



## Petrofísica de Minério de Ferro

Lima, P.H.A.<sup>1</sup>; Soares, J.A.<sup>1</sup>; Rosa, I.B.C.<sup>2</sup>; Carvalho, R.F.<sup>2</sup>; Braga, M.A.<sup>2</sup>; Silva, M.D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Campina Grande, <sup>2</sup> Vale S.A.

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13<sup>th</sup> 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.

### Resumo

Este trabalho apresenta propriedades petrofísicas medidas em rochas de minério de ferro oriundas da Província Mineral de Carajás, localizada no sudeste do estado do Pará. As propriedades analisadas neste trabalho são a porosidade, a densidade de grãos, a densidade total, as velocidades e os correspondentes módulos elásticos. Os resultados alcançados mostram que os vários litotipos analisados podem ser discriminados em termos do teor de ferro pela sua densidade de grãos, e em termos do seu grau de compactação por suas velocidades e módulos elásticos. Adicionalmente mostra-se que o decréscimo das velocidades elásticas - e conseqüentemente dos módulos elásticos - com o aumento da porosidade ocorre a uma taxa maior para os litotipos ricos em ferro do que para os litotipos estéreis.

### Área de estudo

As amostras de rocha analisadas neste trabalho têm origem na reserva de minério de ferro de Serra Sul, pertencente à Província Mineral de Carajás, situada no sudeste do estado do Pará, Brasil. A Figura 1 indica a localização da área de proveniência das amostras analisadas neste trabalho.

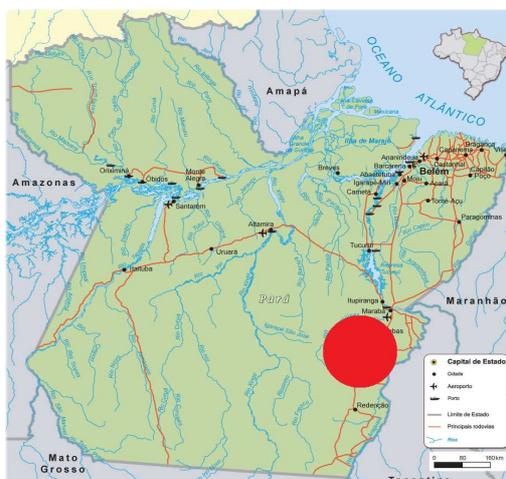


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.

### Aspectos Geológicos

A Província Mineral de Carajás é constituída por rochas pré-cambrianas recobertas em grande parte por cangas, que são formações superficiais derivadas da alteração supergênica daquelas rochas. A jazida de minério de ferro de Serra Sul, alvo desta pesquisa, localiza-se na porção sudeste do estado do Pará, Brasil, num *trend* de 28 km de comprimento por cerca de um quilômetro de largura e profundidade conhecida de 600 metros. Contém principalmente rochas correlacionadas ao Grupo Grão Pará, que é composto, da base para o topo, pelas Formações Parauapebas, Carajás e Igarapé Cigarra. Serra Sul possui litologias mineralizadas (formações ferríferas) e rochas encaixantes, sendo as cangas consideradas rochas com mineralização de baixo teor, e as rochas máficas das formações Parauapebas e Igarapé Cigarra, sendo as encaixantes estéreis. Estas rochas podem estar decompostas ou não, recebendo denominação de máfica decomposta e máfica sã, respectivamente. As litologias mineralizadas que ocorrem na jazida são os jaspelitos, canga de minério, hematita compacta e hematita friável, sendo as duas últimas as que possuem maior concentração de ferro.

### Litologias analisadas

Os litotipos analisados neste trabalho são os principais que ocorrem em Serra Sul, sendo classificados em três grupos, de acordo com o teor de ferro: minério rico, minério pobre e estéril.

Dentre as rochas que compõem o grupo de minério rico foram estudadas:

Hematita friável (HF): formada predominantemente pelo enriquecimento supergênico dos jaspelitos. É o tipo mais encontrado nos furos de sonda e galerias, não sendo aflorante na região. Predominantemente composta por hematita com massas irregulares de magnetita, goethita e limonita provenientes do protominério jaspelítico. Os corpos de hematita friável ocorrem desde próximos à superfície atingindo profundidades superiores a 450 metros. Apresentam teores médios de Fe em torno de 66,5%.

Hematita Compacta (HC): ocorre na forma de lentes e/ou bandas intercaladas aos jaspelitos de forma concordante. Podem ocorrer em profundidade sob a forma de lentes pouco espessas e isoladas. A espessura dos corpos varia de poucos metros a até 30 metros e o teor médio de Fe é de 66%.

Já as rochas estudadas que compõem o grupo de minério pobre são:

Jaspelito (JP): São formações ferríferas bandadas compostas pela alternância entre bandas e lâminas de jaspelito/silica e bandas de hematita. Ocorrem sob a forma

de lentes imersas na grande massa de hematitas friáveis ou na base das formações ferríferas em contato com as rochas máficas. Os teores médios de Fe giram em torno de 41%, contendo aproximadamente 60% de partículas acima de 8 milímetros.

Canga de minério (CM): rocha de natureza detrítica gerada pela erosão da formação ferrífera, recobre grande extensão da área de Serra Sul. A espessura média gira em torno de 20 metros podendo atingir 40 metros. O teor médio de Fe é de 58,6%.

E por fim as litologias consideradas estéreis:

Máfica decomposta (MD) e máfica sã (MS): são litologias encontradas nos furos de sondagem representadas por rochas máficas encaixantes das formações ferríferas.

### Metodologia

Este trabalho é resultado da análise das propriedades físicas de 19 amostras de minério de ferro e rochas encaixantes, incluindo hematitas, jaspelitos, cangas e rochas máficas. As amostras estudadas foram encaminhadas ao laboratório em forma de testemunhos de sondagem com diâmetro aproximado de 55 milímetros, no caso de amostras consolidadas, e em pacotes com cerca de um quilograma de material inconsolidado, no caso de amostras friáveis. Para a realização das análises petrofísicas as amostras foram previamente preparadas reduzindo o seu diâmetro para 1,5 polegadas, no caso das amostras compactas. Para as amostras friáveis foi necessário montar os plugues com o auxílio de moldes de alumínio no formato cilíndrico com dimensões adequadas.

### Preparação de plugues

Para a preparação dos plugues de amostras compactas foram utilizados equipamentos tais como serra (figura 2a), plugadeira de bancada (figura 2b) - usada para obter plugues no diâmetro adequado - e retificadora de plugues (figura 2c) utilizada no acabamento final das extremidades das amostras. Os plugues assim produzidos são cilindros de rocha com diâmetro de 1,5 polegadas e aproximadamente cinco centímetros de comprimento, possuindo extremidades na forma de faces planas e paralelas. As extremidades dos plugues de rocha recebem este acabamento a fim de atingir o perfeito acoplamento dos plugues aos cabeçotes metálicos dos equipamentos de análise. Na câmara de propagação de ondas elásticas evita-se assim a ocorrência de perda de amplitude das ondas causada por acoplamento irregular. Já no permoporosímetro um bom acabamento dos plugues é necessário para medições precisas de volume de poros e, por consequência, da porosidade e da densidade de grãos.

Em virtude da inconsistência do material friável, estes plugues são obtidos pela introdução do material inconsolidado em um molde cilíndrico construído com folhas de alumínio e em cujas extremidades são colocadas telas aramadas finas, conforme apresentado na Figura 3. O uso das telas aramadas nas extremidades das amostras se justifica pela necessidade

de passagem do gás usado pelo permoporosímetro nos ensaios de porosidade.



Figura 2 - (a) serra; (b) plugadeira de bancada; (c) retificadora de plugues.



Figura 3 – Exemplo de preparação de plugue de material friável.

Após o preparo, os plugues são submetidos à secagem em estufa a uma temperatura de 80°C por 24 horas, pesados em uma balança eletrônica semi-analítica e, em seguida, medidos o comprimento e o diâmetro com paquímetro digital.

### Ensaio Laboratoriais

As medições de porosidade foram realizadas no permoporosímetro a gás Ultraporper500® (Figura 4a) com o auxílio de um *matrix cup* (Figura 4b). Este aparato permite estimar a porosidade, sob pressão ambiente, a partir da medição do volume de grãos da amostra.



Figura 4 - (a) Permoporosímetro a gás; (b) *matrix cup*.

O permoporosímetro injeta gás nitrogênio na amostra de rocha e, pela aplicação da lei de Boyle, mede o volume de grãos da amostra. A diferença entre o volume total da amostra e o volume de grãos medido corresponde ao volume de poros da amostra de rocha. A porosidade da amostra é determinada pela razão entre o volume de

poros e o volume total. Uma vez que a amostra se encontra seca, pode-se assumir que a massa de sua fase sólida corresponde à massa medida da amostra, sendo a densidade de grãos dada pela razão entre a massa da amostra e o seu volume de grãos. Com a porosidade e a densidade de grãos pode-se estimar a densidade total da rocha desprezando a densidade do ar que preenche os poros da rocha. Alternativamente pode-se calcular a densidade total simplesmente como a razão entre a massa e o volume total da amostra de rocha.

Os ensaios de propriedades elásticas foram realizados usando-se o equipamento Autolab500<sup>®</sup> que determina os valores de velocidades de propagação das ondas P e S pela medição do tempo de trânsito destas ao longo do comprimento axial dos plugues. Com este equipamento é possível realizar ensaios sob condições controladas de pressão confinante, de poros, temperatura e saturação fluida. Neste trabalho, a pressão de poros e a temperatura foram mantidas nos níveis do ambiente e a pressão confinante variou entre 5 MPa e 40 MPa, em passos de 5 MPa. Com os comprimentos e tempos de trânsito das amostras, as velocidades de propagação das ondas são obtidas pela divisão entre estes parâmetros.

A partir das velocidades de propagação das ondas e da densidade total dos plugues, são calculados os módulos elásticos, i.e., módulo de elasticidade (E), módulo de cisalhamento (G), incompressibilidade (K) e razão de Poisson ( $\nu$ ), de acordo com as equações apresentadas por diversos autores (BOURBIÉ *ET AL.*, 1987; SHERIFF, 1991; SOARES, 1992).

A fim de estabelecer relações entre as propriedades elásticas, medidas sob pressões de até 40 MPa, e a porosidade, medida sob pressão ambiente, a porosidade sob pressão de 40 MPa foi estimada. Para isto foi utilizada a incompressibilidade das amostras calculadas a partir das velocidades das ondas e da densidade total.

## Resultados

A Figura 5 mostra a comparação entre a densidade de grãos e a porosidade medidas. Os valores medidos nas amostras ricas em ferro (hematitas) são superiores a 4,5 g/cm<sup>3</sup>, enquanto que os medidos em amostras com menores teores de ferro (consideradas minério pobre) ficam em torno de 3,5 g/cm<sup>3</sup>. Por fim verifica-se que as amostras consideradas estereis apresentam densidade de grãos limitada a 3,0 g/cm<sup>3</sup>. Esta figura demonstra a capacidade da densidade de grãos em discriminar o tipo de rocha em termos do seu teor de ferro.

Observando a porosidade das amostras é possível perceber que as amostras compactas apresentam porosidades baixas, inferiores a 10%, e as friáveis apresentam porosidades bem maiores, acima de 30%.

As figuras 6, 7 e 8 apresentam as velocidades de propagação das ondas elásticas nas amostras sob pressão confinante de 40 MPa. A Figura 6 apresenta a velocidade da onda P em função da porosidade. Três linhas de tendência representam o comportamento das amostras de minério rico (linha cheia), de minério pobre (tracejado menor) e de rochas encaixantes (tracejado maior). Nas amostras compactas, as velocidades são

substancialmente superiores às apresentadas nas amostras friáveis. Em geral a velocidade de propagação decai com o aumento da porosidade, mas no minério rico este decréscimo é mais acentuado do que nos demais litotipos.

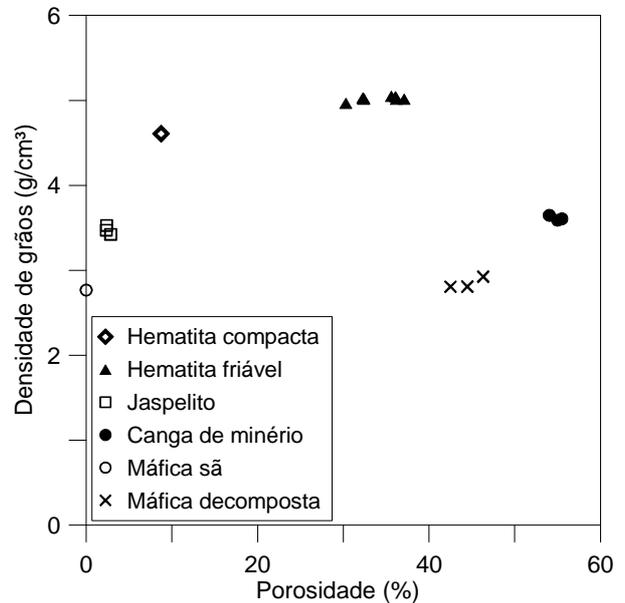


Figura 5 - Densidade de grãos versus porosidade.

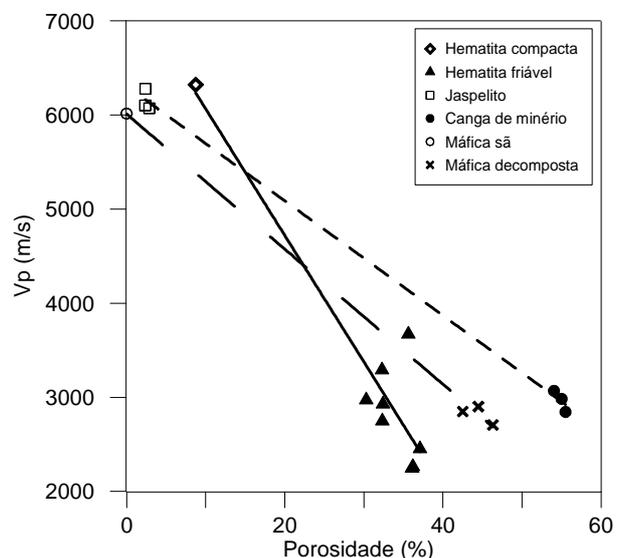
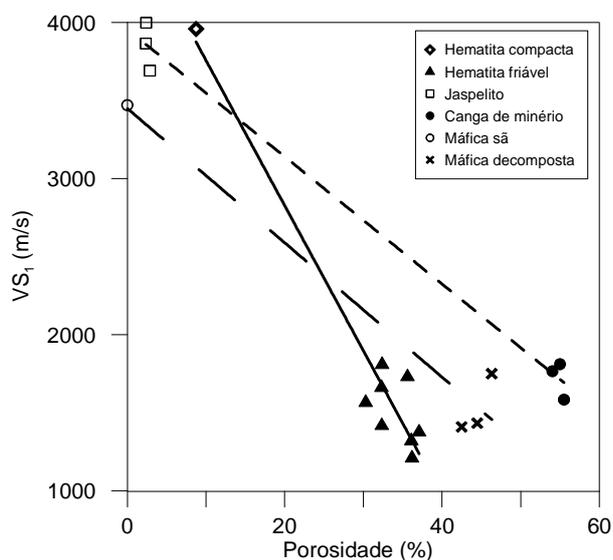


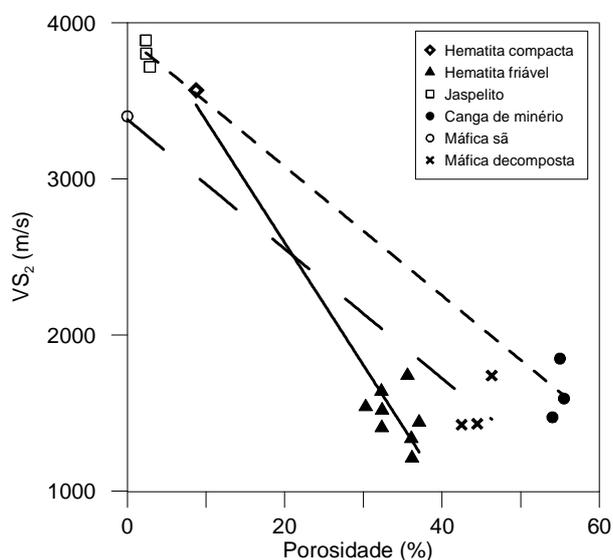
Figura 6 - Velocidade da onda P versus porosidade. Pressão confinante efetiva de 40 MPa.

Foram medidas as velocidades da onda S com duas direções de polarização mutuamente perpendiculares, chamadas de  $S_1$  e  $S_2$ . As Figuras 7 e 8 apresentam as velocidades dessas ondas, sob 40 MPa de pressão confinante efetiva, contra a porosidade. De modo semelhante à Figura 6 verifica-se a tendência de redução

da velocidade com o aumento da porosidade e que a taxa de decaimento das velocidades com a porosidade é maior para os litotipos ricos em ferro. Além disso, a velocidade da onda cisalhante ( $VS$ ) nas amostras compactas é mais que o dobro da mesma onda nas amostras friáveis. É importante ressaltar que a  $VS$  depende apenas do arcabouço mineral, sendo independente do fluido saturante.



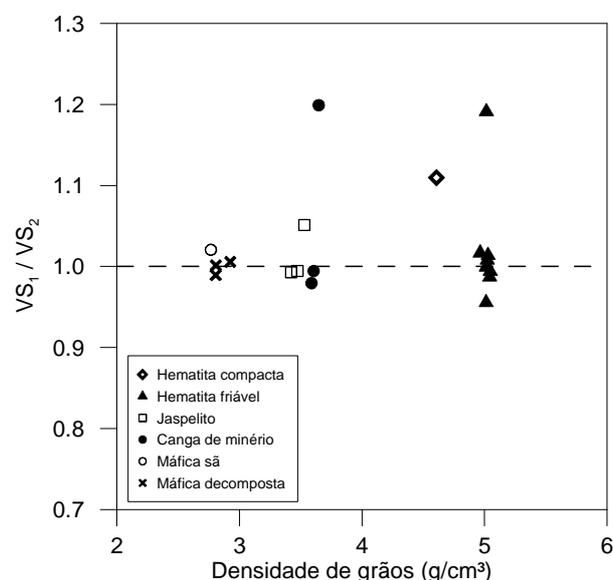
**Figura 7** - Velocidade da onda  $S_1$  versus porosidade. Pressão confinante efetiva de 40 MPa.



**Figura 8** - Velocidade da onda  $S_2$  versus porosidade. Pressão confinante efetiva de 40 MPa.

A Figura 9 apresenta os valores da razão entre as velocidades das ondas cisalhantes  $VS_1 / VS_2$  contra a densidade de grãos. Esta razão serve para indicar a ocorrência de anisotropia elástica. Quanto maior a anisotropia, mais esta razão se afasta da unidade, para

mais ou para menos. Conforme apresentado nesta figura, as amostras apresentam, em sua maioria, um comportamento isotrópico. Embora haja a necessidade de adensar estes resultados com um número maior de amostras analisadas, estes resultados preliminares indicam que as rochas encaixantes apresentam anisotropias inferiores a 5%, enquanto que as de minério, rico ou pobre, apresentam anisotropias limitadas a 20%.



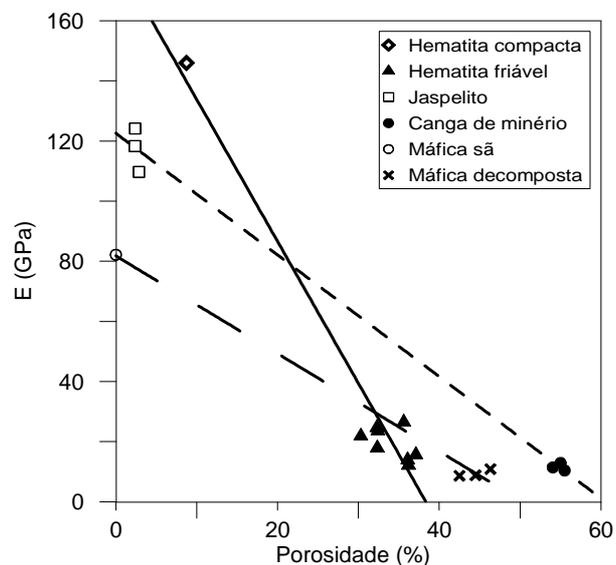
**Figura 9** - Razão  $VS_1/VS_2$  versus densidade de grãos. Pressão confinante efetiva de 40 MPa.

As figuras 10 a 12 apresentam as relações entre os módulos elásticos e a porosidade das amostras. Tais módulos são obtidos a partir das velocidades elásticas e da densidade total, conforme previsto na teoria geral da elasticidade linear para meios homogêneos e isotrópicos.

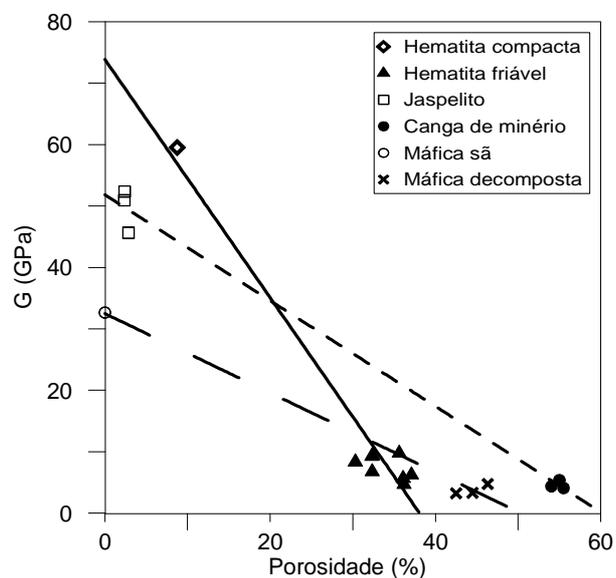
Para o módulo de Young ( $E$ ), Figura 10, nota-se uma tendência substancial de diminuição nos valores com o aumento da porosidade. Isto ocorre também por um efeito sobreposto do grau de compactação, de modo que as amostras compactas (e também de menor porosidade) apresentam valores de  $E$  muito maiores do que as friáveis (e de maior porosidade). As amostras friáveis apresentam valores de  $E$  entre 10 GPa e 30 GPa enquanto que compactas apresentam módulos de Young entre 80 GPa e 130 GPa. Esta grande diferença de módulos elásticos tem conseqüências importantes nos processos de perfuração e sondagem em termos de escolha de equipamentos, desgaste de coroas e taxa de avanço da sondagem. Por outro lado, sugere que os litotipos compactos e friáveis podem ser perfeitamente discriminados e mapeados, antes da perfuração, através da sísmica. De modo semelhante às velocidades elásticas, a taxa de redução do módulo de Young com a porosidade é maior para as amostras de minério rico do que para os demais litotipos.

Para o módulo de cisalhamento ( $G$ ) e a incompressibilidade ( $K$ ) é possível fazer analogia semelhante. Nas figuras 11 e 12 nota-se que existe

decréscimo dos valores desses módulos com o aumento da porosidade e com a redução do grau de compactação. As amostras compactas apresentam módulos de cisalhamento entre 30 GPa e 60 GPa e incompressibilidade entre 55 GPa e 90 GPa. Já as amostras friáveis apresentam módulos de cisalhamento abaixo de 10 GPa e incompressibilidade entre 5 GPa e 30 GPa.

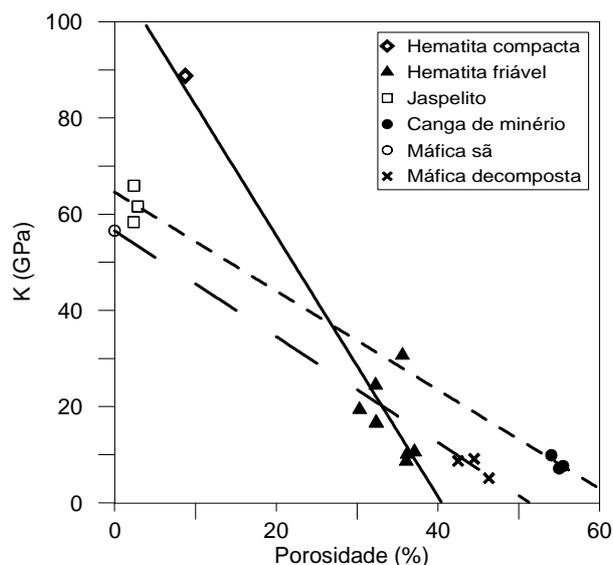


**Figura 10** - Módulo de Young versus porosidade sob pressão confinante efetiva de 40 MPa.



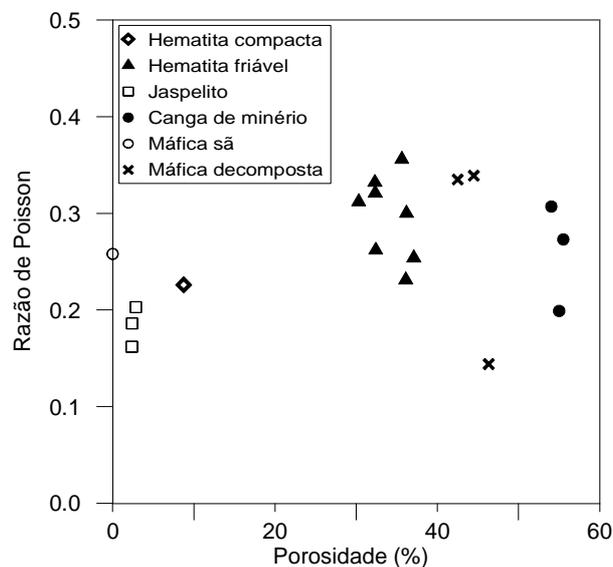
**Figura 11** - Módulo de cisalhamento versus porosidade sob pressão confinante efetiva de 40 MPa.

Esta diferença entre os módulos de Young de rochas compactas e friáveis confirma o potencial da sísmica para a discriminação e mapeamento destes litotipos de forma independente da saturação fluida.



**Figura 12** - Módulo de incompressibilidade versus porosidade sob pressão confinante efetiva de 40 MPa.

A figura 13 apresenta a razão de Poisson versus a porosidade. Este gráfico evidencia que a razão de Poisson não apresenta uma correlação clara com a porosidade nem com o grau de compactação das amostras. Todas as litologias apresentam razão de Poisson entre 0,15 e 0,35.



**Figura 13** - Razão de Poisson versus porosidade sob pressão confinante efetiva de 40 MPa.

A fim de permitir o uso dos dados aqui apresentados por outros grupos de pesquisa, a Tabela 1 exibe as propriedades petrofísicas de fato medidas nas 19 amostras de minério de ferro. Deve-se ressaltar que a porosidade e a densidade de grãos foram medidas sob pressão ambiente e as velocidades das ondas elásticas, apresentadas na Tabela 1, foram medidas sob pressão

confinante efetiva de 40 MPa. Todas as medições foram realizadas em amostras secas.

**Tabela 1** – Propriedades petrofísicas medidas em amostras de minério de ferro.

Amostra	Porosidade (%)	Densidade de grãos (g/cm <sup>3</sup> )	VP (m/s)	VS <sub>1</sub> (m/s)	VS <sub>2</sub> (m/s)
CM_01	55.098	3.606	2844	1584	1593
CM_02	55.253	3.589	2984	1811	1849
CM_03	54.221	3.647	3069	1766	1473
HC	8.774	4.608	6322	3959	3568
HF_AM05_01	36.448	5.014	2264	1210	1211
HF_AM05_02	37.346	5.014	2453	1376	1440
HF_AM05_03	36.387	5.043	2247	1320	1337
HF_AM05_04	30.451	4.964	2973	1566	1540
HF_AM06_01	35.698	5.047	3670	1730	1740
HF_AM06_02	32.403	5.029	3291	1662	1639
HF_AM06_03	32.554	5.015	2929	1809	1519
HF_AM06_04	32.505	5.023	2750	1417	1406
JP_AM02_01	2.923	3.423	6071	3692	3718
JP_AM02_02	2.447	3.529	6279	3998	3803
JP_AM02_03	2.424	3.473	6102	3866	3888
MD_AM07_01	42.772	2.807	2848	1410	1425
MD_AM07_02	44.718	2.808	2902	1433	1431
MD_AM07_03	46.746	2.925	2706	1750	1740
MS_AM08_01	0.011	2.767	6015	3471	3401

### Conclusões

Análises petrofísicas realizadas em amostras de minério de ferro da província de Carajás, e de rochas estéreis associadas, forneceram resultados que recomendam a sua aplicação para a melhoria dos processos de exploração e de produção desse importante ativo mineral brasileiro.

A análise da densidade de grãos mostra que os diversos tipos de rochas podem ser discriminados com base nesta propriedade em três grupos: minério rico, mais denso, minério pobre, com densidade mediana, e rocha estéril, com menor densidade de grãos.

Quanto à porosidade as amostras analisadas podem ser classificadas, de forma geral, em dois grupos: as amostras que apresentam porosidades acima de 30%, que corresponde ao grupo de litologias friáveis, e as amostras que apresentam porosidades inferiores a 10%, que corresponde ao grupo das litologias compactas.

As velocidades elásticas são também indicadores seguros para distinguir entre litologias compactas e friáveis. Considerando ainda que tais grupos também apresentam distintos níveis de porosidade, estes tipos litológicos ficam perfeitamente distinguíveis em gráficos de velocidade contra porosidade, uma vez que as velocidades decrescem consistentemente com o aumento da porosidade. A taxa de decréscimo é maior para o minério rico em ferro do que para o minério pobre ou para as rochas estéreis. Com exceção da razão de Poisson, os demais módulos elásticos apresentam comportamento semelhante ao das velocidades. Estes resultados indicam que tais tipos litológicos (friáveis

versus compactos, minério versus estéril) podem ser reconhecidos e mapeados por sísmica e perfilagem geofísica de poços, agregando assim melhorias no planejamento das atividades de sondagem, lavra de blocos e gerenciamento hidrogeológico das minas.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Vale S.A. pela cessão das amostras de rocha e permissão para publicação dos resultados. O primeiro autor é bolsista do Programa REUNI da UFCG.

### Referências

- BOURBIÉ, T.; COUSSY, O.; ZINSZNER, B. (1987). Acoustics of porous media. Éditions Technip. France.
- SHERIFF, R.E. (1991). Encyclopedic dictionary of exploration geophysics. Third edition. Society of Exploration Geophysics. USA.
- SOARES, J.A. (1992). Um estudo da estabilidade mecânica de poços em formações pouco consolidadas. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Geofísica. Universidade Federal do Pará.