



## RESULTADOS ARQUEOMAGNÉTICOS PRELIMINARES DE SÍTIOS HISTÓRICOS DO SUDESTE BRASILEIRO

Guilherme S. Begnini<sup>1</sup>, Gelvam A. Hartmann<sup>1</sup>, Ricardo I.F. Trindade<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

### Resumo

O campo geomagnético antigo pode ser determinado a partir de diferentes materiais arqueológicos. Estes materiais incluem materiais de argila cozida, principalmente, materiais de construção (tijolos, telhas, ladrilhos, etc.) e cerâmicas. Os dados arqueomagnéticos são desigualmente distribuídos no tempo e no espaço; o hemisfério Sul contribui com apenas ~5% dos dados arqueomagnéticos globais para os últimos milênios. A escassez de dados arqueomagnéticos em todo o mundo é crucial para a modelagem do campo geomagnético. A fim de contribuir com o banco de dados arqueomagnéticos, foi iniciado um projeto para aquisição de novos dados arqueomagnéticos direcionais e de intensidade do Sudeste do Brasil, datados entre o século XVII e XX. São apresentados resultados preliminares de inclinação em tijolos do sítio Engenho Central de Piracicaba (ECP), bem como medidas de mineralogia magnética nesses tijolos. A desmagnetização por campos magnéticos alternados (AF) em campos de até 100 mT foi aplicada em 6 espécimes de 5 fragmentos de tijolos do sítio ECP. A componente magnética primária não pode ser definida nesses espécimes, sugerindo a necessidade de aplicação da desmagnetização térmica a fim de determinar a paleoinclinação. Medidas de susceptibilidade magnética em ciclos de aquecimento e resfriamento da temperatura ambiente até ~600 °C foram realizadas em 4 fragmentos. O comportamento reversível foi observado em 2 fragmentos, mas para os outros 2 fragmentos alguns fragmentos a irreversibilidade foi detectada. Os resultados preliminares da desmagnetização por AF sugerem a potencialidade de obtenção de dados de inclinação em tijolos brasileiros.

### Abstract

Ancient geomagnetic field can be determined from different archeological materials. These materials include mainly baked clay materials, like construction materials (bricks, tiles, pavement bricks, etc.) and potteries. Archeomagnetic data are unevenly distributed in time and space; southern hemisphere contributes with only ~5% of the global archeomagnetic data for the past few millennia. Scarcity of the archeomagnetic data around the world is crucial for the geomagnetic field modeling. In order to contribute with the archeomagnetic database, we have initiated an archeomagnetic project to acquire new directional and intensity data in Southeast Brazil dated between XVII th and XX th centuries. Preliminary results of inclination in bricks are presented, as well as preliminary magnetic mineralogy measurements in these bricks. Alternating field (AF) demagnetization up to 100 mT was applied in 6 specimens from 5 brick fragments of the Engenho Central de Piracicaba (ECP) site. Primary magnetic component was not defined in those specimens, suggesting the need to apply thermal demagnetization in order to determine the paleoinclination. Heating-cooling cycles of magnetic susceptibility from room temperature up to ~600 °C were performed in 4 fragments. Reversibility behaviour was observed in 2 fragments, but other fragments the irreversibility behaviour was detected. The preliminary results of AF demagnetization suggest the potentiality for determining inclination data from Brazilian bricks.

### Introdução

A Terra possui um campo magnético de origem interna e externa. O campo de origem externa é gerado basicamente pela atividade solar e contribui com menos de 1% do campo total observado em superfície. As



variações do campo externo ocorrem devido ao fluxo de partículas ionizadas vindas do sol, e de outras regiões do cosmo, que interagem com a ionosfera e em parte com a magnetosfera (e.g. Chapman e Bartels, 1940). O campo de origem interna possui duas fontes importantes. A primeira fonte, chamada de *campo principal*, é o campo gerado por correntes elétricas que circulam no núcleo externo da Terra. A segunda fonte se deve aos materiais magnetizados encontrados na crosta terrestre. Esse campo é chamado de *campo crustal*. (e.g. Merrill et al., 1998; Hulot et al., 2010).

As evidências sobre a origem e evolução do campo principal podem somente ser acessadas através de medidas magnéticas feitas na superfície da Terra ou acima. Essas medidas podem ser diretas ou indiretas. As medidas diretas dos dados de direção e intensidade foram obtidas pelos navegadores nos períodos das grandes navegações e em observatórios magnéticos compreendido entre os séculos XVI e XIX (e.g. Bloxham et al., 1989; Jonkers et al., 2003). A grande maioria dos dados provém de medidas de declinação do campo. As medidas de inclinação começaram a ser feitas no final do século XVI, porém, esse tipo de dado é muito mais escasso em comparação com aos dados de declinação. As medidas indiretas do campo magnético da Terra (CMT) são determinadas a partir da magnetização remanente registrada em materiais arqueológicos e geológicos. Essas diferentes bases de dados são utilizadas para construção de modelos do CMT no passado que, por sua vez, permitem descrevê-lo continuamente no tempo e no espaço para os últimos séculos e milênios (e.g. Jackson et al., 2000; Korte et al., 2009). No entanto, esses modelos dependem fortemente da distribuição espacial e temporal dos dados geomagnéticos. A distribuição temporal e espacial dos dados ao redor do globo é heterogênea, sendo que o hemisfério Sul contribui com apenas 5% dos globais para os últimos milênios (e.g. Genevey et al., 2008; Donadini et al., 2009). A América do Sul ainda é considerada a *terra incógnita* para a arqueointensidade, visto que há poucos dados e muitos deles de baixa qualidade (e.g. Genevey et al., 2008). Um avanço recente no sentido de melhorar a base de dados foi através da aquisição de dois conjuntos de dados de arqueointensidade obtidos em duas regiões distintas do Brasil para os últimos séculos (Hartmann et al., 2010; 2011). No entanto, ainda há clara necessidade de obtenção de dados arqueomagnéticos na América do Sul com o objetivo de descrever importantes feições do CMT, como a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (SAMA) que persiste no tempo e no espaço e é regida por fortes componentes não-dipolares do CMT (e.g. Hartmann e Pacca, 2009).

O arqueomagnetismo é uma área de pesquisa interdisciplinar que envolve Arqueologia, Magnetismo de Rochas e Geomagnetismo (Gallet et al., 2009). Os principais materiais arqueológicos utilizados para determinação das variações do CMT em períodos de tempo arqueológico são materiais construtivos (tijolos, telhas, azulejos, ladrilhos), cerâmicas (decorativas e utilitárias), fornos, solos queimados e pinturas rupestres. Para obtenção de dados direcionais (declinação e inclinação) é necessário conhecer a posição em que o objeto foi queimado pela última vez e a amostragem deve ser feita *in situ*. Embora, a inclinação possa também ser determinada em tijolos desde que se conheça a posição de queima dos mesmos. Para determinação da intensidade são utilizados materiais feitos de argila e que sofreram aquecimento em altas temperaturas, como é o caso de tijolos, telhas e cerâmicas. Neste trabalho serão apresentados resultados preliminares de inclinação magnética determinados em tijolos do Engenho Central de Piracicaba. Serão apresentados também alguns resultados de mineralogia magnética de tijolos do Engenho Central de Piracicaba. Pretende-se também estudar a intensidade do CMT em cerâmicas do sítio de Pinheiros II e tijolos do Engenho Central de Piracicaba (ambos localizados no estado de São Paulo).

### **Contexto arqueológico e metodologia utilizada**

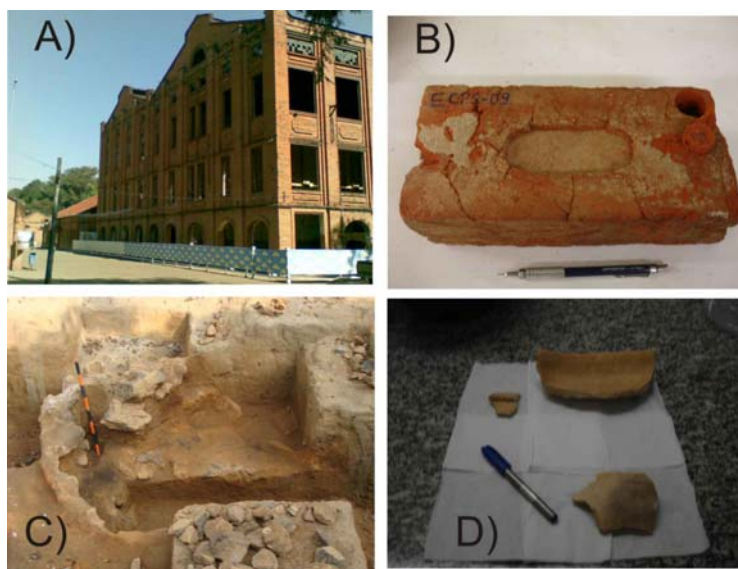
Neste trabalho estão sendo estudados dois sítios localizados no Estado de São Paulo nas cidades de Piracicaba e São Paulo (Figura 1, região Sudeste do Brasil). Na cidade de Piracicaba foram coletados fragmentos de tijolos e tijolos inteiros do Engenho Central de Piracicaba (sítio ECP, Figura 2a). O Engenho Central foi construído em 1881 AD às margens do Rio Piracicaba e funcionou até meados do século XX, sendo uma das principais unidades produtoras de açúcar do país durante esse período. O ECP



passou por reformas e ampliações durante o período de utilização. Após sua construção, o ECP sofreu sua primeira ampliação em 1910 AD e em seguida passou por mais quatro fases de ampliação até o ano 1940 AD. No total foram coletados 94 fragmentos de tijolos e 46 cilindros de tijolos de 14 paredes das fundações do ECP que corresponde às 5 fases de construção. Da primeira fase foram amostrados 11 fragmentos de tijolos dos pontos de amostragem ECP10 e ECP11. Da segunda fase foram amostrados 15 fragmentos de tijolos do ponto ECP1. Da terceira fase foram amostrados 8 fragmentos de tijolos e 14 cilindros de tijolos dos pontos ECP3 e ECP4. Da quarta fase foram amostrados 14 fragmentos de tijolos e 32 cilindros de tijolos dos pontos ECP5, ECP6, ECP7, ECP8 e ECP9. Da quinta fase foram amostrados 5 fragmentos de tijolos do ponto ECP12. Embora tenham estudos de evolução arquitetônica, alguns pontos de amostragem do ECP ainda não apresentam um contexto de ampliação conhecido, que no caso são os pontos ECP2, ECP13 e ECP14. Nesses pontos foram coletados 41 fragmentos de tijolos e que poderão ser comparados com os fragmentos de idades conhecidas dos outros pontos de amostragem, com o objetivo de determinação de possíveis idades (Maria Luiza Dutra & Associados, Junho de 2011, relatório parcial). Nessas amostras pretende-se determinar a paleoinclinação e a paleointensidade do CMT.



**Figura 1:** Mapa de localização das cidades onde se encontram os sítios estudados.



**Figura 2:** (a) Foto do Engenho Central de Piracicaba (ECP); (b) foto do tijolo ECP1-9; (c) foto do forno 6 (EQ6) do sítio Pinheiros II; (d) exemplos de amostras de cerâmicas dos fornos do sítio de Pinheiros II.



Na cidade de São Paulo foram escavados 9 fornos de produção cerâmica (Figura 2c). Nesses fornos (estruturas de queima) foram encontrados fragmentos de cerâmica datados entre os séculos XVII e XIX. O sítio Pinheiros II está localizado na região do Bairro de Pinheiros, que é conhecidamente uma região de produção cerâmica do período histórico da cidade de São Paulo porque encontra-se às margens do Rio Pinheiros. Durante as escavações foram coletados mais de 50 mil fragmentos cerâmicos de materiais utilitários e decorativos (relatório técnico em preparação). Desse total, foram coletados *in situ* 73 fragmentos cerâmicos decorativos (Figura 2d) para os experimentos de paleointensidade oriundos de 6 estruturas de queima (EQ) (fornos) do sítio Pinheiros II. Nessas amostras pretende-se determinar a paleointensidade do CMT.

Para determinação da inclinação dos tijolos do ECP, foram preparados espécimes no formato de cilindros no padrão de 2.5 cm de diâmetro e 2.2 cm de altura. Considerando que os tijolos foram cozidos horizontalmente em relação ao plano do forno, os espécimes foram extraídos perpendicularmente ao plano horizontal do tijolo. Dessa forma pode-se obter a inclinação magnética registrada no momento da sua fabricação e/ou da última queima. A fim de examinar a estabilidade magnética, foi utilizada a desmagnetização por passos em campos magnéticos alternados (AF) com intensidade inicial do campo aplicado de 2.5 mT até 100 mT, em intervalos de 2.5 mT até 25 mT, passos de 5 mT até 50 mT e passos de 10 mT até 100 mT. Para as medidas de magnetização foi utilizado o magnetômetro *JR-6A Dual Speed Magnetometer* da AGICO e para a desmagnetização das amostras foi utilizado o desmagnetizador *Molspin*. Para a identificação das componentes de magnetização foram feitas análises vetoriais de Zijderveld (1967), considerando um desvio angular máximo de 10° (Kirschvink, 1980).

Para caracterização da mineralogia magnética e estabilidade térmica das amostras serão efetuadas medidas de susceptibilidade magnética, curvas de aquisição da magnetização remanente isotérmica (MRI) e ciclos de histerese magnética. Até o momento, foram efetuadas medidas de susceptibilidade magnética em um conjunto de quatro amostras da coleção ECP com o intuito de verificar a estabilidade térmica das mesmas. Essas medidas estão sendo feitas em ar utilizando o susceptômetro Kappabridge KLY4-CS3 da AGICO em ciclos de aquecimento e resfriamento da temperatura ambiente até 600 °C. Todas as medidas de magnetização e caracterização da mineralogia magnética foram efetuadas no Laboratório de Paleomagnetismo do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP).

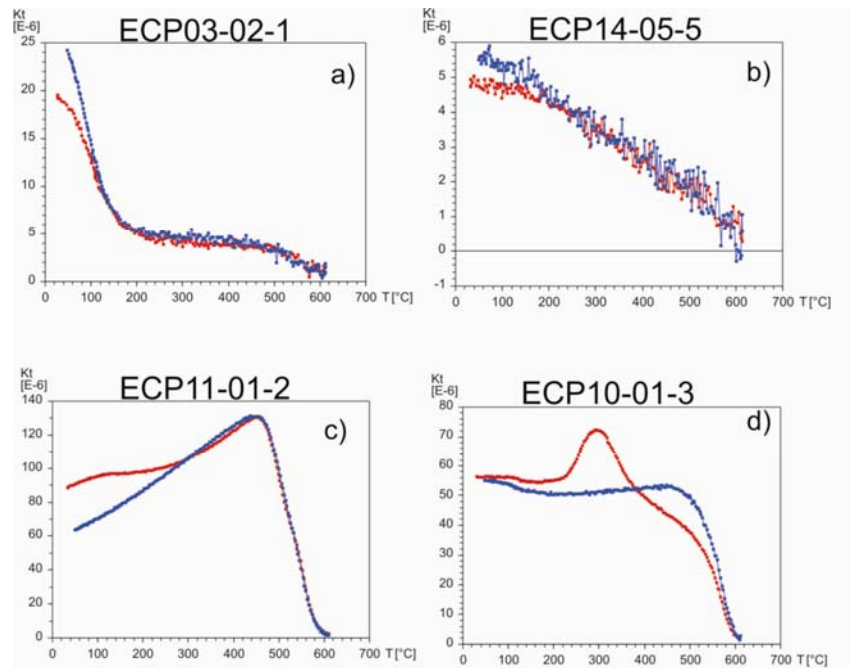
## Resultados preliminares

As medidas de susceptibilidade magnética em função da temperatura foram feitas nos fragmentos ECP03-02, ECP14-05, ECP11-01 e ECP10-01 (Figura 3). Os ciclos de aquecimento e resfriamento foram feitos entre a temperatura ambiente até ~600 °C. Os comportamentos dos ciclos de susceptibilidade magnética são bastante distintos entre as amostras analisadas. A amostra ECP03-02 apresenta uma queda brusca da susceptibilidade magnética em temperaturas abaixo de 150 °C, sendo que o ciclo de resfriamento é reversível até esta temperatura e irreversível até a temperatura ambiente. Esse comportamento sugere a presença de goetita como portador da magnetização. A amostra ECP14-05 apresenta valores de susceptibilidade baixos e reversibilidade da curva. Esse comportamento é característico de minerais de alta coercividade. As amostras ECP11-01 e ECP10-01 apresentam valores de susceptibilidade magnética mais altas em comparação com as amostras ECP03-02 e ECP14-05 e comportamento irreversível para os ciclos de aquecimento e resfriamento, indicando alteração da mineralogia magnética com temperatura.

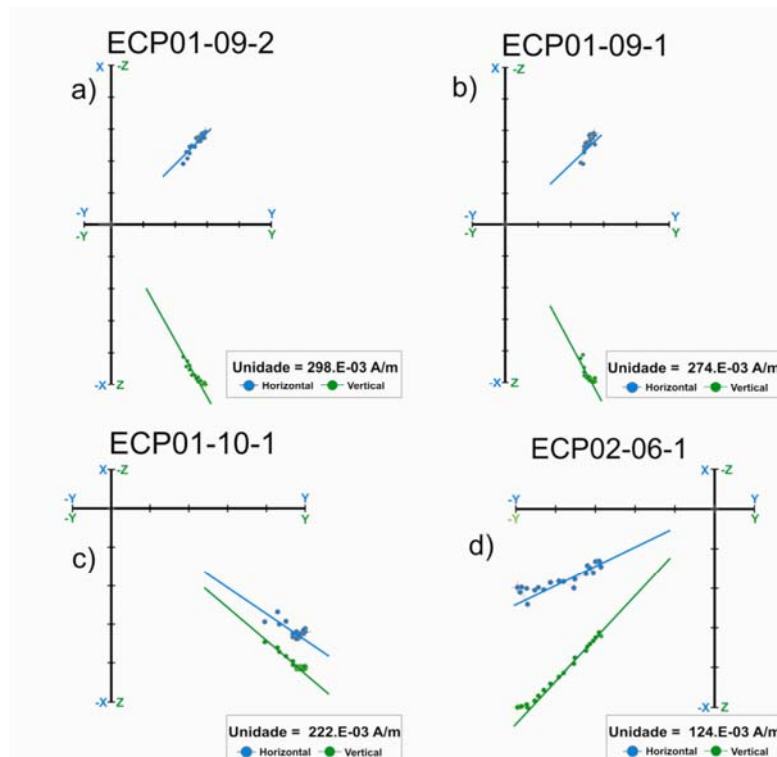
A desmagnetização por campos magnéticos alternados não foi suficiente para desmagnetizar os seis espécimes pilotos, como mostram os exemplos da Figura 4 (espécimes ECP01-09-1, ECP01-09-2, ECP01-10-1 e ECP02-06-1). Em relação as medidas feitas, o espécime ECP02-11-1 apresentou o maior percentual de desmagnetização, com 40% do total, e o espécime ECP02-06-1 apresentou a menor desmagnetização, com 18% do total. Por esse motivo, para completa desmagnetização da componente magnética



característica (conseqüentemente da inclinação magnética) serão necessárias medidas de desmagnetização térmica por passos, que serão efetuadas em passos de 25 °C a partir 150 °C até 700 °C.



**Figura 3:** Ciclos de aquecimento e resfriamento dos espécimes (a) ECP03-02-2, (b) ECP14-05-5, (c) ECP11-01-2 e (d) ECP10-01-3. As curvas em vermelho representam o aquecimento e as curvas em azul representam o resfriamento.



**Figura 4:** Diagramas Zijderveld de desmagnetização por campos magnéticos alternados dos espécimes (a) ECP01-09-1, (b) ECP01-09-2, (c) ECP01-10-1 e (d) ECP02-06-1.



Em suma, os resultados preliminares em tijolos do sítio ECP são promissores para determinação da paleoinclinação. Contudo, há necessidade de realização da desmagnetização térmica para obtenção do vetor primário da magnetização. Essa fase do trabalho ocorrerá posteriormente com medidas de desmagnetização térmica do conjunto de amostras selecionados para os estudos de paleoinclinação. As medidas de susceptibilidade magnética em altas temperaturas apresentaram um comportamento bastante distinto para as amostras estudadas até o momento. O comportamento irreversível das curvas de susceptibilidade não é adequado para medidas de paleointensidade devido a alteração magnetomineralógica durante os ciclos de aquecimento e resfriamento. Contudo, o estudo detalhado da mineralogia magnética será efetuado em todas as amostras de ambas as coleções com o objetivo de selecionar apenas aqueles fragmentos adequados para as determinações de paleointensidade.

## Referências

- Bloxham, J., Gubbins, D., Jackson, A., 1989. Geomagnetic Secular Variation. *Philos. Trans. R. Soc. London A*, 329, 415-502.
- Chapman, S., Bartels, J., 1940. *Geomagnetism*, vol I+II. University Press, Oxford.
- Donadini, F., Korte, M., Constable, C.G., 2009. Geomagnetic field for 0 – 3ka: 1. New data sets for global modeling. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, 6, Q06007.
- Dutra, M. L., Associados, Junho 2011, Museu do Açúcar e do Alcool, Projeto Executivo de Restauro, Relatório para pesquisa arqueológica, 2011
- Gallet, Y., Genevey, A., Le Goff, M., Warmé, N., Gran-Aymerich, J., Lefèvre, A., 2009. On the use of archeology in geomagnetism, and vice-versa: Recent developments in archeomagnetism. *C. R. Physique*, 10, 630-648.
- Genevey, A., Gallet, Y., Constable, C.G., Korte, M., Hulot, G., 2008. ArcheoInt: An upgrated compilation of geomagnetic field intensity data for the past ten millennia and its application to the recovery of the past dipole moment. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, 4, Q04038.
- Hartmann, G.A., Genevey, A., Gallet, Y., Trindade, R.I.F., Etchevarne, C., Le Goff, M., Afonso, M.C., 2010. Archeointensity in Northeast Brazil over the past five centuries. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 296, 340-352.
- Hartmann, G.A., Genevey, A., Gallet, Y., Trindade, R.I.F., Le Goff, M., Najjar, R., Etchevarne, C., Afonso, M.C., 2011. New archeointensity data from Brazil: Evidence for a large regional non-dipole field contribution over the past few centuries. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 306, 66-76.
- Hartmann, G.A., Pacca, I.G., 2009. Time evolution of the South Atlantic Magnetic Anomaly. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, 81, 243-255.
- Hulot, G., Finlay, C.C., Constable, C.G., Olsen, N., Mandea, M., 2010. The Magnetic Field of Planet Earth. *Space Sci. Rev.*
- Jackson, A., Jonkers, A.R.T., Walker, M., 2000. Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records. *Philos. Trans. R. Soc. London A*, 358, 957-990.
- Jonkers, A.R.T., Jackson, A., Murray, A., 2003. Four Centuries of Geomagnetic Data from Historical Records, *Rev. Geophys.*, 41, 2.
- Kirschink, J.L., 1980. The least-squares line and plane and analysis of paleomagnetic data. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 62, 699-718.
- Korte, M., Donadini, F., Constable, C.G., 2009. Geomagnetic field for 0 – 3ka: 2. A new series of time-varying global models. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, 6, Q06008.
- Merrill, R.T., McElhinny, M.W., McFadden, P.L., 1998. *The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle*. International Geophysics Series, vol 63, Academic Press.
- Zijderveld, J.D.A., 1967. AC demagnetization of rocks. In: *Methods in Paleomagnetism* (D. W. Collinson, K. M. Creer and S. K. Runcorn, eds.), p. 256-286, Elsevier, New York.