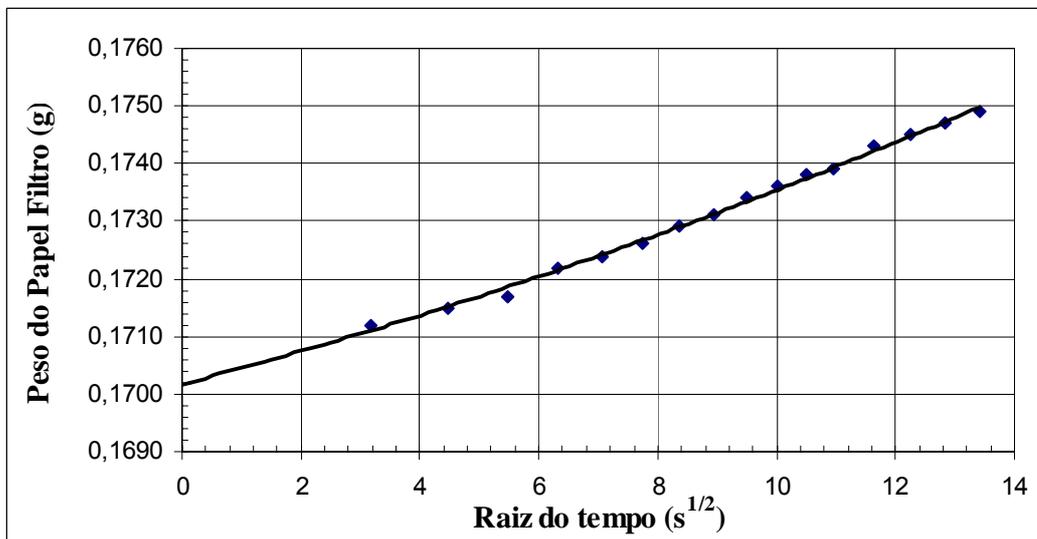
(b)

**Figura B.13:** Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 7):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



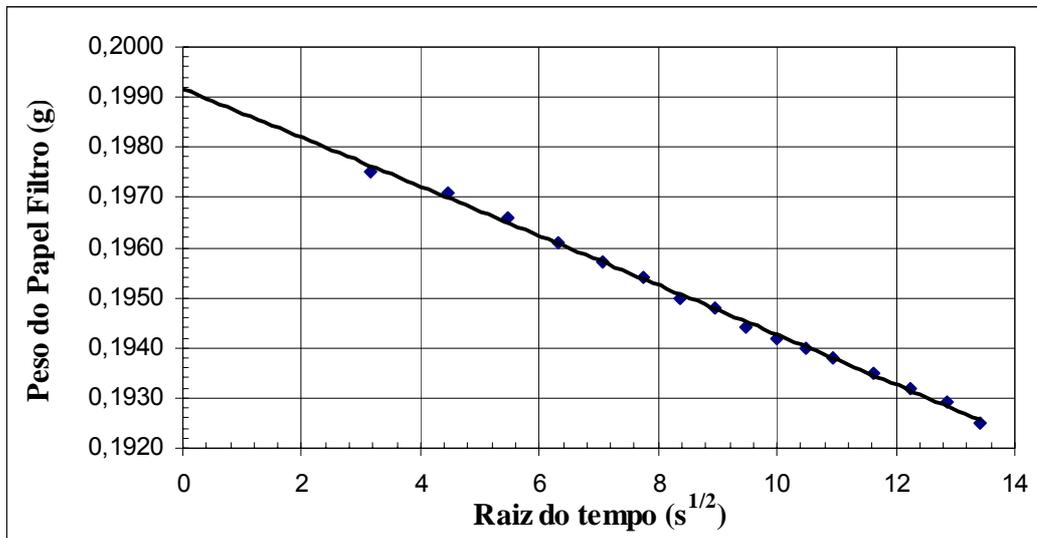
(a)



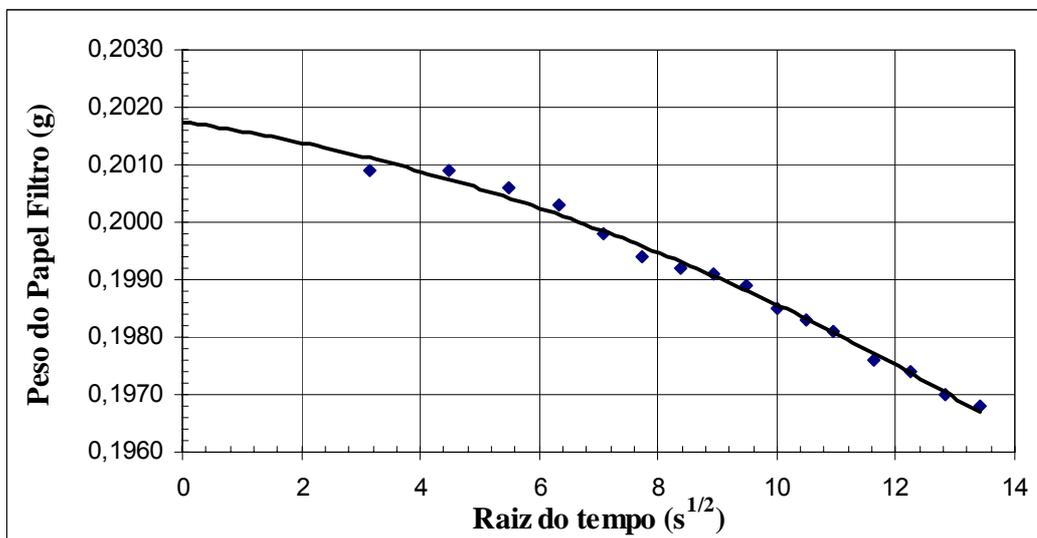
(b)

**Figura B.14:** Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 7):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



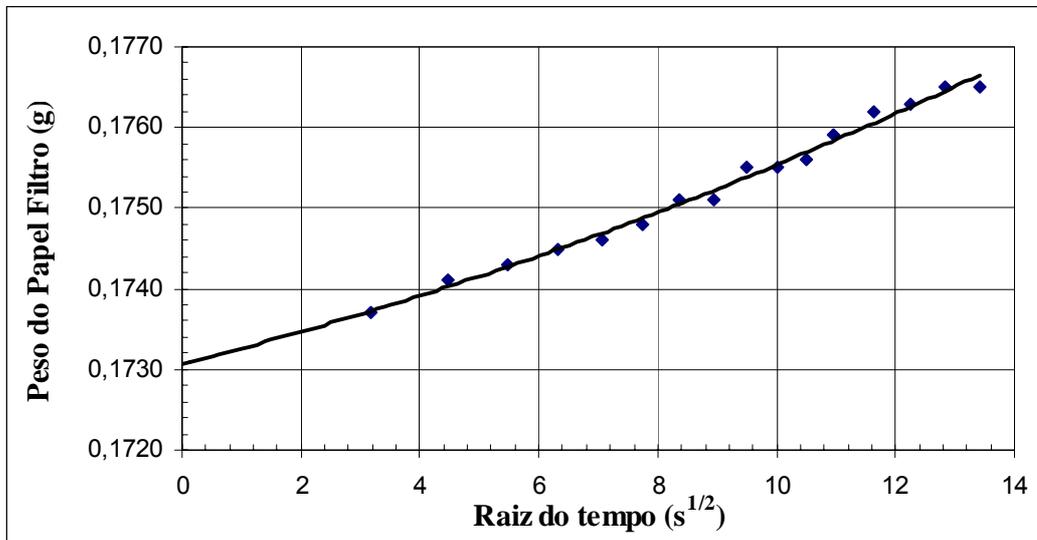
(a)



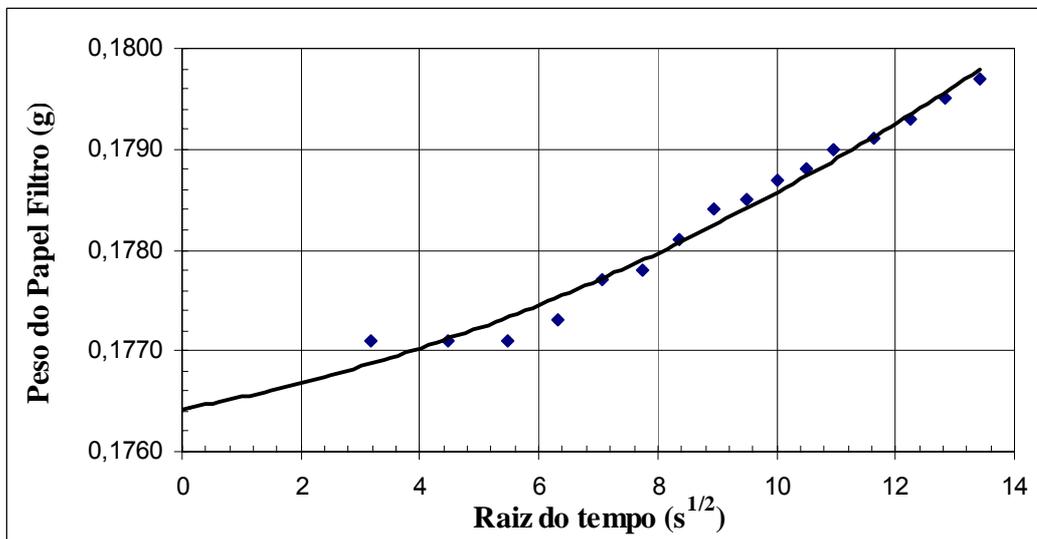
(b)

**Figura B.15:** Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 8):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



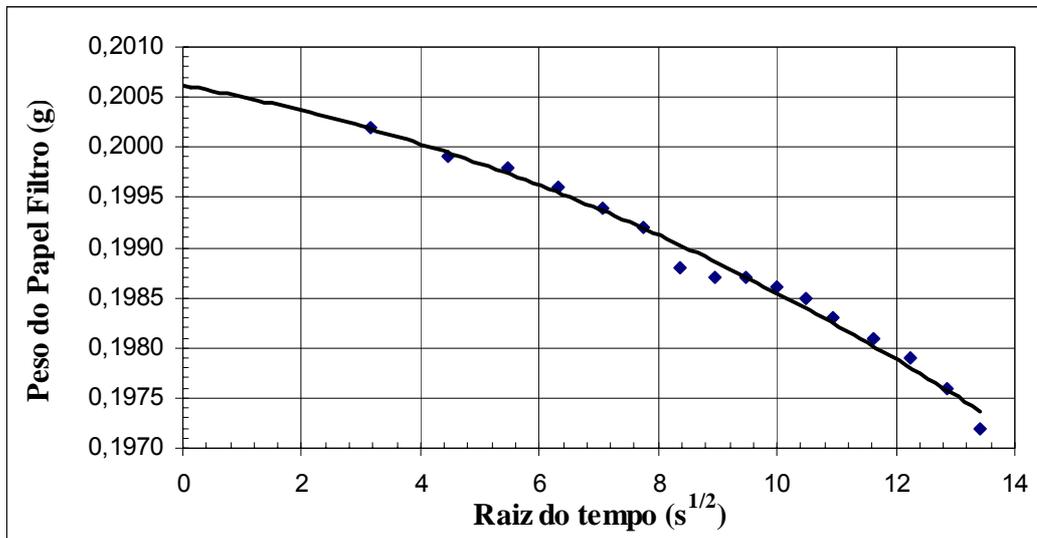
(a)



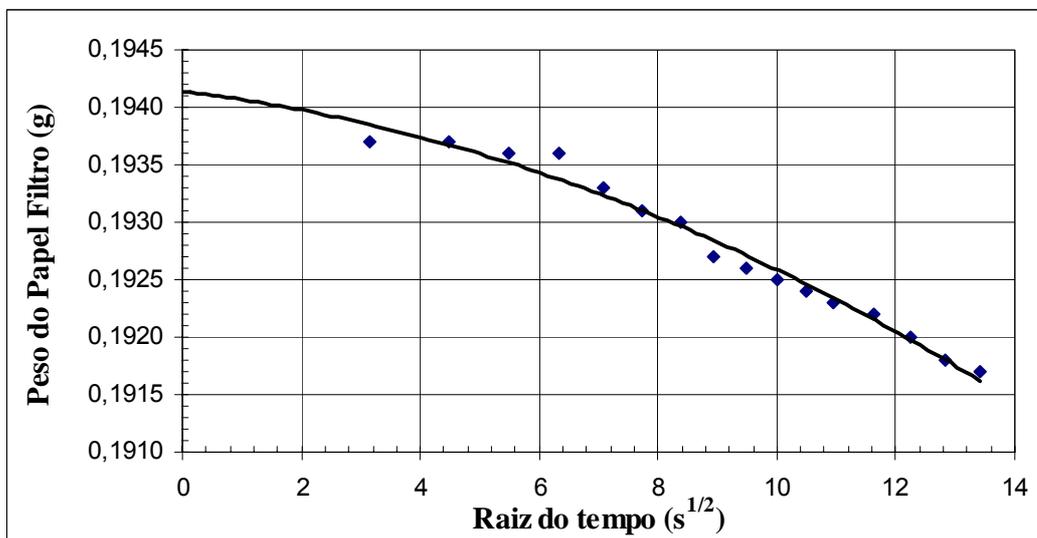
(b)

**Figura B.16:** Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 8):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



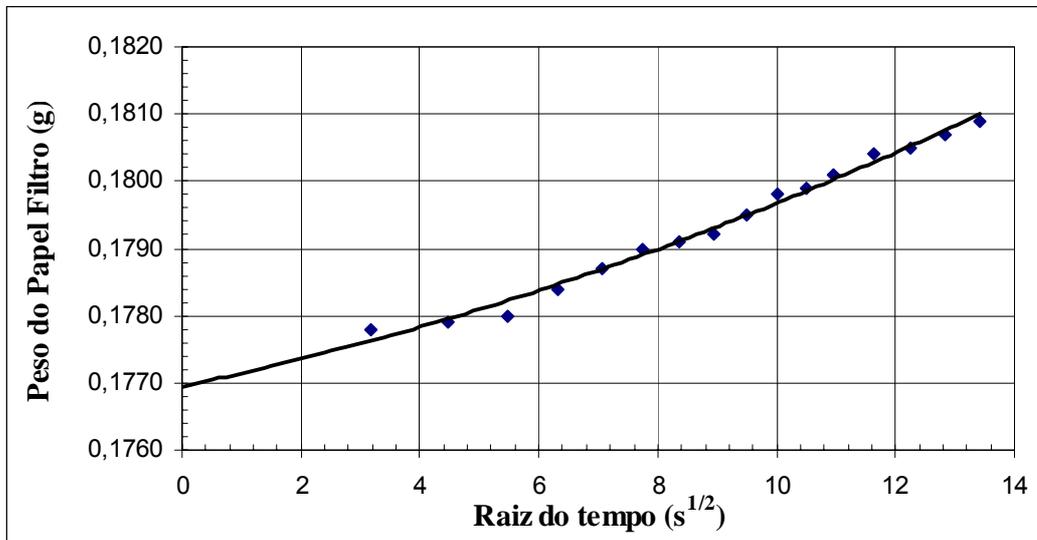
(a)



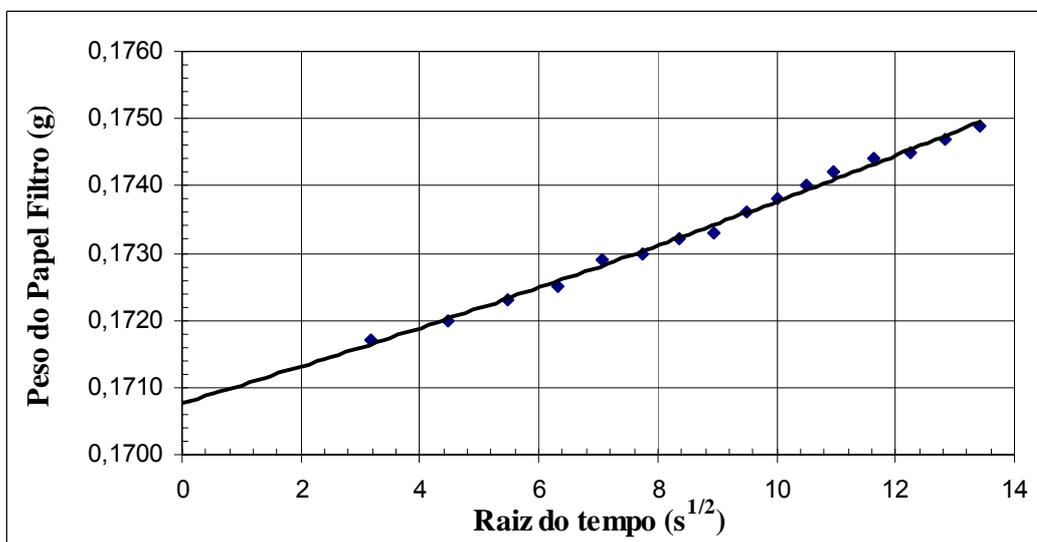
(b)

**Figura B.17:** Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 9):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



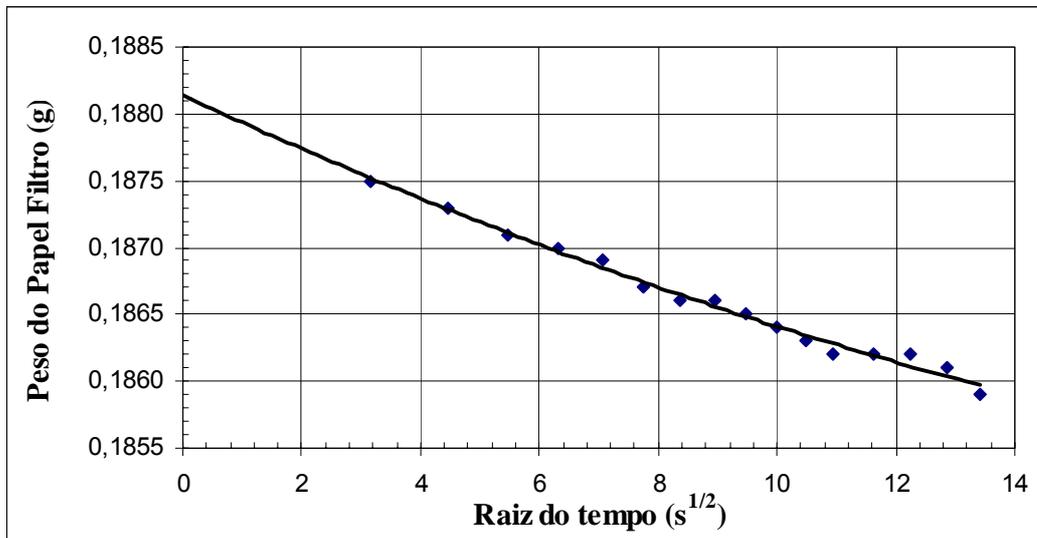
(a)



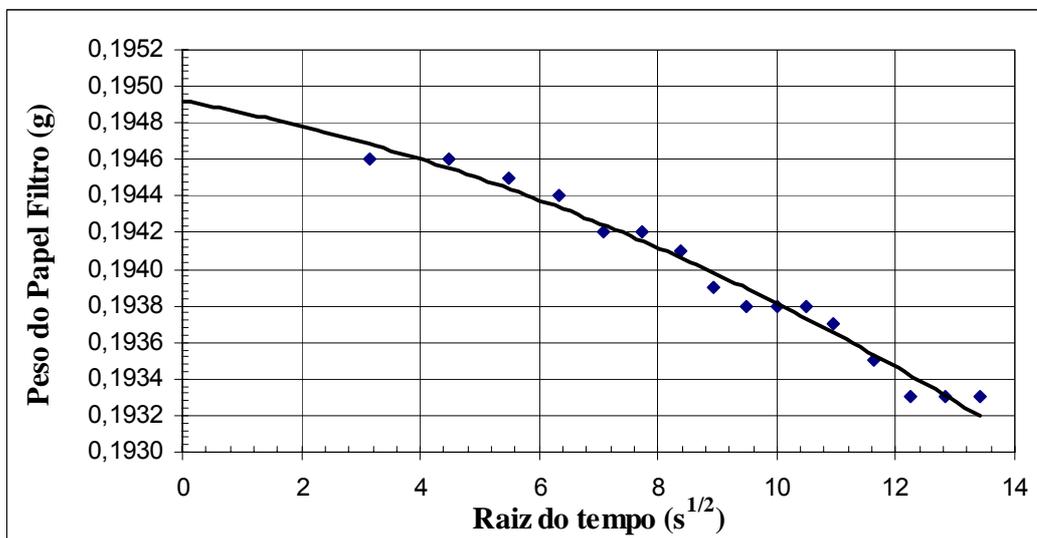
(b)

**Figura B.18:** Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 9):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



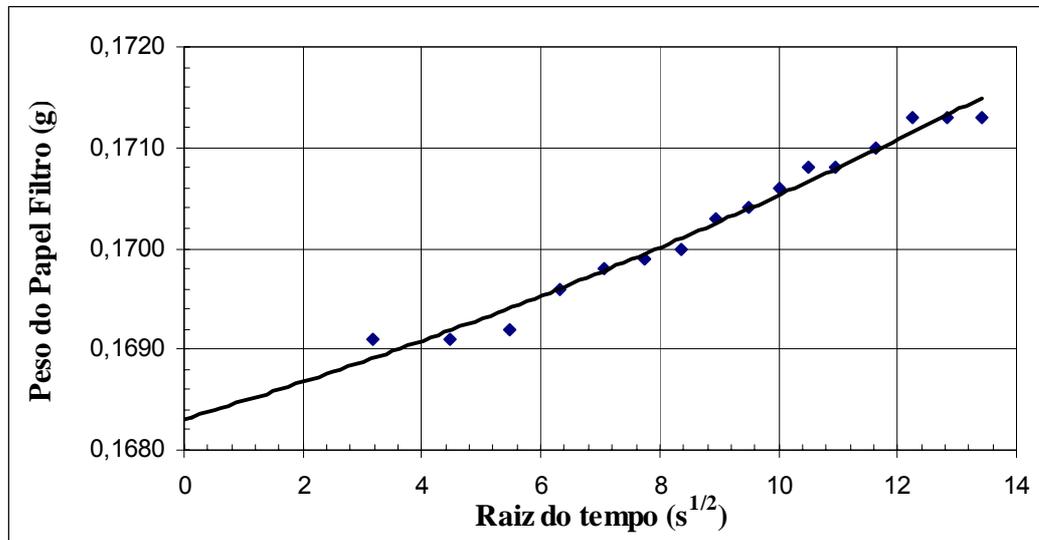
(a)



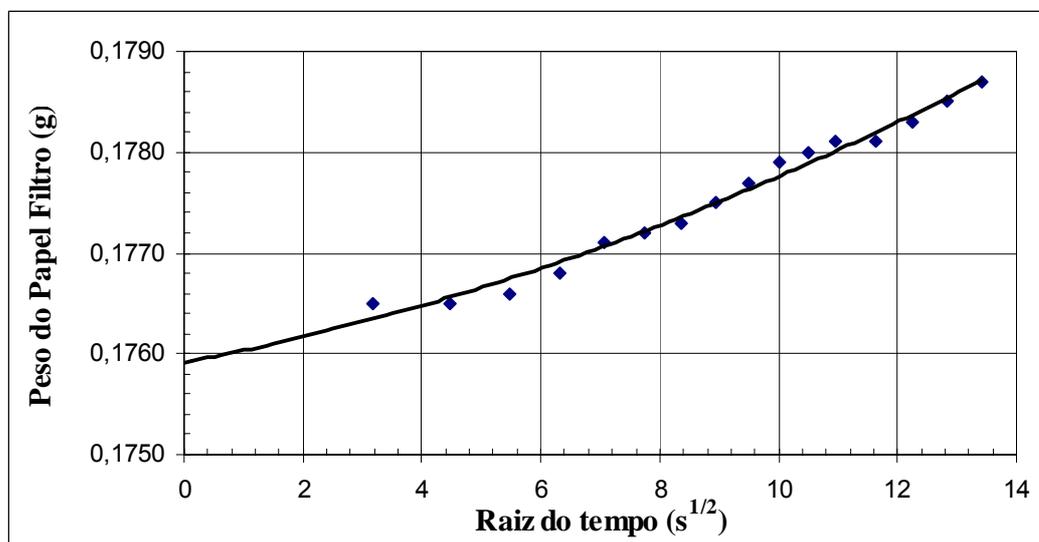
(b)

**Figura B.19:** Determinação do peso do papel filtro úmido no tempo zero (ponto 10):

(a) papel do topo; (b) papel da base.



(a)



(b)

**Figura B.20:** Determinação do peso do papel filtro seco no tempo zero (ponto 10):

(a) papel do topo; (b) papel da base.

## Apêndice C

### Velocidade de cisalhamento

Neste apêndice são apresentadas as metodologias utilizadas para o cálculo do tempo estimado de ruptura para ensaios saturados e não saturados em condições drenadas.

#### C.1.

##### Tempo de Ruptura em Ensaios Saturados

Em ensaios drenados, deseja-se garantir a dissipação de excessos de pressões de água e de ar dos poros, induzidas ao longo do plano de cisalhamento, através de uma velocidade de cisalhamento suficientemente pequena.

Gibson & Henkel (1954) utilizaram a teoria de adensamento na formulação de um método teórico para a determinação aproximada do tempo de ruptura para ensaios drenados em amostras saturadas (submersas):

$$t_f = \frac{H^2}{2.c_v.(1 - \bar{U})} \quad (C.1)$$

onde:

$t_f$  = tempo de ruptura;

$H$  = metade da espessura da amostra;

$c_v$  = coeficiente de adensamento relacionado ao ensaio;

$\bar{U}$  = grau médio de dissipação do excesso de poro-pressão (95%).

A tabela C.1 apresenta o cálculo da velocidade de cisalhamento para os ensaios realizados considerando que a ruptura acontecia entre 5 e 10mm de deslocamento horizontal aproximadamente.

**Tabela C.1:** Velocidades calculadas nos ensaios de cisalhamento direto convencional em amostras submersas (Gibson & Henkel, 1954).

Ensaio	$\sigma_v$ (kPa)	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	H (cm)	$t_f$ (s)	$t_f$ (min)	Velocidade para $\delta_h = 5\text{mm}$ (mm/min)	Velocidade para $\delta_h = 10\text{mm}$ (mm/min)
1	50	7,00E-03	1,94	1344,34	22,41	0,223	0,446
2	102	5,11E-03	1,94	1839,62	30,66	0,163	0,326
3	150	5,59E-03	1,94	1683,96	28,07	0,178	0,356
4	200	3,93E-03	1,94	2391,51	39,86	0,125	0,251

Velocidade adotada: 0,0122mm/min

## C.2.

### Tempo de Ruptura em Ensaio Não Saturados

Em amostras não saturadas, o tempo de ruptura pode ser expresso em termos do grau desejado de dissipação do excesso de pressão de água dos poros segundo a metodologia apresentada por Ho (1981):

$$t_f = \frac{H^2}{\eta \cdot c_v^w \cdot (1 - U)} \quad (\text{C.2})$$

onde:

$t_f$  = tempo de ruptura;

$\eta = 0,75/(1 + 3/\lambda)$  para drenagem simples;

$c_v^w = K_w/(\rho_w \cdot g \cdot m_2^w)$ , coeficiente de adensamento do solo não saturado relacionado com a fase líquida;

$K_w$  = coeficiente de permeabilidade do solo não saturado relacionado com a fase líquida;

$\rho_w$  = densidade da água (1g/cm<sup>3</sup>);

$g$  = aceleração da gravidade (9,81m/s<sup>2</sup>);

$m_2^w$  = inclinação da curva característica ( $\theta$  vs. sucção mátrica);

$\lambda = K_d \cdot d / K_w \cdot L_d$ , fator de impedância;

$K_d$  = coeficiente de permeabilidade do DAVE;

$d$  = comprimento de drenagem ( $d = 2H$ );

$L_d$  = espessura do DAVE;

$H$  = metade da espessura da amostra;

$\bar{U}$  = grau médio de dissipação do excesso de poro-pressão (95%).

Para a estimativa da permeabilidade não saturada do solo, foi utilizado o procedimento apresentado por Fredlund et al. (1994). Esse procedimento é descrito resumidamente a seguir.

Primeiramente os dados experimentais da curva característica foram ajustados até um valor máximo de 10<sup>6</sup>kPa, segundo a metodologia apresentada por Fredlund & Xing (1994), através das seguintes equações:

$$\theta(\psi, a, n, m) = C(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\psi/a)^n]\}^m} \quad (C.3)$$

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln[1 + (1000000/\psi_r)]} \quad (C.4)$$

Os parâmetros de ajuste  $a$ ,  $n$  e  $m$  são determinados, com o auxílio da solução gráfica mostrada na figura C.1, da seguinte forma:

$$a = \psi_i \quad (C.5)$$

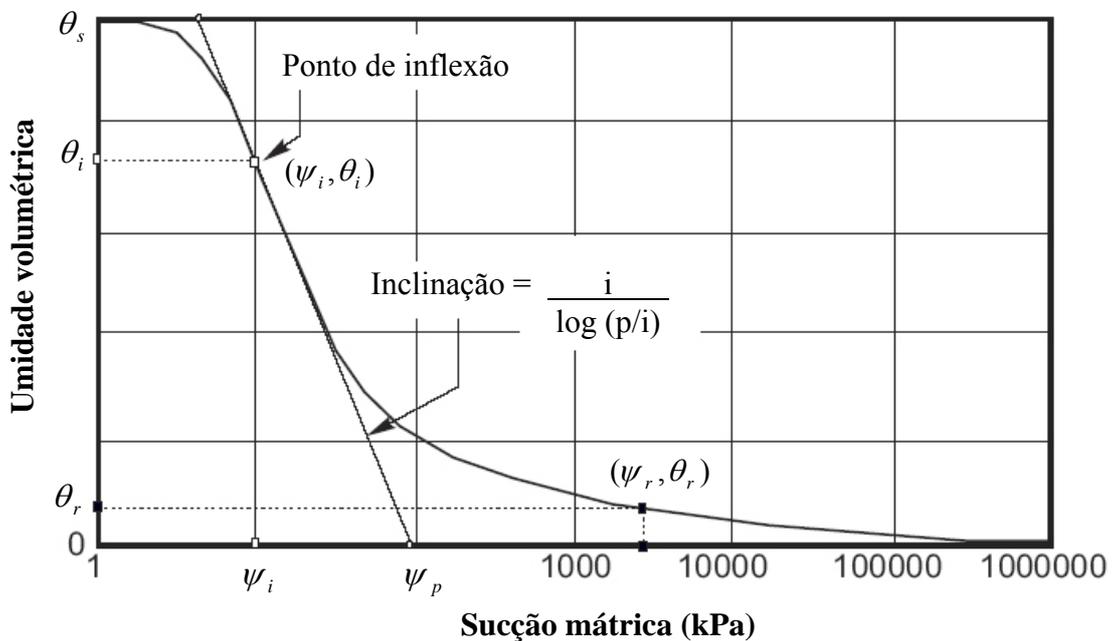
$$m = 3.67 \ln \left[ \frac{\theta_s C(\psi_i)}{\theta_i} \right] \quad (C.6)$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{mC(\psi_i)} 3.72s^* \quad (C.7)$$

onde:

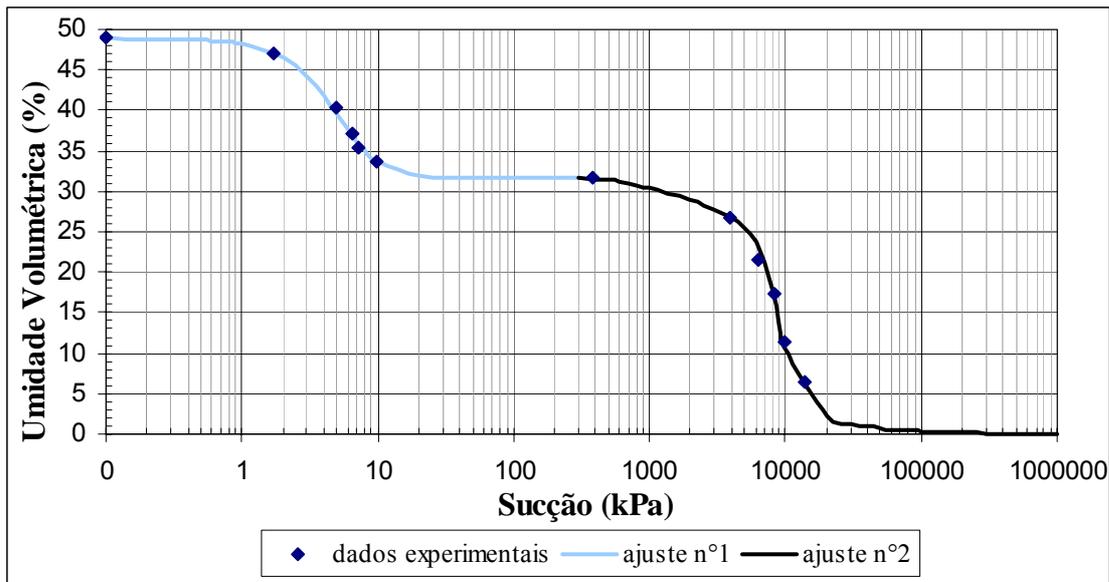
$$s^* = \frac{s}{\theta_s} - \frac{\psi_i}{1.31^m (\psi_i + \psi_r) \ln[1 + (1000000/\psi_r)]} \quad (C.8)$$

$$s = \frac{\theta_i}{\ln(\psi_p/\psi_i)} \quad (C.9)$$



**Figura C.1:** Solução gráfica para a determinação dos parâmetros de ajuste  $a$ ,  $n$  e  $m$  (adaptado de Fredlund & Xing, 1994).

Como a curva característica apresenta dois pontos de inflexão, em virtude da distribuição bimodal de poros, os dados experimentais foram ajustados através de duas curvas. A primeira curva foi ajustada para uma faixa de sucção variando de 0 a 300kPa, enquanto que a segunda curva para uma sucção de 300 a 1000000kPa. A figura C.2 apresenta esse ajuste.



**Figura C.2:** Ajuste da curva característica utilizando a proposta de Fredlund & Xing (1994).

Para o cálculo da permeabilidade não saturada, Fredlund et al. (1994) apresentam a seguinte equação:

$$k_r(\psi) = \frac{k_w(\psi)}{k_s} = \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_{aev})}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (C.10)$$

onde:

$k_r(\psi)$  = coeficiente de permeabilidade relativa em função da sucção;

$k_w(\psi)$  = coeficiente de permeabilidade não saturado em função da sucção;

$k_s$  = coeficiente de permeabilidade saturado.

Através de integração numérica, a equação C.10 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$k_r(\psi) = \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_{aev})}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \cong \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^{\bar{y}_i}) - \theta(\psi)}{e^{\bar{y}_i}} \theta'(e^{\bar{y}_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^{\bar{y}_i}) - \theta_s}{e^{\bar{y}_i}} \theta'(e^{\bar{y}_i})} \quad (C.11)$$

sendo:

$a = \ln(\psi_{aev})$ , limite inferior de integração;

$b = \ln(1000000)$ , limite superior de integração.

O intervalo  $[a, b]$  é dividido em  $N$  subintervalos de mesmo tamanho onde  $\Delta y$  é o comprimento desse subintervalo, logo:

$$a = y_1 < y_2 < \dots < y_N < y_{N+1} = b$$

$$\Delta y = \frac{b - a}{N} \quad (C.12)$$

$\bar{y}_i$  = ponto médio do  $i^{\text{th}}$  intervalo  $[y_i, y_{i+1}]$ .

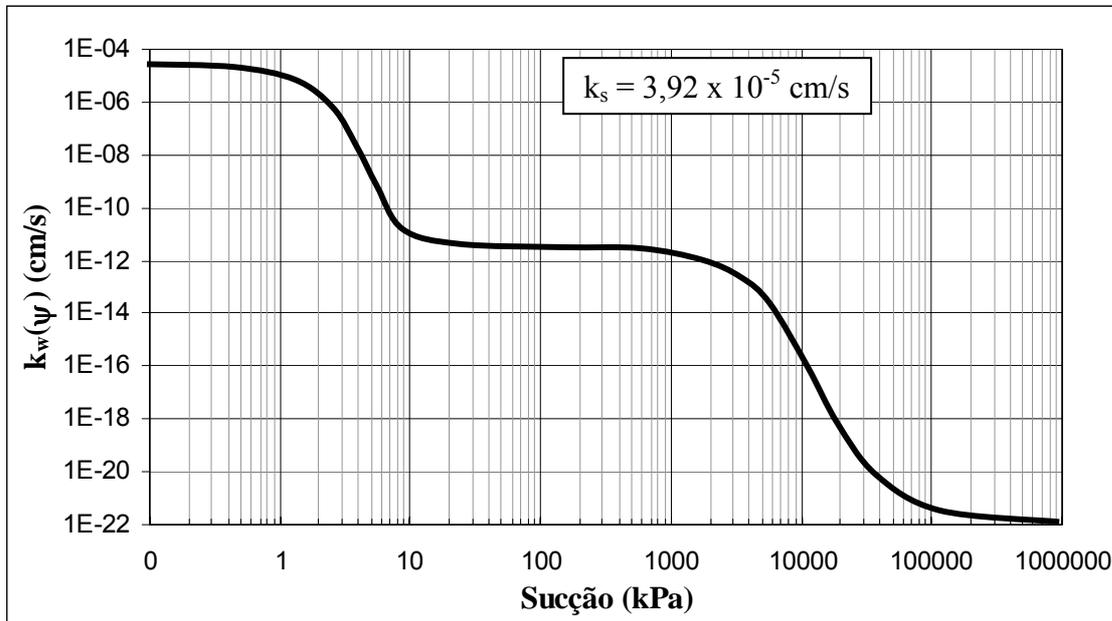
$\theta'$  = derivada da equação C.3, dada por:

$$\theta'(\psi) = C'(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\psi/a)^n]\}^m} - C(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\psi/a)^n]\}^{m+1}} \times \frac{mn \left(\frac{\psi}{a}\right)^{n-1}}{a \cdot [e + (\psi/a)^n]} \quad (C.13)$$

onde:

$$C'(\psi) = \frac{-1}{(C_r + \psi) \cdot \ln[1 + (1000000/C_r)]} \quad (C.14)$$

A figura C.3 mostra o cálculo do coeficiente de permeabilidade não saturado em função da sucção.



**Figura C.3:** Estimativa da permeabilidade não saturada utilizando a metodologia de Fredlund et al. (1994).

A tabela C.2 apresenta o cálculo da velocidade de cisalhamento para as sucções aplicadas considerando que a ruptura acontecia entre 5 e 10mm de deslocamento horizontal aproximadamente.

**Tabela C.2:** Velocidades de cisalhamento calculadas para os ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada em amostras não saturadas.

$(u_a - u_w)$ kPa	$L_d$ (m)	$d$ (m)	$k_w$ (m/s)	$K_d$ (m/s)	$m_2^w$ (kPa <sup>-1</sup> )	$\lambda$	$\eta$	$C_v^w$ (m <sup>2</sup> /s)	$t_r$ (s)	$t_r$ (min)	$t_r$ (h)	Velocidade para $\delta_h = 5\text{mm}$ (mm/min)	Velocidade para $\delta_h = 10\text{mm}$ (mm/min)
25	0,0073	0,0213	1,42E-13	2,05E-10	7,86E-08	4,20E+03	0,749	1,85E-07	16403,9	273,40	4,56	0,01829	0,03658
50	0,0073	0,0213	1,37E-13	2,05E-10	7,86E-08	4,36E+03	0,749	1,78E-07	17019,1	283,65	4,73	0,01763	0,03525
100	0,0073	0,0213	1,37E-13	2,05E-10	7,86E-08	4,37E+03	0,749	1,77E-07	17073,0	284,55	4,74	0,01757	0,03514
150	0,0073	0,0213	1,37E-13	2,05E-10	7,86E-08	4,37E+03	0,749	1,77E-07	17073,2	284,55	4,74	0,01757	0,03514
200	0,0073	0,0213	1,37E-13	2,05E-10	7,86E-08	4,37E+03	0,749	1,77E-07	17073,4	284,56	4,74	0,01757	0,03514

Velocidade adotada: 0,0122 mm/min