

## Comparação entre as constantes elásticas estimadas pelas velocidades e pela composição mineral de rochas carbonáticas.

Nathaly Archilha, Marco Ceia, Roseane Misságia e Irineu Lima Neto, Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo (LENEP) – Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF)

Copyright 2012, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no V Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 27 a 29 de novembro de 2012. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do V SimBGF, mas não necessariamente representa a opinião da SBGF ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGF.

### Resumo

Este trabalho visa mostrar os resultados experimentais para determinação das propriedades físicas de amostras de rochas carbonáticas provenientes de afloramentos nos EUA. Através destes experimentos foi possível determinar a densidade total, a densidade de grãos, a porosidade, a composição mineralógica e as velocidades elásticas. A partir destas informações as constantes elásticas foram calculadas tanto a partir das velocidades quanto pela estimativa através da composição mineral, buscando-se comparar as duas metodologias.

### Abstract

This work aims to show the results of experiments performed for estimation of physical properties of rock samples extracted from outcrops in USA. Those experiments were successful in the determination of bulk density, grain density, porosity, mineralogy and elastic velocities. Using those info's it was possible to estimate and compare the elastic constant obtained by two different methodologies, one using the velocities and another using the mineral composition.

### Introdução

A importância dos reservatórios carbonáticos no cenário petrolífero internacional pode ser medida pelos grandes volumes de hidrocarbonetos encontrados neste tipo de reservatório, cerca de 60% das reservas mundiais de petróleo e 40% das reservas mundiais de gás natural.

No Brasil, o interesse por informações a respeito das propriedades físicas das rochas carbonáticas têm aumentado após o anúncio das grandes reservas da camada pré-sal da Bacia de Santos em 2005. Estas rochas são caracterizadas por serem heterogêneas, apresentando uma grande variabilidade textural e tipicamente fraturados, levando a complexas relações entre as propriedades físicas das rochas e os dados geofísicos (Vanorio *et al.*, 2008).

Neste trabalho, temos por objetivo a caracterização experimental de amostras de rochas carbonáticas provenientes de afloramentos nos Estados Unidos, visando à aquisição de informações para a construção de carbonatos sintéticos, a serem utilizados posteriormente em experimentos de modelagem sísmica física de reservatórios carbonáticos. A caracterização mencionada consiste de análises para a obtenção das propriedades físicas destas rochas, tais como: porosidade, densidade

total ("bulk") e de grãos, composição mineral e velocidades elásticas de ondas P e S.

### Metodologia

Foram utilizadas 5 amostras de afloramentos, as quais são exemplos de calcários (Desert Pink, Edwards Yellow e Indiana Limestone), dolomitas (Silurian Dolomite) e giz (Austin Chalk). As informações acerca da identificação da amostra e o tipo de rocha estão listados na Tabela 1. Em todos os procedimentos utilizados neste trabalho, as amostras estavam secas.

Tabela 1 - Identificação das amostras, tipo de rocha, formação e origem.

Amostra	Rocha	Formação	Origem
AC-001	Austin Chalk (Giz)	Edwards Plateau	Texas, EUA
DP-001	Desert Pink (Calcário)	Edwards Plateau	Texas, EUA
EY-001	Edwards Yellow (Calcário)	Edwards Plateau	Texas, EUA
IL3-001	Indiana Limestone (Calcário)	Bedford	Indiana, EUA
SD-002	Silurian Dolomite (Dolomita)	Thornton	Illinois, EUA

A etapa inicial da caracterização das amostras consistiu na determinação da densidade total ("bulk"), a qual foi realizada a partir das medições da geometria da amostra, feita com o auxílio de um paquímetro digital, e da massa da amostra. Desta forma o volume total da amostra pode ser calculado através das suas dimensões e a densidade total pode ser calculada pela razão entre a massa e o volume total.

A porosidade das amostras e a densidade de grãos foram determinadas utilizando-se um porosímetro a gás Hélio, UltraPore 300. Este equipamento realiza medidas do volume de grãos (volume da matriz) das amostras a partir da variação de pressão numa câmara contendo gás Hélio. Inicialmente esta câmara encontra-se pressurizada em 200 PSI, porém ao se abrir a válvula de ligação com a outra câmara que abriga a amostra, ocorre uma expansão do gás para esta, a qual se encontrava inicialmente com pressão atmosférica. A pressão na 1ª. Câmara diminui até se estabilizar em uma nova pressão inferior a pressão inicial. Através da Lei de Boyle (Tiab & Donaldson, 2004), é possível determinar o volume de

grãos e a partir deste, a porosidade e a densidade mineral.

A análise da composição mineral das amostras foi efetuada a partir de pequenas fatias destas, que foram separadas antes do início dos experimentos. Estes discos foram submetidos a ensaios de espectrometria por fluorescência de raios-X (FRX), com o equipamento S2 Ranger. Esta técnica é baseada no bombardeio direto das amostras com raios-X (Enzweiler, 2010). Ao incidirem nos átomos da amostra, esses raios X primários ejetam elétrons das camadas próximas do núcleo. As vacâncias criadas são imediatamente preenchidas por elétrons das camadas mais externas e simultaneamente há emissão de raios X (fluorescentes ou secundários). Cada elemento químico emite seu espectro característico de raios-X (Govil, 1994), sendo que o comprimento de onda da linha espectral é característico de cada elemento presente. A intensidade de cada linha espectral está relacionada à concentração do elemento presente na amostra. Neste trabalho, foi efetuada apenas a análise qualitativa objetivando a determinação da concentração (semi-quantitativa) de elementos, principalmente dos óxidos.

A análise das propriedades elásticas foi realizada utilizando o Sistema de Deformação Triaxial e Física de Rochas do LENE/UFEN (Figura 1). Este sistema é composto por uma célula triaxial que permite a deformação axial das amostras através da aplicação de uma tensão por uma prensa hidráulica e a deformação lateral através da variação da pressão de confinamento. A medida da tensão axial é feita utilizando-se uma célula de carga enquanto que a pressão de confinamento é medida por transdutores de pressão. A deformação axial é medida através de LVDT's ("Linear Variable Differential Transformer"), enquanto que a deformação lateral é medida utilizando-se um *cantilever* e LVDT's. O sistema utiliza 6 transdutores piezoelétricos, para determinação das velocidades elásticas, 2 montados em *platens* para a determinação das velocidades axiais através da técnica de transmissão de pulsos e outros 4 montados ao redor da amostra para a determinação das velocidades laterais. Cada par de transdutores, juntamente com um pulsador (gerador de sinais) e um osciloscópio digital, é responsável pela transmissão e registro de ondas P e ondas S (Figura 2), está última com 2 modos de polarização ortogonais, S1 e S2 (Figura 3). A frequência utilizada no sinal transmitido é 1,3 MHz (ondas P) e 900 KHz (ondas S). Os experimentos para a determinação das propriedades elásticas objetivaram a estimativa das velocidades a partir dos tempos de trânsito e foram realizados em diferentes estágios de carga axial e pressão de confinamento.

## Resultados

A tabela 2 lista os resultados obtidos para determinação das porosidades e densidades total e mineral (também chamada de densidade de grãos) das amostras de afloramentos. Os resultados da análise de FRX para as amostras estudadas estão listados na Tabela 3.



Figura 1 - Foto do Sistema de Deformação e Física de Rochas do LENE/UFEN.

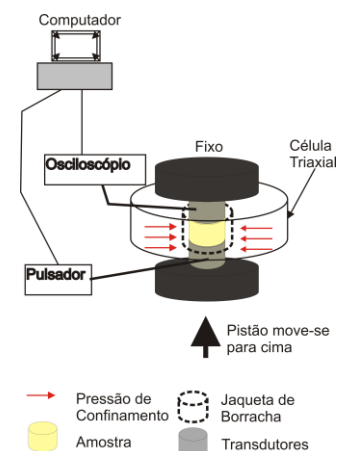


Figura 2 - Ilustração do princípio de funcionamento do Sistema de Deformação e Física de Rochas.

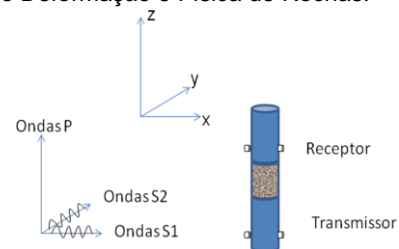


Figura 3 - Ilustração da propagação das ondas elásticas utilizadas no experimento. As ondas P acarretam perturbações na mesma direção de propagação da onda (eixo z). As ondas S provocam perturbações perpendiculares (eixos x e y) à direção de propagação.

Tabela 2 - Propriedades físicas das amostras estudadas.

Amostra	Porosidade (%)	Densidade Total (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade Mineral (g/cm <sup>3</sup> )
AC-001	26,1	1.991	2.694
DP-001	26,8	1.982	2.707
EY-001	27,6	1.962	2.709
IL3-001	15,3	2.203	2.671
SD-002	16,2	2.358	2.814

Tabela 3 - Resultados da análise de Espectrometria por Fluorescência de Raios-X.

Óxidos/E- lementos	AC- 001	DP- 001	EY- 001	IL3- 001	SD- 002
MgO	0,915	0,596	0,521	1,6	33,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,207	0,266	0,239	0,392	0,546
SiO <sub>2</sub>	0,180	0,204	0,234	0,666	0,661
Cl	4,88	0,286	-	2,99	0,272
K <sub>2</sub> O	4,94	0,245	0,190	2,67	0,351
CaO	88,4	98,1	98,3	91,2	63,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,332	0,170	0,280	0,153	0,5
SO <sub>3</sub>	0,180	-	-	0,236	-

A figura 4 mostra os resultados dos experimentos para a determinação das velocidades de ondas P para as diversas amostras estudadas. Já a figura 5 mostra os resultados dos experimentos para a determinação das velocidades de ondas S. Em ambas as figuras citadas acima foram traçadas curvas de ajuste polinomial, cujas equações nos permitem calcular o valor das velocidades elásticas para a tensão axial igual a 0 MPa. Estes valores estão listados na tabela 4.

Tabela 4 - Velocidades elásticas das amostras supondo tensão axial igual à 0 MPa.

Amostra	Vp (Km/s)	Vs1 (Km/s)	Vs2 (Km/s)
AC-001	3.5322	2.0689	2.0352
DP-001	3.8473	2.1948	2.2207
EY-001	3.2654	1.776	1.7818
IL3-001	4.5833	2.494	2.4865
SD-002	5.5781	3.131	3.1852

Utilizando as informações de densidade total, Vp e um valor médio de Vs (média aritmética de Vs1 e Vs2), podemos calcular as constantes elásticas, usando as Equações 1, 2, 3 e 4. Os resultados são mostrados na tabela 5.

$$E = \frac{\rho_b V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad (1)$$

$$\nu = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2)$$

$$G = \rho_b V_s^2 \quad (3)$$

$$K = \rho_b \left( V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right) \quad (4)$$

Onde:

E=Módulo de Young,

$\nu$ =Razão de Poisson,

G=Módulo de Cisalhamento,

K=Módulo de Compressão,

V<sub>s</sub>=Velocidade das ondas S (Km/s). Média entre Vs1 e Vs2.

Tabela 5 - Constantes elásticas das amostras estudadas, calculadas a partir das velocidades elásticas e da densidade total.

Amostra	E (GPa)	$\nu$	G (GPa)	K (GPa)
AC-001	20,9	0,245	8,4	13,7
DP-001	24,2	0,255	9,7	16,5
EY-001	16,0	0,289	6,2	12,6
IL3-001	35,3	0,291	13,7	28,1
SD-002	59,5	0,264	23,5	42,0

O módulo de compressão (K) e o módulo de cisalhamento (G) podem ser obtidos também a partir das informações da composição mineral das amostras, usando uma média entre os limites superior e inferior de Hashin-Shtrikman (Mavko et al., 1998) (Eqs. 5-11).

$$K^{HS-} = \left[ \frac{\phi}{K_f + \frac{4G_{min}}{3}} + \sum_{i=1}^n \frac{(1-\phi)f_i}{K_{m_i} + \frac{4G_{min}}{3}} \right]^{-1} \quad (1)$$

$$K^{HS+} = \left[ \frac{\phi}{K_f + \frac{4G_{max}}{3}} + \sum_{i=1}^n \frac{(1-\phi)f_i}{K_{m_i} + \frac{4G_{max}}{3}} \right]^{-1} - \frac{4G_{max}}{3} \quad (2)$$

$$G^{HS-} = \left[ \frac{\phi}{\zeta(K_{min}, G_{min})} + \sum_{i=1}^n \frac{(1-\phi)f_i}{G_{m_i} + \zeta(K_{min}, G_{min})} \right]^{-1} + \zeta(K_{min}, G_{min}) \quad (3)$$

$$G^{HS+} = \left[ \frac{\phi}{\zeta(K_{max}, G_{max})} + \sum_{i=1}^n \frac{(1-\phi)f_i}{G_{m_i} + \zeta(K_{max}, G_{max})} \right]^{-1} + \zeta(K_{max}, G_{max}) \quad (4)$$

$$\zeta(K_{min}, G_{min}) = \frac{G_{min}}{6} \left( \frac{9K_{min} + 8G_{min}}{K_{min} + 2G_{min}} \right) \quad (5)$$

$$\zeta(K_{max}, G_{max}) = \frac{G_{max}}{6} \left( \frac{9K_{max} + 8G_{max}}{K_{max} + 2G_{max}} \right) \quad (6)$$

Onde:

$K^{HS+}$  = Limite superior do Módulo de Compressão

$K^{HS-}$  = Limite inferior do Módulo de Compressão

$G^{HS+}$  = Limite superior do Módulo de Cisalhamento;

$G^{HS-}$  = Limite inferior do Módulo de Cisalhamento;

$K_{max}$  = Valor máximo dos Módulos de Compressão dos componentes;

$K_{min}$  = Valor mínimo dos Módulos de Compressão dos componentes;

$G_{max}$  = Valor máximo dos Módulos de Cisalhamento dos componentes;

$G_{min}$  = Valor mínimo dos Módulos de Cisalhamento dos componentes;

$f_i$  = fração de volume do  $i$ -ésimo componente;

$n$  = número de componentes;

$K_{m_i}$  = Módulo de Compressão do  $i$ -ésimo componente;

$G_{m_i}$  = Módulo de Cisalhamento do  $i$ -ésimo componente;

A densidade mineral das amostras também pode ser estimada a partir da contribuição de cada componente usando a Equação (7).

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n \rho_{m_i} f_i \quad (7)$$

Onde:

$\rho_m$  = Densidade mineral da amostra;

$\rho_{m_i}$  = Densidade mineral do  $i$ -ésimo componente.

Considerando que as amostras estejam secas e em condições ambientes, temos que:

$$G_{min} = G_{ar} = 0;$$

$$K_{min} = K_f = K_{ar} = 0,000131 \text{ GPa.}$$

Considerando também que as frações de CaO e MgO apontadas pela análise de FRX sejam relativas a presença de calcita magnesiana no caso dos calcários ou de dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) no caso da amostra de dolomita, a fração de  $\text{SiO}_2$  seja devido a presença de quartzo,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  é relativo à hematita, as frações de  $\text{K}_2\text{O}$  e Cl relativas à silvita, a fração de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é relativa a alumina e  $\text{SO}_3$  relativa à anidrita, de forma que podemos usar os respectivos valores dos módulos minerais destes para calcular os limites HS e a média de Hill dos módulos de compressão e cisalhamento das amostras.

Os módulos minerais utilizados no cálculo estão listados na Tabela 6 e os resultados obtidos do cálculo dos limites HS e média aritmética destes limites são mostrados na Tabela 7, enquanto que a densidade mineral das amostras calculada a partir das densidades das frações minerais constituintes e uma estimativa de erro relativo das médias HS e da densidade calculada em relação aos valores medidos são apresentadas na Tabela 8. Estes erros foram calculados usando a formulação abaixo:

$$\text{erro} = \frac{|\text{Calculado} - \text{Medido}|}{\text{Medido}} \times 100\% \quad (8)$$

Tabela 6 - Propriedades Físicas dos Minerais observados nas amostras.

Componente	$K_m$ (GPa)	$G_m$ (GPa)	$\rho_{mi}$ ( $\text{g/cm}^3$ )
Calcita ( $\text{CaCO}_3$ )	75	31	2,71
Dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	76,4	49,7	2,87
Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	100,2	95,2	5,24
Quartzo ( $\text{SiO}_2$ )	36	45	2,65
Anidrita ( $\text{CaSO}_4$ )	56,1	29,1	2,98
Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	76	26	2,70
Silvita (KCl)	17,4	9,4	1,99

Onde:

Calculado=Valores determinados a partir da composição mineral;

Medido=Valores obtidos através das medições de tempo de trânsito (velocidades P e S) e volume de grãos (densidade mineral).

## Discussão

A Figura 6 mostra os resultados obtidos para os módulos elásticos em forma de gráfico. Pode-se observar que todos os pontos determinados a partir dos experimentos de velocidade (K e G Medidos) estão dentro dos limites HS. Os valores médios dos limites HS para o módulo de compressão ficam bem longe dos valores medidos, sendo interessante notar que para as amostras de maior porosidade (AC, DP e EY) esses valores médios são maiores que os valores medidos, enquanto que para as amostras de menor porosidade (IL e SD) estes valores são menores. Para o módulo de cisalhamento, a média dos limites HS forneceu valores mais próximos aos valores medidos, sendo que a amostra DP-001 foi a que resultou no menor erro relativo para o módulo de cisalhamento (9,1 %).

A Figura 7 mostra os resultados obtidos para a densidade mineral. Os erros relativos para a densidade mineral foram bem menores do que para os módulos elásticos, variando de 0,0-1,8 %, o que demonstra a coerência das estimativas a partir da composição mineral. Um dos motivos para explicar a grande diferença entre os valores médios dos limites HS e os valores medidos dos módulos elásticos decorre do fato de que a teoria de Hashin-Shtrikman não leva em conta os detalhes geométricos de como as diversas fases estão arrumadas entre si (Mavko et al. 1998), tais como o formato dos poros e o contato entre os grãos, as quais influenciam diretamente os módulos elásticos, porém não têm grande influência sobre a densidade mineral.

Tabela 7 - Limites de Hashin-Shtrikman para os módulos de compressão e cisalhamento e suas médias.

Amostra	KHS- (GPa)	KHS+ (GPa)	KHS_médio (GPa)	GHS- (GPa)	GHS+ (GPa)	GHS_médio (GPa)
AC-001	5e-3	44,66	20,28	0	19,61	9,80
DP-001	5e-3	47,90	23,95	0	21,16	10,58
EY-001	5e-3	48,18	24,09	0	21,32	10,66
IL3-001	5e-3	45,46	22,73	0	20,42	10,21
SD-002	5e-3	48,25	24,13	0	24,88	12,44

Tabela 8 - Densidade mineral das amostras calculada a partir das densidades das frações minerais constituintes e erros relativos das médias HS e da densidade calculada em relação aos valores medidos.

Amostra	$\rho_m$ (g/cm <sup>3</sup> )	Erro KHS_Média (%)	Erro GHS_Média (%)	Erro $\rho_m$ (%)
AC-001	2,649	59,4	16,2	1,67
DP-001	2,707	45,2	8,8	0,00
EY-001	2,709	91,2	71,5	0,01
IL3-001	2,671	19,1	26,1	0,01
SD-002	2,865	42,0	31,5	1,81

Os erros na estimativa da composição mineral são devidos principalmente a não preparação da amostra para ensaios quantitativos, o que requer técnicas de desagregação, moagem, prensagem e fusão vítrea (Enzweiler, 2010). Como as amostras foram usadas sem esse preparo a rugosidade da superfície e a heterogeneidade dos constituintes podem vir a afetar os resultados das análises da composição mineral, entretanto os baixos erros relativos decorrentes das estimativas de densidade mineral indicam que as estimativas de composição mineral são coerentes.

### Conclusões

Os experimentos foram bem sucedidos na caracterização das amostras estudadas, proporcionando a estimativa da porosidade, densidade total, densidade de grãos, composição mineralógica e das velocidades elásticas.

As estimativas de densidade mineral obtida a partir das informações da composição mineral foram muito próximas dos valores determinados experimentalmente, o que assegurou a coerência destas informações e atestou a eficácia da espectrometria por fluorescência de raios-X, mesmo utilizando as amostras sem nenhum tipo de preparo especial. Por outro lado, embora os valores das estimativas do módulo de compressão e de cisalhamento tenham ficado entre os limites de Hashin-Shtrikman, os

valores médios destes limites se distanciam muito dos valores obtidos experimentalmente.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a PETROBRAS a pelo financiamento dos equipamentos. Ao LENEP/UENF e ao PRH-20/ANP pela infra-estrutura e recursos disponibilizados para a realização deste trabalho.

Nossos agradecimentos também a Márcio J. Morschbacher, pela cessão das amostras e pelas valiosas discussões, e aos técnicos: Remilson Rosa, Evandro Henriques e Adrielle Silva.

### Referências

Enzweiler, J. (2010, 11 23). *Espectrometria de Fluorescência de Raios X*. Acessada em 07 29, 2012, do site:

[http://www.quimica.ufpr.br/nunesgg/CQ027/CQ027\\_trabalho/Fluorec%EAncia%20de%20Raios%20-%20X.pdf](http://www.quimica.ufpr.br/nunesgg/CQ027/CQ027_trabalho/Fluorec%EAncia%20de%20Raios%20-%20X.pdf)

Govil, P. 1994. X-Ray Fluorescence Spectrometry in Geological Samples. *Proceedings of the Workshop on Modern Methods of Chemical Analysis for Minerals Metals and Pollutants (MMCA 1994)* (pp. XII-1-15). Jamshedpur, India: National Metallurgical Laboratory.

Mavko, G., Mukerji, T., & Dvorkin, J. 1998. *The Rock Physics Handbook*. Cambridge: Cambridge University Press.

Tiab, D., & Donaldson, E. 2004. *Petrophysics-Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*. Oxford: Elsevier.

Vanorio, T., Scotellaro, C., Mavko, G., 2008. The effect of chemical and physical processes on the acoustic properties of carbonate rocks. *The Leading Edge*, v. 27, p. 1040 – 1048.

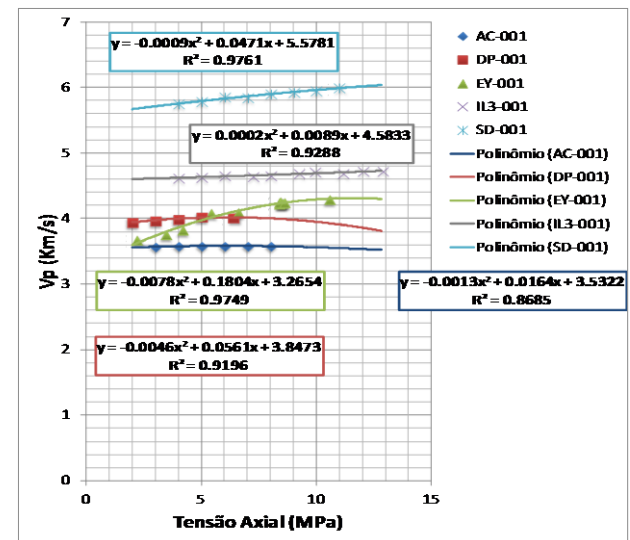


Figura 4 - Gráfico da velocidade de ondas P em função da tensão axial aplicada sobre as amostras. As linhas sólidas são curvas de ajuste dos dados, cujas equações e os coeficientes de ajuste são mostrados nas caixas com as respectivas cores.

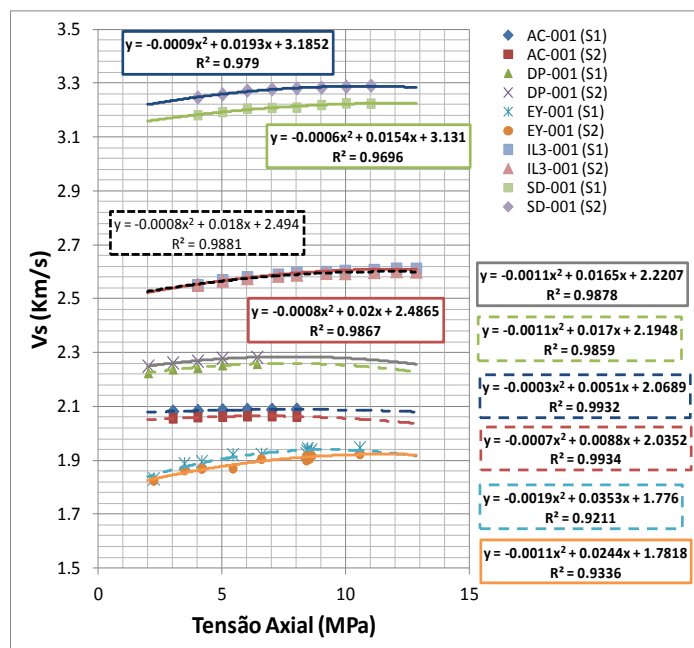


Figura 5 - Gráfico da velocidade de ondas S em função da tensão axial aplicada sobre as amostras. As linhas sólidas são curvas de ajuste dos dados, cujas equações e os coeficientes de ajuste são mostrados nas caixas com as respectivas cores e estilos de linha.

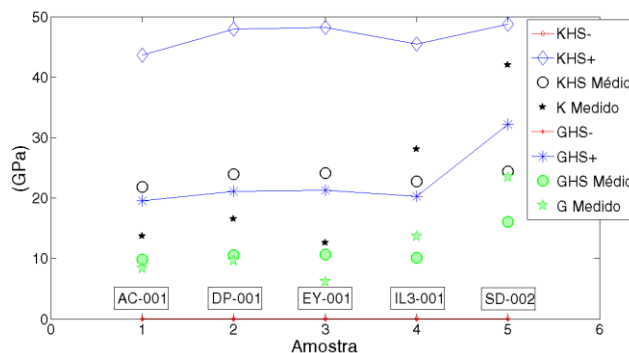


Figura 6 - Módulos Elásticos (K e G) determinados através das velocidades (K e G Medidos), limites HS e médias dos limites HS.

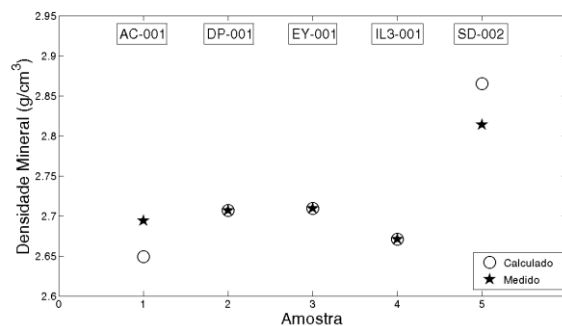


Figura 7 - Densidade mineral obtida através da composição mineral (Calculado) e através das medidas de volume de grãos (Medido).