



A Geodinâmica e o campo magnético terrestre, sua origem, manutenção, inversão de pólos e enfraquecimento gradativo

José Manuel Fernandes Moça

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

It is shown that the magnetic field can be explained by the geodynamics resulting from the slow but steady recovery of the Earth's sphericity lost in a planetary collision about 600 million years ago (MA), when it then became almost conical in appearance after having lost the most of its mass, its crust and its water, becoming a much smaller planet. The mass cone was composed of the remaining concentric spherical shells of the mantle. The recovery of sphericity is due to the movement of all the layers of the interior of the Earth towards the Pacific region, the place of the collision and also where the tip of the cone whose base was opposite in the region of Pangea, set of pieces of the crust that was not sent to outer space. The tip of the cone sank towards the new center of gravity as it was denser and was being covered by the less dense layers. The part of the mantle that did not get escape velocity fell on the remaining crust, the Pangea, including the ores that began to compose the randomly distributed deposits and sank in the ice-cold and salty global ocean about 9 km deep that was draining to the upper part of the mantle and that resulted in Pantalassa. The magnetic field was formed, continuous to the collision, by the concave layer of Iron that generated a concave magnet and that was many more intense than the current one; The magnetic field is maintained by the movement of iron in the attempt that this layer will have the same thickness in any region of the planet and currently moves horizontally just like all other layers of the mantle; The inversions of the poles were the result of the various deformations of the magnet at different times due to the dipping of the denser elements that the iron, which were at the tip of the cone and also those that had moved by lateral slip to other positions of the cone, to the next point of the new center of gravity, to occupy its relative position by gravimetric segregation and crossed the sphere of Iron; The gradual weakening of the magnetic field is due to the continuous recovery of the thickness of the Iron layer that accompanies the recovery of the sphericity of the planet. The layers of the mantle, such as concentric spheres, including that of Iron, slide to remain the same thickness at all points on the sphere. This process though it has started 600 MA ago, has not yet finished due to the tiny difference in density between the nearest layers, a proton and a neutron, on average. The energy that moves such large masses is the gravitational potential energy.

Introdução

O objetivo deste trabalho é descrever a Geodinâmica e sua relação direta com o Campo Magnético Terrestre.

Há muito vem sendo aceito que o campo magnético é resultado de fenômenos que ocorrem no núcleo e estariam afetando o ferro existente no manto, mas faltava descobrir a causa da Geodinâmica, que provoca o Tectonismo e Vulcanismo globais e estava sendo buscada desde 1878 no primeiro Congresso Internacional de Geologia, em Paris.

Para entender o campo magnético terrestre é necessário a compreensão da Geodinâmica. Isto preencherá um imenso buraco no conhecimento humano sobre nosso planeta, pois estamos investindo gigantescos esforços na exploração de outros astros para compreender o que está debaixo de nossos pés.

A compreensão do campo geomagnético ou magnetosfera é de suma importância e urge sua compreensão porque seu enfraquecimento é notório e foi constatado que ele vem diminuindo em cerca de 0,05% ao ano e é estimado que seja nulo próximo ao ano 4.000, um tempo demasiadamente curto e crucial para a espécie humana, pois se pensa ser possível ocorrer uma inversão dos pólos ou sua nulidade e isto gera preocupações e perguntas sobre como isto poderia nos afetar. Isto porque ele forma um escudo protetor contra a perigosa radiação cósmica.

A origem do campo magnético terrestre vem permanecendo como inatingível ou como um dos grandes problemas não resolvidos que desafiavam os físicos modernos. O problema conseguiu atravessar, incólume, a idade de ouro da física (1920-1970) e continuava tal como uma bandeira hasteada muito alto. Muitos estudos vêm sendo feitos baseados nas medições históricas do campo magnético da Terra tais como no Paleomagnetismo. Nos últimos anos, o acompanhamento do campo magnético da Terra tornou-se importante para compreender as tempestades magnéticas, ou períodos de tempo em que o campo é extraordinariamente ativa, são causadas pela interação dinâmica do campo magnético da Terra com o Sol. Consequentemente, a ciência do geomagnetismo é mais importante hoje do que em qualquer momento da história, pois dependemos de muitos sistemas tecnológicos.

Pensa-se que o núcleo da Terra não gira em sincronia com a rotação para explicar o campo magnético. A hipótese mais aceita, atualmente, é que essa força vem do dínamo da Terra – a teoria do geodínamo, segundo a qual existe um fluido eletricamente condutor em constante movimento no núcleo externo, mas não se sabe como se formou, porque houve as inversões dos pólos e porque está enfraquecendo gradativamente. Também, busca-se compreendê-lo estudando outros astros como Marte para descobrir a razão da existência

do geodínamo, por exemplo, onde não há sinal dele, mas há na superfície rochas que fazem pensar que ele já existiu.

Foi constatado que o campo magnético terrestre tem sofrido inversões, durante os últimos 200 MA, sem um padrão de repetição, mas não se sabe por que isto ocorre. Nos tempos mais recentes, essa reversão tem ocorrido a cada 200.000 a 300.000 anos. No entanto a última inversão ocorreu há 780.000 anos e não se sabe ainda a razão disto.

Revisão teórica

Na investigação, em relação à Geodinâmica, foi verificado que as hipóteses *Ad hoc* “Mantle Plumes” e “Hotspots”, que vêm servindo, durante os últimos 50 anos, de referencial teórico para a Tectônica de Placas e que tentam explicar a Geodinâmica, incluindo o desaparecimento da maior parte da crosta continental no volume de 16,56 bilhões de km³ (360 milhões de km² x 46 km de espessura, massa esta com 2,8 t/m³ que teria que estar flutuando no manto de 3,3 t/m³. Estas hipóteses não se sustentam, pois não levam em conta que a superfície dos líquidos, por ação da gravidade, permanecem planos mesmo sendo adicionado calor a eles, pois só gases sobem além da superfície quando o líquido atinge o ponto de ebulição, não podendo-lhes, assim, ser atribuída qualquer ação sobre a crosta, ou dinâmica externa, nem levantar magma através dos vulcões do Hawaii que para isto precisam de pressão superior a 33.000 t/m² (10.000 m X 3,3 t/m³ de densidade), acima do leito oceânico. Além disto, elas foram desenvolvidas sem o cuidado de levar em conta que correntes convectivas são próprias de meios homogêneos e que o manto da Terra é heterogêneo, pois é formado de esferas concêntricas de elementos cada vez mais densos no sentido do centro do planeta sendo a mais exterior a de magnésio, que compõe o basalto, a parte superior do manto e o urânio o mais interior. A espessa esfera de ferro fica em uma posição intermediária.

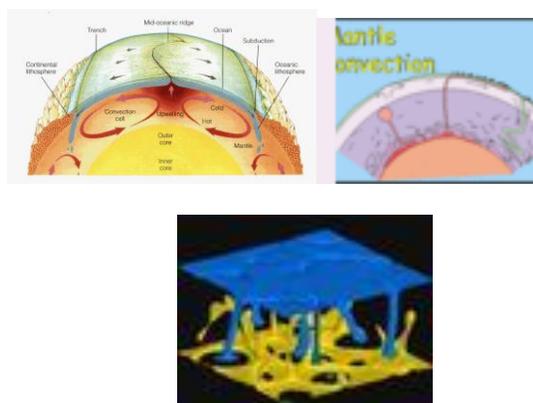


Figura 1: Três Exemplos de interpretação de Mantle Plumes e Hotspots

A Figura 1 tem três ilustrações onde constatamos a incongruência entre elas e assim a dificuldade de se usar estas duas hipóteses para explicar a Geodinâmica

interna e externa visto que a interpretação de cada um difere em muito da de outro.

O conhecimento de que a parte superior de elementos em estado de fusão permanece plana foi usado para criar o vidro *float* nos anos 50, para a fabricação de vidro plano de alta qualidade por não possuir quase nenhuma distorção óptica porque o vidro em estado de fusão flutua no estanho, que é mais denso e que também está em estado de fusão e se espalha uniformemente sobre este resultando em um vidro quase perfeito.

O manto da Terra está em estado de fusão, com a parte superior perto de 1400° C. Na formação da crosta dos planetas rochosos massa sai do manto, por ebulição, pelos furos de grande diâmetro conhecidos por vulcões caldeiras. Por mais que adicionemos calor a um material em estado de fusão não se observa subida de líquido acima da superfície, mas somente se observa a subida de gases quando o material atinge o ponto de ebulição. Isto é suficiente para descartar estas duas hipóteses *Ad hoc*, a “Mantle Plumes” e “Hotspots” como sendo as causas da Geodinâmica.

A teoria mais recente sobre o campo magnético terrestre é a do Geodínamo segundo a qual o núcleo estaria girando em uma velocidade diferente do restante do manto produzindo, assim, um campo magnético. Sobre isto, devemos considerar que o coeficiente de atrito líquido-líquido é pequeno, mas não deixa de existir. Isto significa que teria que existir uma fonte de energia para produzir este atrito constante e teria que haver um ponto de aplicação da força tangencialmente para fazer o núcleo girar continuamente com uma velocidade angular diferente do restante do planeta e isto não há como fazê-lo, pois se trata de uma esfera. Assim, esta não é a solução. O que então estaria produzindo este necessário atrito e qual sua constante fonte de energia?

Metodologia

O método utilizado neste trabalho foi o indutivo. Foi consequência de observações e de indagações ocasionais sobre o estado traumático da crosta continental tais como a ausência da maior parte dela e o deslocamento radial dos continentes no sentido do centro do Pacífico, à luz das leis da Física e da Química e ao acompanhar os avanços da ciência e que resultaram em um *insight*, em 2004, que me levou a concluir que isto só poderia ocorrer se o planeta não fosse perfeitamente esférico e que uma grande depressão associada à perda de massa, incluindo a maior parte da crosta, devido a uma provável colisão com outro planeta, explicaria tanto a ausência de 70% da crosta original, da superfície atual, e o deslocamento radial dos continentes, por deslizamento ou escorregamento utilizando a energia potencial gravitacional, quanto a fratura paulatina das placas que restaram para se adaptarem, através de fraturas, a um astro, agora, de menor massa e, conseqüentemente, de menor raio e curvatura mais acentuada, explicando, assim também, a existência das milhões de falhas na crosta, dos grandes canyons, de tão extensas e profundas cavernas e das montanhas ou orogênese. A perda de crosta e de massa de um planeta só pode ocorrer devido a uma colisão com outro planeta.

Imediata e conseqüente investigação serviu para procurar evidências para testar e apoiar ou refutar a idéia principal da colisão planetária. A análise serviu para descobrir e encaixar as peças do grande quebra-cabeça. A existência de um processo de recuperação da esfericidade através da segregação gravimétrica e a conseqüente adaptação gradativa da crosta levou a crosta, cujas placas são convexas, a fraturarem pelo processo de alavanca do tipo interfixa e deixar passar o magma que atuava no fulcro e que resultou no levantamento das montanhas em épocas diversas e sustentou a pressão, de dezenas de milhares de toneladas por m², até a solidificação e também produziu extensos canyons e cavernas. Devido à perda da maior parte da crosta a água remanescente entrou em contato com o manto com temperatura a partir dos 1400°C mudando drasticamente de planeta gelado para envolto em vapor em um ambiente completamente elétrico, por dezenas de MA, que somado à chuva de minérios originários do manto, alterou quimicamente o ambiente e provocou a Explosão do Cambriano.

A data de 600 MA foi extraída da Snowball Earth Theory (Hoffman, P.F. and Schrag, D.P., 1999), que defende que a Terra mudou de cobertura de neve para super-quente em tempo recorde, mas seus autores pensam que ocorreu um efeito estufa por liberação de CO₂ na atmosfera, ou seja, a energia seria a do Sol. Desconhecem, ainda, que o que elevou repentinamente a temperatura ambiente foi o contato direto da água, remanescente, com o manto a descoberto, por ausência da crosta enviada para o espaço exterior e a grande liberação de CO₂ na atmosfera foi conseqüência do violento aquecimento das águas. Esta é a peça que estava faltando e que a impediu de ser reconhecida.

Na procura pelo planeta envolvido, se ainda estivesse em órbita, deduzi que ele teria órbita interna por ter colidido quando se dirigia para o afélio, o ponto mais distante de sua órbita, pois se fosse o contrário, ou seja, quando se dirigia para o periélio teria empurrado a Terra para uma queda no Sol. Ao procurar por imagens do planeta mais provável, Vênus, nos sites da NASA, descobri a área que estava procurando; linhas paralelas de atrito cruzando, em 90°, linhas paralelas de fraturas em Lakshmi Region seguida de uma área de linhas concêntricas de fraturas devido ao impacto e mergulho no manto da Terra em Aphrodite Terra e também que está com 80% de sua superfície coberta com lava solidificada, predominantemente composta de basalto, obtida da parte superior do manto da Terra.

Resultados

A Geodinâmica interna da Terra é resultante da constante, mas lenta recuperação da esfericidade da Terra perdida em uma colisão planetária com Vênus há 600 MA (Fernandes-Môça, J,M, 2008). O planeta quer voltar a ser uma esfera, o menor estado de energia potencial e de maior estabilidade. Afinal, a gravidade reivindica a totalidade. Este processo embora tenha se iniciado há 600 MA ainda não terminou devido à diferença ínfima de densidade entre as camadas mais próximas, um próton e um nêutron, em média. A energia que move tão grandes massas é a energia potencial gravitacional.

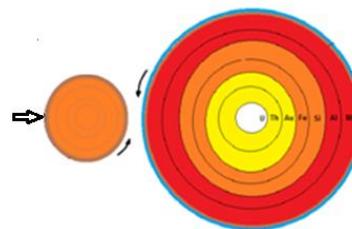


Figura 2: Iminente colisão planetária de Vênus com a Terra no cruzamento de suas órbitas quando Vênus se dirigia para seu afélio, em órbita de alta excentricidade e conseqüentemente altíssima velocidade. Um gelado e profundo oceano global cobria todo o planeta Terra.

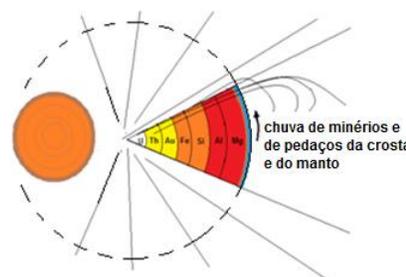


Figura 3: A massa que sobrou da Terra tinha aspecto quase cônico. Metais e outras matérias caíram sobre os pedaços da crosta remanescente, o Pangea, por não conseguirem velocidade de escape.

Massa orgânica, composta de bactérias, protozoários e microalgas, se espalhou pelo Sistema Solar. Vênus não foi desintegrado porque além de ter espessura de crosta próximo de 100 km tem uma curvatura mais acentuada, devido ao raio menor, que lhe conferia uma dureza relativa maior, no entanto está cheio de rachaduras e muitas outras evidências de que se envolveu em uma colisão planetária.

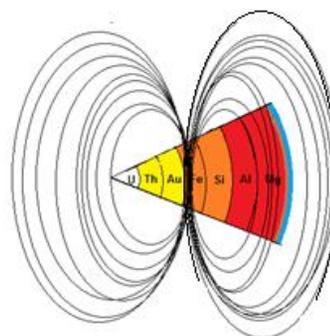


Figura 4: O campo magnético foi instantaneamente formado pela calota de Ferro, o ímã inicial. O mergulho de massas mais densas através da camada de ferro, no sentido do novo centro de gravidade, alterou o formato do ímã muitas vezes e resultou nas inversões de pólos.

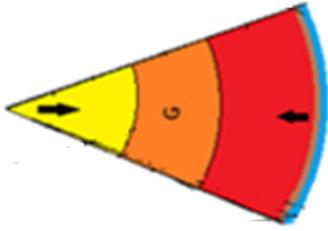


Figura 5: A Terra há 600 MA, após perder um volume de massa varias vezes a atual. A massa perdida espalhou-se como asteróides e cometas pelo Sistema Solar. Os que não conseguiram velocidade orbital caíram no Sol.

Como o formato cônico, da massa remanescente, é o formato mais provável devido ao astro ser esférico e essencialmente líquido e heterogêneo, a altura do cone, que era o raio do planeta antes da colisão, pode ser obtida a partir do volume atual e da superfície da base do cone que compunha o Pangea. Com a altura do cone como raio da esfera, pode-se obter o volume anterior da Terra ou da Super-Terra.

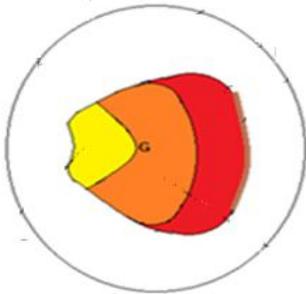


Figura 6: Grande parte da água ficou em estado de vapor devido ao contato direto com o manto a descoberto e gerou intensas descargas por dezenas de milhões de anos que resultou na Explosão do Cambriano. As massas mais densas iniciaram o mergulho no manto no sentido do novo centro de gravidade e as menos densas iniciaram o movimento de cobertura que continua até hoje.

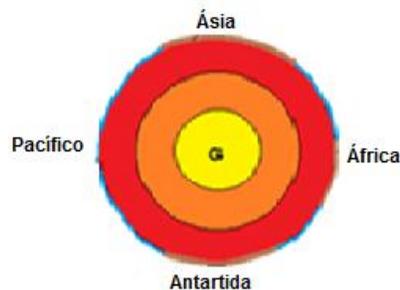


Figura 7: A Terra, o que restou da Super-Terra, já com a esfericidade quase toda recuperada, após 600 MA. A demora é resultante da diferença de um próton e um nêutron, em média, entre os elementos mais próximos.

O aporte de massa tende a terminar de preencher a grande depressão na região do Pacífico, tal como um suave vórtice, atualmente com o leito oceânico com próximo de 804 metros, em média, abaixo da profundidade média dos outros oceanos e mares que corresponde a uma massa equivalente a 133 milhões de km³ faltantes naquela região, ou seja, ali a distância do leito oceânico até o centro de gravidade é menor que no restante do planeta. No entanto, observa-se que o aporte de manto está gerando uma pressão superior a 33.000 t/m³ que levanta magma acima de 10.000 m do leito oceânico, próximo do Hawaii, ou 10 km abaixo da borda do vórtice, que caracteriza que o déficit naquela região é imensamente maior e poderá vir a ser calculado.

O deslocamento de massa para a região do Pacífico, evidenciado na saída ininterrupta de magna nos vulcões do Hawaii, vai acentuando a esfericidade e além de suspender, alternadamente, as placas oceânicas, que provoca tsunamis por terem suspenso água acima do leito oceânico e que é escoada radialmente. Este deslocamento de manto também diminui a sustentação das placas em outras regiões consideradas assísmicas provocando a sismicidade intraplaca e altera o nível de magma nos vulcões, que às vezes atuam como válvula de alívio, evitando alguns terremotos ou aumento de magnitude de outros.

O escorregamento das placas continentais esmagam a resistência das placas oceânicas, resultantes da solidificação do manto, e causam dobras conhecidas como fossas oceânicas. Há 600 MA tinham espessura zero e há 200 milhões de anos tinham 2/3 da espessura atual que é próximo de 5 km e que são cerca de 1/9 da espessura das continentais. O escorregamento é facilitado pela subida paulatina do leito do Pacífico.

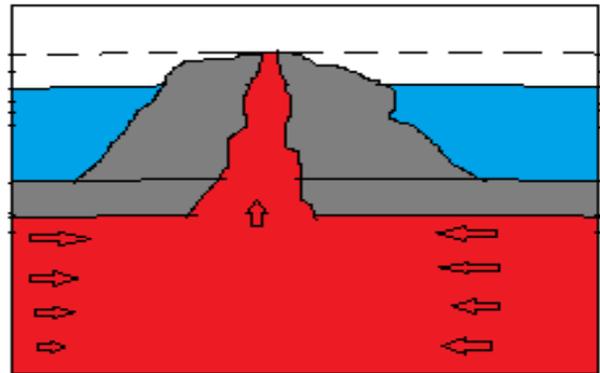


Figura 8: Vulcão do Hawaii. O deslocamento horizontal e contínuo de massa para a região do Pacífico causa, na parte inferior da crosta oceânica, uma pressão superior a 33.000 t/m² que mantém o fluxo de lava. O magma sobe até a linha ideal e temporária (pontilhada) do manto na região. O aporte de massa alternadamente suspende placas oceânicas que causam tsunamis. O sistema de vulcões da região do Hawaii é resultante de uma extensa fratura na crosta.

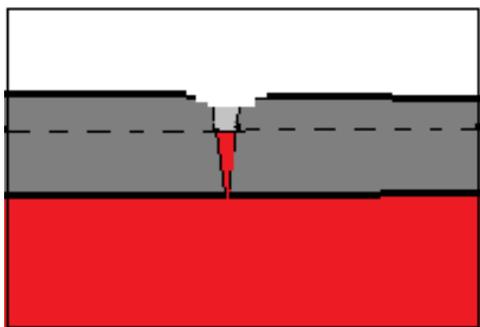


Figura 9: A crosta fratura devido a adaptação da crosta a uma curvatura mais acentuada de um planeta agora de menor raio e causa canyons. A massa erodida do canyon cai gradativamente na fenda. Os 4.168 km³ de massa erodida do Grand Canyon estão, ali, na própria fenda.

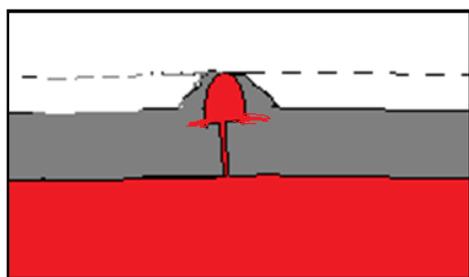


Figura 10: Formação de um batólito. Exemplo de processo que atuou na Orogênese suspendendo e/ou fraturando o material existente e adicionando outros de diferentes constituições em camadas.

A pressão era mantida e ocorria a solidificação. O magma sobe até o nível ideal (pontilhada), da curvatura do manto do momento. Quando o magma sobe além do solo que o formata lateralmente ele transborda ou fica plano na parte superior quando coincidem as alturas.

Devido à rigidez e espessura, as placas não conseguem acompanhar a curvatura dinâmica do manto e comportam-se como faces de um poliedro irregular. Vulcões são fissuras não consolidadas e são ativados sempre que o manto tiver acentuação de sua curvatura na região ou quando ocorre descida da crosta por falta de sustentação nos casos que resultam em sismicidade intraplaca. Vulcões atuam como válvulas de alívio evitando o aumento da magnitude dos terremotos ou adiando-os. Nas datações de intrusões magmáticas deverá ser levado em conta que o magma atravessa mais de 40 km de crosta e arranca, no caminho, cristais de camadas formadas em épocas anteriores caracterizando contaminação por cristais antigos e induzindo a erro.

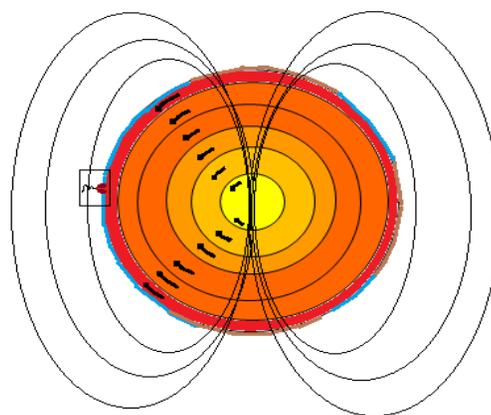


Figura 11: O movimento horizontal e contínuo de parte da camada ou esfera de Ferro gera o atrito que mantém o campo magnético da Terra. Não há diferença de velocidade angular entre as esferas.

A Magnetita é resultante da queda do ferro originário do manto tal como os outros minérios, com alta temperatura, sobre o oceano gelado, em processo de escoamento. Como a formação do campo magnético foi imediata, o ferro esfriou sob a ação de um campo magnético que fixou a orientação das linhas magnéticas.

Houve várias inversões no intervalo de 400 MA, quando o manto da Terra estava ainda com o formato abaulado, entre os 600 MA quando da existência da Pangea e os 200 MA quando começaram os movimentos radiais das placas da crosta no sentido do centro do Pacífico, mas não ficaram registrados porque o registro é feito, quando o ferro erodido e originário dos depósitos na parte superior da crosta entra em contato com o magma e este esfria após ter subido até o leito oceânico no momento da separação das placas continentais.

Conclusões e previsões

A geodinâmica é resultante da lenta, mas constante recuperação da esfericidade da Terra perdida em uma colisão planetária com Vênus há cerca de 600 MA quando então, ato contínuo, ficou com um aspecto quase cônico após ter perdido a maior parte de sua massa, de sua crosta e de sua água, tornando-se um planeta bem menor. A massa remanescente ficou compondo um cone de calotas esféricas concêntricas formadas pelos elementos de densidades diversas onde a calota de Ferro formava o ímã do inicial e forte campo magnético. A recuperação do formato esférico é exercida atualmente pela movimentação, horizontal, de suas camadas concêntricas de elementos no sentido do centro da região do Pacífico, o local da colisão e onde ficava a ponta do cone e a base dele ficava, opostamente, na região da Pangea, formada pelos pedaços remanescentes da crosta original que não foram enviados para o espaço exterior.

No processo de recuperação da esfericidade, ao recompor o sistema de esferas concêntricas, através da segregação gravimétrica, o deslocamento de massa para a região do Pacífico suspende alternadamente as placas oceânicas que conseqüentemente levantam a água, acima do nível normal do oceano, que é escoada

radialmente e isto causa os tsunamis. Isto além de acentuar a esfericidade do planeta também diminui a sustentação da crosta em todas as regiões que provoca os ajustes necessários que resultam no incessante tectonismo e vulcanismo globais.

O campo magnético terrestre tem uma relação direta com geodinâmica interna que é devido à lenta, mas constante recuperação da esfericidade da Terra.

1) O campo magnético inicial foi formado, ato contínuo à colisão planetária, pela camada côncava de Ferro remanescente que gerou um ímã côncavo e que era muitas vezes mais intenso que o atual.

2) O campo magnético é mantido pelo movimento de fina camada de ferro originária de um local com grande espessura de qualquer região do planeta para o local de menor espessura, a região do Pacífico, e isto gera o atrito tão procurado. Ela se movimenta tal como todas as outras camadas do manto no sentido do centro do Pacífico na tentativa de que esta camada venha a ter a mesma espessura em toda a esfera tal como antes da colisão.

3) As inversões dos pólos foram resultado das deformações do ímã que partiu do formato côncavo para o esférico. As deformações foram resultado do mergulho dos elementos mais densos que o Ferro que formavam a ponta do cone de massa remanescente e atravessavam a camada de Ferro, por diferentes locais e em tempos diversos no sentido do novo centro de gravidade, buscando sua posição relativa, por segregação gravimétrica.

4) O enfraquecimento gradativo do campo magnético é devido à contínua recuperação da espessura da camada de Ferro que faz com que o avanço seja feito por uma camada cada vez mais fina.

Uma das previsões é que quando a camada de ferro estiver com igual espessura em todas as regiões do planeta, não mais haverá deslocamento de massa na camada de ferro e o campo magnético se extinguirá. No entanto, à medida que a esfericidade do manto da Terra vai se acentuando, a taxa de diminuição gradativa do campo magnético irá ficando cada vez menor, pois o ritmo ou taxa de recuperação da esfericidade tenderá a diminuir, alongando o tempo, em função da diminuição relativa do déficit de massa na região do Pacífico, que significa que o momento da anulação do campo magnético está mais longe do que se pensa atualmente e assim o temor de que ele se extinguirá em 2.000 anos não tem sentido de existir.

Não é possível prever a ocorrência de terremotos, mas é possível prever que ocorrerão trilhões de terremotos e isto é muito importante, pois este conhecimento precisa ser usado para a formulação de políticas públicas para edificações incluindo barragens, pontes, oleodutos, para minimizar o sofrimento das populações e de danos ao patrimônio público.

Agradecimentos:

Agradeço à SBGf pela oportunidade histórica de expor para todos a causa da Geodinâmica e do Campo Magnético Terrestre.

Referências:

Fernandes-Môça, J,M, 2008, “Quando Vênus Colidiu com a Terra – O extraordinário evento ocorrido há 600 milhões de anos que mudou a história da Terra”, José Manuel Fernandes Moça, Rio de Janeiro, ISBN 978859089-6, 250 p.

Fernandes-Moça, J,M, “Vênus colidiu com a Terra há 600 Milhões de anos” , disponível no URL: www.venusterra.com.br

Gary A. Glatzmaier, “What causes the periodic reversals of the earth's magnetic field? Have there been any successful attempts to model the phenomenon?”, Scientific American , disponível no URL: <http://www.scientificamerican.com/article/what-causes-the-periodic/>

Hoffman, P.F. and Schrag, D.P., 1999, Response: Considering a Neoproterozoic Snowball Earth, Science, disponível no URL: <http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/284/5417/1087a>

John McDaris, Mantle Plumes and Convection Visualizations, disponível no URL: http://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/deepearth/visualizations/mantle_conv.html

Paul H. Roberts and Gary A. Glatzmaier, Geodynamo theory and simulations, REVIEWS OF MODERN PHYSICS, Rev. Mod. Phys. 72, 1081 – Published 1 October 2000, American Physical Society, disponível no URL: <http://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.72.1081>.