

COMPARAÇÃO DE AMOSTRAGENS EM SONDAGENS ROTATIVAS DIAMANTADAS COM SONDAGENS TRICÔNICAS DE CIRCULAÇÃO REVERSA EM UMA PESQUISA MINERAL

Rafael Rachid Elias AJUB ¹, Evandro Cardoso CINTRA ¹, José Ricardo STURARO ²

(1) Curso de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. (2) Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: sturaro@rc.unesp.br

- Introdução
- Metodologia
 - Gráfico de Barras
 - Gráfico Q-Q Plot
 - Teste T de Student
 - Análise Variográfica
- Estudo de Caso
 - Geologia Local
 - Base de Dados
 - Sondagens
 - Sondagem Diamantada
 - Sondagem Circulação Reversa
- Apresentação de Dados
 - Furos Gêmeos (Diam-A) e (Cir-B)
 - Gráfico de Barras
 - Histogramas
 - Teste t de Student com os Dados Normalizados
 - Q-Q Plot
 - Variogramas
 - Furos (Diam-C) e (Cir-D)
 - Gráfico de Barras
 - Histogramas
 - Teste t de Student com os Dados Normalizados
 - Q-Q Plot
 - Variogramas
 - Furos (Diam-E) e (Cir-F)
 - Gráfico de Barras
 - Histogramas
 - Teste t de Student com Dados Normalizados
 - Q-Q Plot
 - Variogramas
- Considerações Finais
- Agradecimentos
- Referências Bibliográficas

RESUMO: Este trabalho, desenvolvido no Depósito Aurífero de São Francisco (Estado de Mato Grosso, Brasil), teve como objetivo a avaliação de duas técnicas de sondagens, que foram as sondagens rotativas diamantadas e as sondagens tricônicas com circulação reversa, visto que o custo das primeiras são significativamente maiores que as segundas. Os dados foram obtidos de três sondagens conjugadas, ou seja, furos gêmeos localizados a 1 m de distância. Para cada sondagem, foram obtidas em média 80 amostras, que constituíram o espaço amostral para os testes comparativos. Desta forma, empregou-se técnicas da estatística bivariada, como t de Student, gráficos de comparação de quantis e também recursos da geoestatística, como a análise variográfica. De acordo com os testes estatísticos, obteve-se uma similaridade significativa entre os dois tipos de sondagens.

Palavras-chave: Sondagens; t de Student; Q-Q Plot; variograma.

ABSTRACT: R.R.E. Ajub, E.C. Cintra, J.R. Sturaro - *Comparison of Samplings in Surveys with Diamond Core Drilling and Reverse Circulation Drilling in a Mineral Exploration.* Two different drilling method was applied at São Francisco gold deposit (Mato Grosso State, Brazil): the diamond core drilling and reverse circulation drilling. This paper has the purpose of comparing both techniques once the conventional core drilling, commonly used in gold projects, is much more expensive and slower than the reverse circulation one. Data was obtained from three pairs of twin drill holes. An average of 80 pair of samples was obtained from each pair of holes, where the comparative tests were carried out. Bivariate statistical techniques were applied, such as t of Student and quantile plots, as well as a geostatistical approach through variographic analysis. Results showed a significant similarity between the drill holes analysed.

Keywords: Drill hole; t of Student; Q-Q Plot; variogram.

INTRODUÇÃO

Em uma pesquisa mineral que requer um trabalho intenso de sondagens com vistas à caracterização do corpo mineralizado, assim como da distribuição espacial dos teores, a minimização dos custos constitui-se uma

meta perseguida constantemente pelos prospectores. Desta forma, são muitas vezes utilizadas técnicas alternativas, que tenham representatividade igual às sondagens tradicionais.

Empregou-se, neste trabalho, técnicas estatísticas para comparar dois tipos de sondagens comumente utilizadas na mineração, isto é, sondagens rotativas com coroas diamantadas, cujo custo médio é de US\$100/m

perfurado, e sondagens com brocas tricônicas com amostragens obtidas através de circulação reversa, a US\$ 60/m perfurado.

Comparou-se, no presente trabalho, os parâmetros estatísticos das populações, referentes aos dois tipos de sondagens acima definidos, cujos furos para testes, separados por 1 m de distância, foram executados em três pares.

METODOLOGIA

Foram utilizados os trabalhos de autores que participaram do Echo Bay Mines - Sampling Workshop no período de 5 a 8 de maio de 1992. Os autores que abordaram este tema foram Prenn (1992), Neil & Prenn (1992) e Kuyper et al (1992). As informações contidas nestes trabalhos tinham como foco principal a comparação de furos de sondagens em mineralização de ouro. Desta forma, foram considerados como a literatura básica para este trabalho.

Além das referências citadas, foram empregados alguns livros, como Spiegel (1975), Siegel (1976) e Isaaks & Srivastava (1989).

GRÁFICO DE BARRAS

Utilizou-se a apresentação do gráfico de barra para visualizar os teores dos furos gêmeos ao longo da profundidade. Estes gráficos são importantes pois fornecem uma avaliação preliminar dos teores localizados na mesma cota.

GRÁFICO Q-Q PLOT

Nesta técnica, o conjunto de dados é ordenado em ordem de grandeza, sendo o valor que divide o conjunto em duas partes iguais a mediana. Por extensão, os valores que dividem o conjunto em quatro partes iguais são os quartis, em dez partes os decis, e em N partes, que podem corresponder ao número de dados do conjunto, são denominados de quantis.

O gráfico Q-Q Plot compara os quantis em um diagrama de dispersão seccionado por uma bissetriz de 45° que pode ser utilizada para avaliar a dispersão dos quantis referentes a dois conjuntos de amostras.

TESTE T DE STUDENT

Este teste paramétrico, muito utilizado para comparar médias, foi empregado, neste trabalho, de acordo com as seguintes hipóteses:

- Hipótese nula, H_0 , as amostras são pertencentes à mesma população.
- Hipótese alternativa, H_1 , as amostras são de populações distintas.

A equação estatística do Teste t de Student é assim expressa:

$$T = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

onde: \bar{X} = média da amostra 1; \bar{Y} = média da amostra 2; $S_2(x)$ = variância da amostra 1; $s_2(y)$ = variância da amostra 2; n_1 e n_2 = os respectivos números de dados das amostras.

ANÁLISE VARIOGRÁFICA

O variograma, uma ferramenta geoestatística, representa uma medida de correlação espacial, isto é, avalia a continuidade da variável em uma determinada direção. Esta técnica foi utilizada para subsidiar os estudos de eventual contaminação ao longo dos furos.

O variograma experimental é definido pela seguinte expressão:

$$\text{Variograma} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (V_{(i)} - V_{(i-h)})^2$$

onde: $V(x)$ = variável regionalizada; n = número de pares.

ESTUDO DE CASO

O estudo foi aplicado no depósito aurífero de São Francisco, situado no município de Nova Lacerda, oeste do Estado de Mato Grosso, a 40 km sudeste da mina de São Vicente (Figura 1). O direito de exploração pertence à empresa de Mineração Santa Elina Indústria e Comércio S.A., operando na região desde 1984.

GEOLOGIA LOCAL

A mineralização aurífera está confinada a um pacote de metassedimentos clásticos da Formação Fortuna (Proterozóico Médio/Superior), unidade basal do Grupo Aguapeí, bem como cobertura laterítica e colúvio. Localmente essa formação é representada por

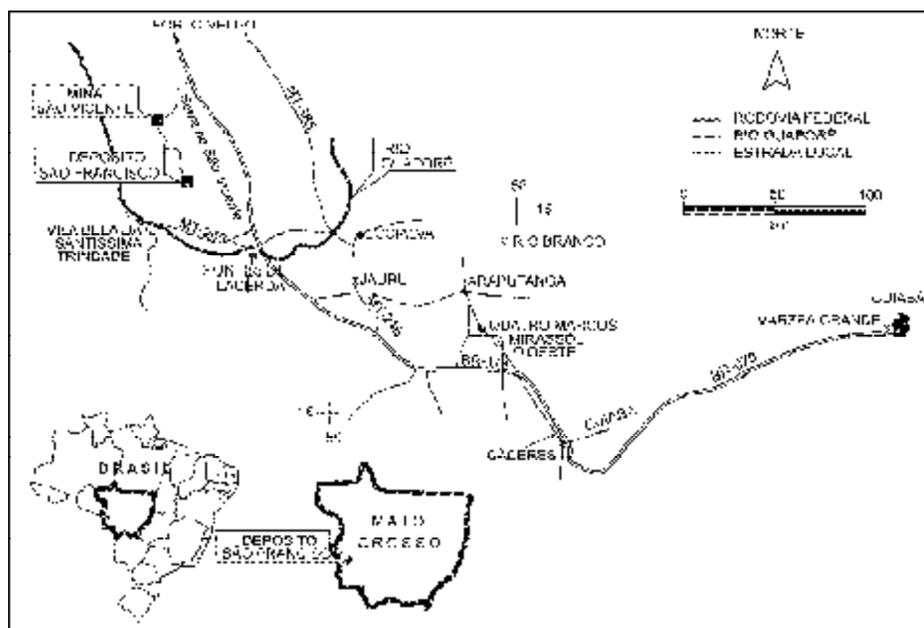


FIGURA 1. Mapa de localização da área em estudo.

metaconglomerados, metarenitos conglomeráticos, metarenitos, metarenitos feldspáticos, metassiltitos e metapelitos. Os sedimentos foram submetidos a metamorfismo regional de baixo grau, preservando estruturas sedimentares primárias. Toda a seqüência sedimentar encontra-se dobrada em um anticlinal assimétrico. Essa estrutura possui uma extensão de 10 km, com plano axial mergulhando 84° para NE, eixo com caimento de 5 a 10° para NW e flancos com mergulho de 30° para NE e 60° para SW. A mineralização encontra-se no núcleo do anticlinal.

BASE DE DADOS

O depósito aurífero de São Francisco foi investigado através de 334 furos de sondagens, perfazendo 50.916 m distribuídos em malha 50x25 e 25x25, conforme mostra a Figura 2.

A campanha de sondagem de circulação reversa foi iniciada no final da campanha das sondagens diamantada, através da perfuração de três pares de furos gêmeos, sendo que em cada par há uma sondagem diamantada e uma sondagem por circulação reversa, separados por aproximadamente 1 m de distância, denominados furos (Diam-A), (Cir-B), (Diam-C), (Cir-D), (Diam-E) e (Cir-F). (Tabela 1).

SONDAGENS

Sondagem Diamantada

Estas sondagens possuem diâmetros HX (10 cm) e NQ (6,03 cm de diâmetro), com um total de 42.390 m em 263 furos, dispostos em malha de 50x25 m.

TABELA 1. Identificação das sondagens.

Pares	Tipos de sondagens	
	Sondagem Diamantada	Sondagem Circulação Reversa
PAR 1	(Diam-A)	(Cir-B)
PAR 2	(Diam-C)	(Cir-D)
PAR 3	(Diam-E)	(Cir-F)

Nesta campanha de sondagem, a cada 2 m o testemunho é serrado longitudinalmente, indo metade do testemunho para o arquivo e metade para análise química (aproximadamente 20 kg cada). Esta sondagem é relativamente lenta e tem custo de aproximadamente US\$ 100/m.

Sondagem Circulação Reversa

Estas sondagens possuem os diâmetros variando de 4 ½ a 5 ½ polegadas, sendo perfurado um total de 8.526 m em 71 furos dispostos em linhas intercaladas à sondagem diamantada, visando o fechamento da malha de sondagem geral em 25x25 m.

Esta campanha foi realizada posteriormente à sondagem diamantada com o objetivo de adensar a malha de amostragem. Nesta sondagem, a cada 2 m o sistema é parado e retirada a amostra britada *in situ*; metade dos fragmentos obtidos vai para o arquivo e a outra metade vai para análise química (aproximadamente 30 kg). Esta sondagem é mais rápida que a anterior e possui um custo muito inferior, US\$ 60/m perfurado.

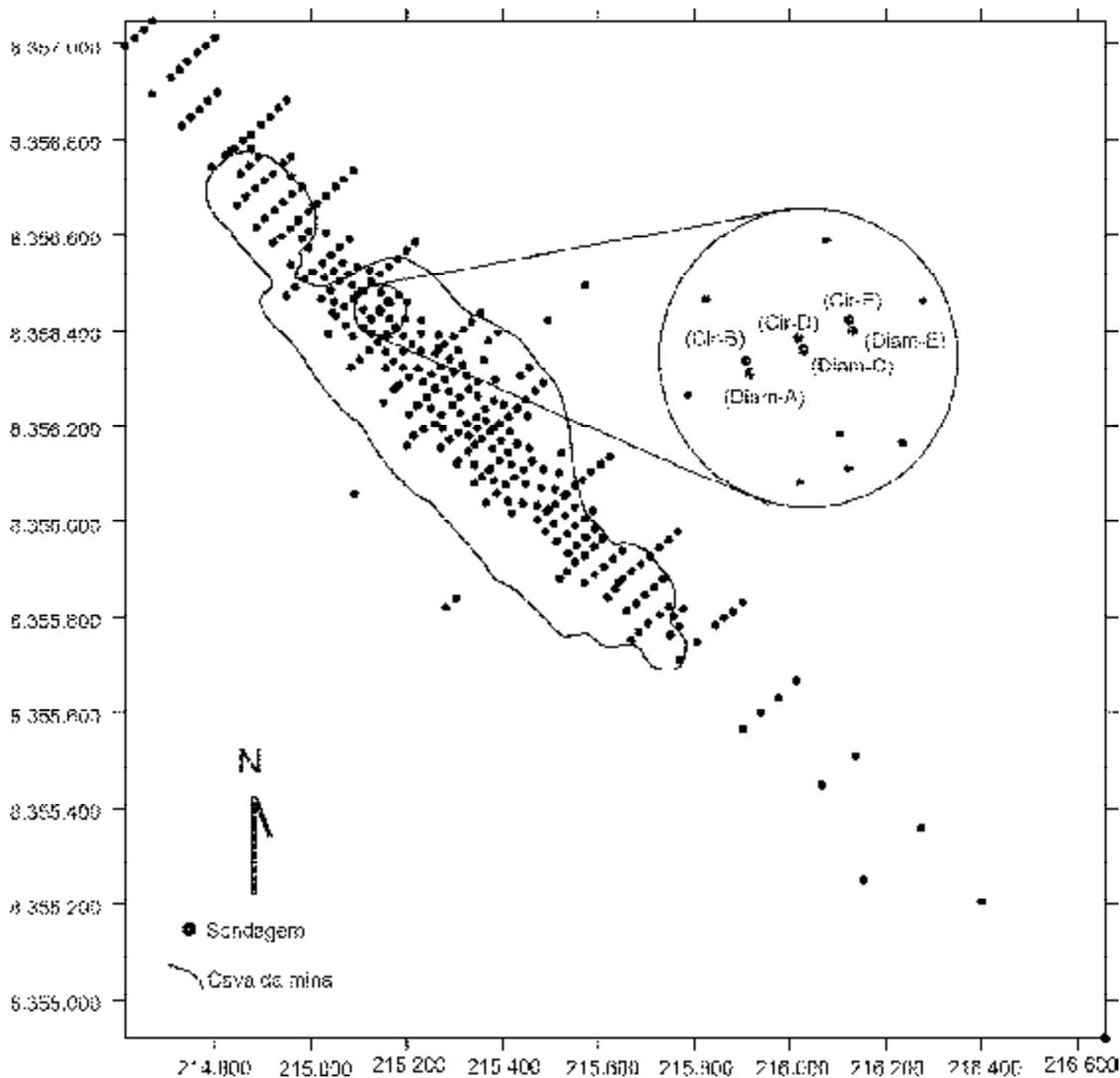


FIGURA 2. Localização das sondagens.

APRESENTAÇÃO DE DADOS

FUROS GÊMEOS (DIAM-A) E (CIR-B)

Gráfico de Barras

O gráfico de barras da Figura 3 mostra que o furo (Cir-B) possui dois valores elevados, fato este que distorce a média aritmética, enquanto o furo (Diam-A) apresenta distribuição mais suave da concentração de ouro.

Histogramas

Os histogramas apresentados nas Figuras 4A e B, correspondentes aos furos (Diam-A) e (Cir-B) revelam uma elevada assimetria, sendo que o furo (Cir-B) apresenta dois valores anômalos que distorcem significativamente a média aritmética (Tabela 2). Desta forma, para efetuar um teste comparativo paramétrico,

optou-se em logaritmizar os dados e verificar suas distribuições de freqüências. Os resultados encontram-se nas Figuras 4C e D, cujas distribuições apresentam uma configuração normal.

Teste t de Student com os Dados Normalizados

Com base na Tabela 2 obteve-se valores que aceitam a hipótese nula H_0 , segundo a tabela de valores críticos de "t" de Fisher & Yates (1963) para o nível de significância de 5%, apresentados na Tabela 3.

Q-Q Plot

O gráfico Q-Q Plot, representado na Figura 5, mostra uma concentração de baixos teores e relativamente similares entre os dois furos, com baixa dispersão ao longo da reta de 45°. Por outro lado, os

valores mais altos ou anômalos dispersam-se mais ao longo da reta de 45°, traduzindo uma característica desta variável, denominada em geoestatística de efeito pepita.

Variogramas

Os variogramas representados na Figura 6 fornecem uma avaliação de correlação espacial dos teores

de ouro ao longo da profundidade dos furos. Ambos os variogramas apresentam efeito pepita puro, este fato pode dar-se por não existir correlação espacial dos teores de ouro ao longo da profundidade dos furos de sondagens. Assim, dada à baixa continuidade espacial, pode se admitir que não ocorreu contaminação significativa dos teores de ouro durante a perfuração.

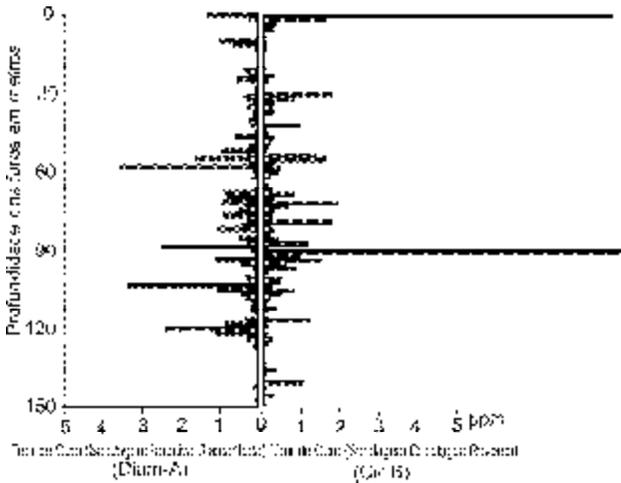


FIGURA 3. Gráfico de barras dos furos (Diam-A) e (Cir-B).

TABELA 2. Estatística dos dados obtidos nas sondagens.

Parâmetros Estatísticos	(Diam-A)	(Cir-B)
Número de valores	90	90
Média	0,4264	0,5203
Mediana	0,19	0,19
Variância	0,4427	1,614
Desvio Padrão	0,5653	1,27
Coefficiente de Variação	1,56016	2,44144
Assimetria	2,975	5,543
Currose	10,029	32,903

TABELA 3. Teste t de Student.

Parâmetros estatísticos	(Diam-A)	(Cir-B)
Média dos dados	-1,85	-1,75
Desvio Padrão	1,54	1,43
Número de amostras	90	90
Valor de t		-0,45

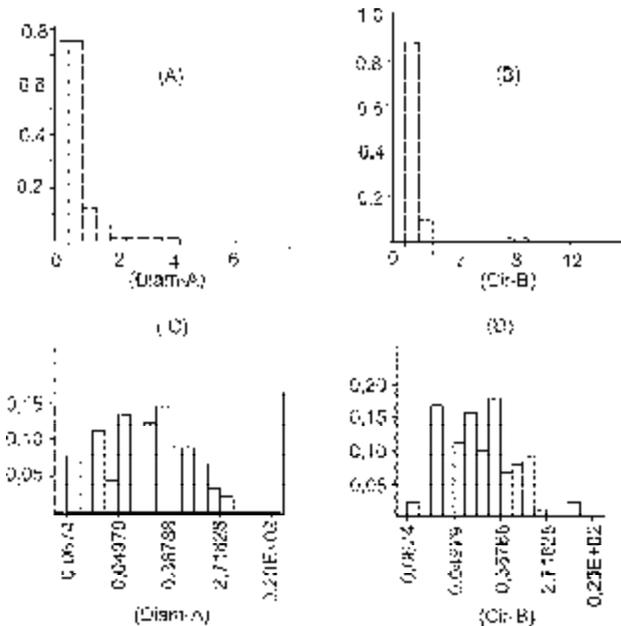


FIGURA 4. Histogramas dos furos (Diam-A) e (Cir-B).

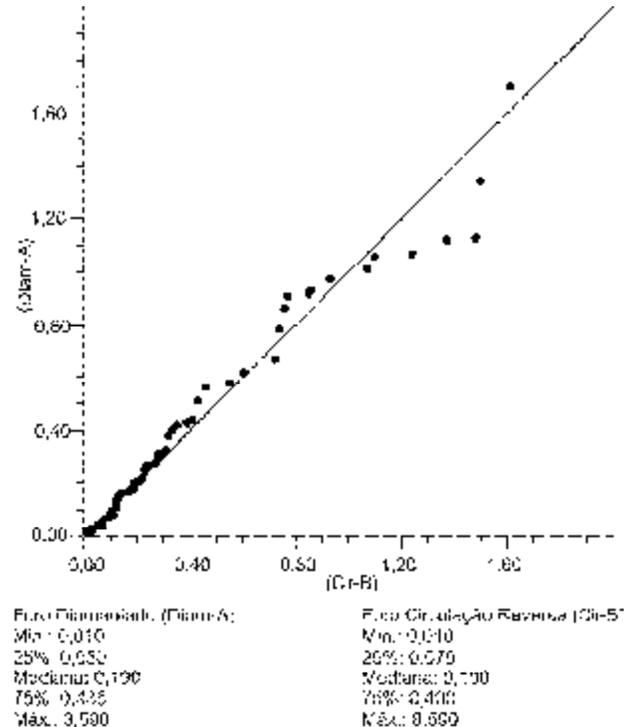


FIGURA 5. Q-Q Plot dos furos (Diam-A) e (Cir-B).

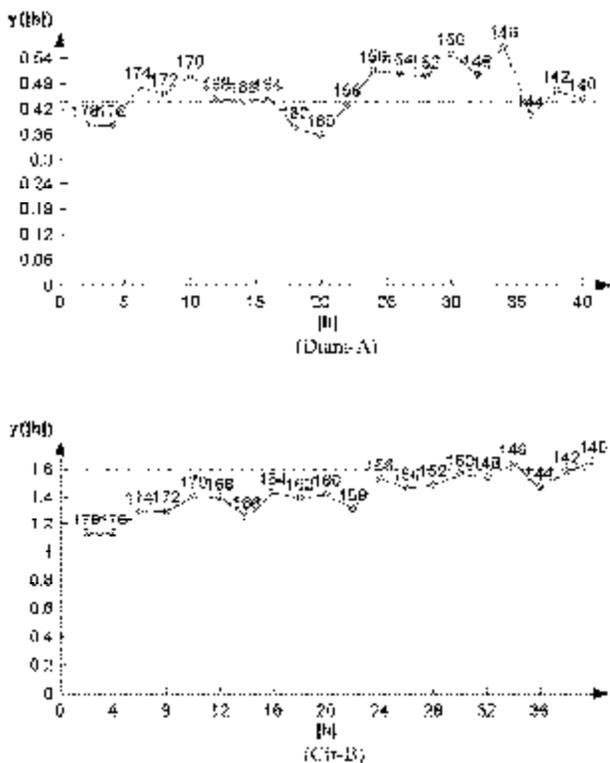


FIGURA 6. Variogramas ao longo dos furos (Diam-A) e (Cir-B).

FUROS (DIAM-C) E (CIR-D)

Gráfico de Barras

O gráfico de barras da Figura 7 mostra que o furo (Cir-D) possui três valores elevados, enquanto o furo A apresenta dois valores elevados de teores de ouro, que despontam como relativos contrastes entre os respectivos teores.

Histogramas

Os histogramas apresentados nas Figuras 8A e B, correspondentes aos furos (Diam-C) e (Cir-D), revelam uma elevada assimetria (Tabela 4). Ambos os furos apresentam valores anômalos, que distorcem significativamente a média aritmética. Desta forma, para efetuar um teste comparativo paramétrico, optou-se em logaritmizar os dados e verificar suas distribuições de freqüências. Os resultados encontram-se nas Figuras 8C e D, cujas distribuições aproximam-se da configuração normal.

Teste t de Student com os Dados Normalizados

Segundo a tabela de valores críticos de “t” de Fisher & Yates (1963) aceita-se a hipótese nula H_0 para o nível de significância de 5% para os dados apresentados na Tabela 5.

Q-Q Plot

O gráfico Q-Q Plot, representado na Figura 9,

mostra que os baixos teores estão relativamente similares entre os dois furos, com baixa dispersão ao longo da reta de 45°. Entretanto, dois valores mais altos ou anômalos se dispersam mais ao longo da reta de 45°.

Variogramas

Os variogramas representados na Figura 10 são referentes à correlação espacial dos teores de ouro ao longo da profundidade dos furos. Ambos os variogramas apresentam efeito pepita puro, este fato pode dar-se por não existir correlação espacial dos teores de ouro ao longo da profundidade dos furos de sondagens. Assim, pode se admitir que não ocorreu contaminação de teores de ouro durante a perfuração.

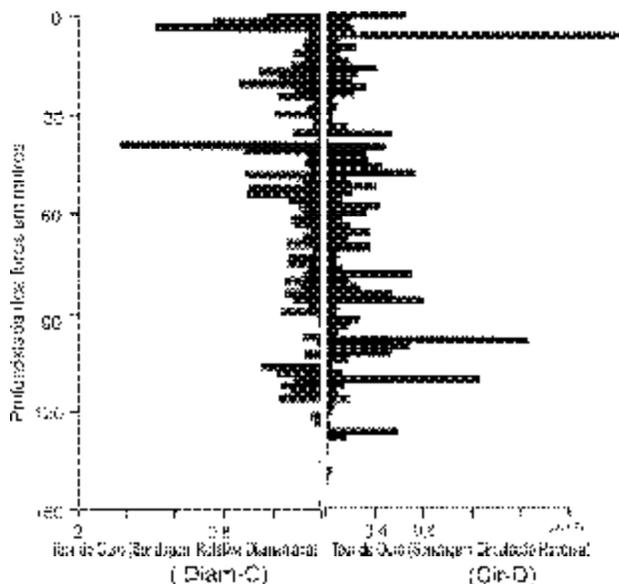


FIGURA 7. Gráfico de barras dos furos (Diam-C) e (Cir-D).

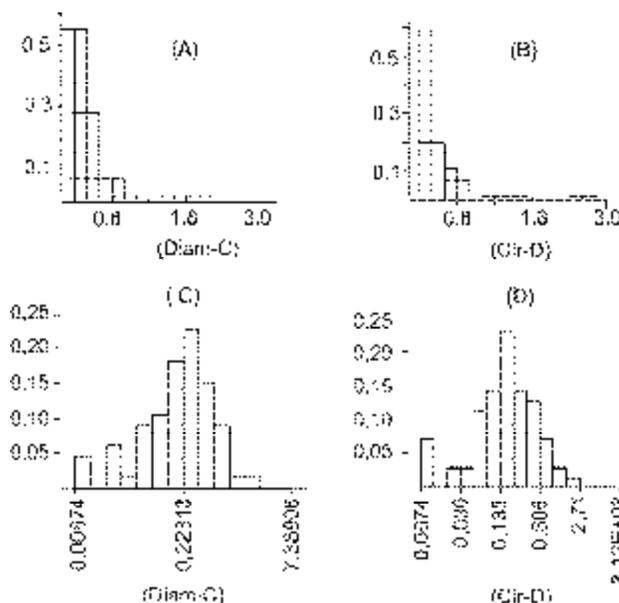


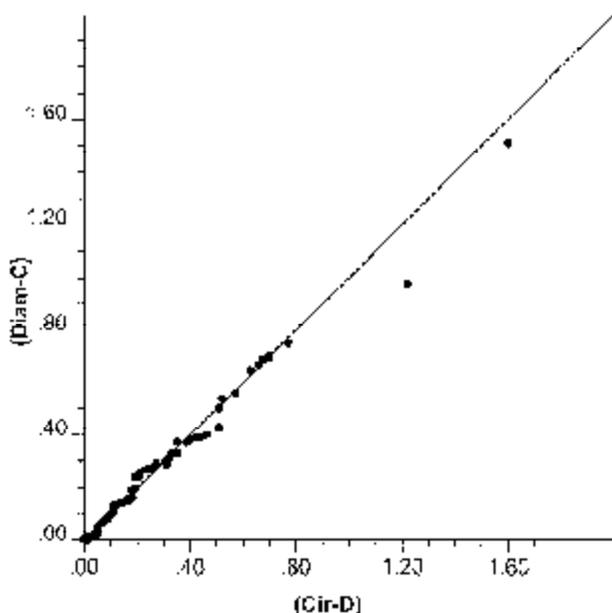
FIGURA 8. Histogramas dos furos (Diam-C) e (Cir-D).

TABELA 4. Estatísticas das sondagens.

Parâmetros Estatísticos	(Diam-C)	(Cir-E)
Número de valores	75	75
Média	0,2607	0,274
Mediana	0,16	0,18
Variância	0,1006	0,1378
Desvio Padrão	0,3171	0,3712
Coefficiente de Variação	1,21654	1,35472
Assimetria	2,787	3,525
Curtose	10,215	16,153

TABELA 5. Teste t de Student.

	(Diam-C)	(Cir-D)
Média dos dados	-2,82	-2,45
Desvio Padrão	3,16	2,60
Número de amostras	75	75
Valor de t	-0,78	



Furo Circulação Reversa (Cir-D)	Furo Diamantado (Diam-C)
Min.: 0,00	Min.: 0,00
25%: 0,065	25%: 0,065
Mediana: 0,160	Mediana: 0,160
75%: 0,335	75%: 0,330
Máx.: 2,410	Máx.: 1,540

FIGURA 9. Q-Q Plot dos furos (Diam-C) e (Cir-D).

FUROS (DIAM-E) E (CIR-F)

Gráfico de Barras

O gráfico de barras da Figura 11 mostra que o furo (Cir-F) possui dois valores elevados, enquanto o furo A apresenta distribuição mais suave da concentração de ouro.

Histogramas

Os histogramas apresentados nas Figuras 12A e B,

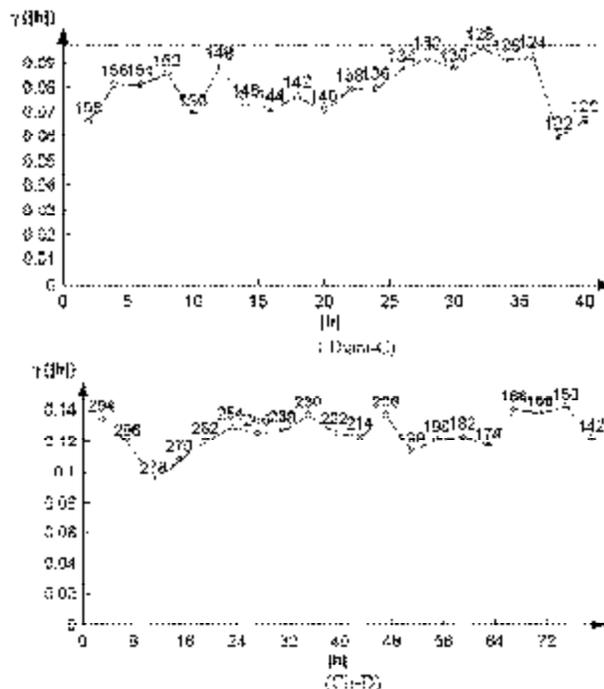


FIGURA 10. Variogramas ao longo dos furos (Diam-C) e (Cir-D).

correspondentes aos furos (Diam-E) e (Cir-F), revelam uma elevada assimetria, sendo que histogramas (A) e (B) mostram um valor anômalo, que reflete na média aritmética (Tabela 6). Desta forma, para efetuar um teste comparativo paramétrico, optou-se em logaritmizar os dados e verificar suas distribuições de frequências. Os resultados encontram-se nas Figuras 12C e D cujas distribuições aproximam-se da configuração normal.

Teste t de Student com Dados Normalizados

Segundo a tabela de valores críticos de “t” de Fisher & Yates (1963) aceita-se a hipótese nula H_0 para o nível de significância de 5% para os dados apresentados na Tabela 7.

Q-Q Plot

O gráfico Q-Q Plot, representado na Figura 13, mostra uma concentração de baixos teores e relativamente similares entre os dois furos, com baixa dispersão ao longo da reta de 45°. Por outro lado, os valores mais altos ou anômalos se dispersam mais ao longo da reta de 45°.

Variogramas

Os variogramas representados na Figura 14 avaliam a correlação espacial dos teores de ouro ao longo da profundidade dos furos. Ambos os variogramas apresentam efeito pepita puro, este fato ocorre por não existir correlação espacial dos teores de ouro ao longo da profundidade dos furos de sondagens. Assim, pode-se admitir que não existe contaminação de teores de ouro durante a perfuração.

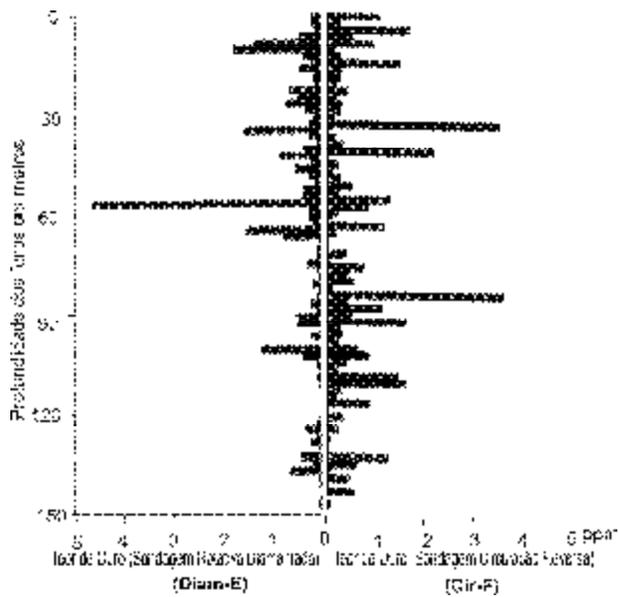


FIGURA 11. Gráfico de barras dos furos (Diam-E) e (Cir-F).

TABELA 6. Estatísticas das sondagens.

Parâmetros Estatísticos	(Diam-E)	(Cir-F)
Número de valores	74	74
Média	0,3527	0,5101
Mediana	0,18	0,26
Variância	0,3823	0,4062
Desvio Padrão	0,6183	0,6373
Coefficiente de Variação	1,75281	1,24928
Assimetria	4,793	2,609
Curiose	29,367	8,184

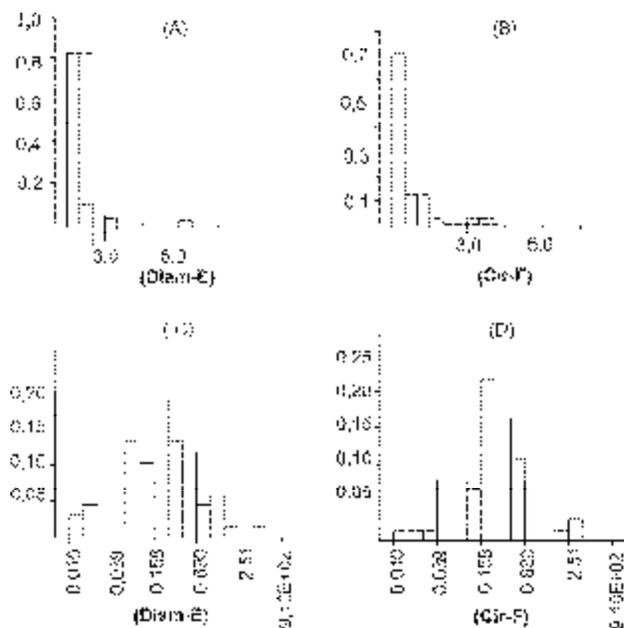
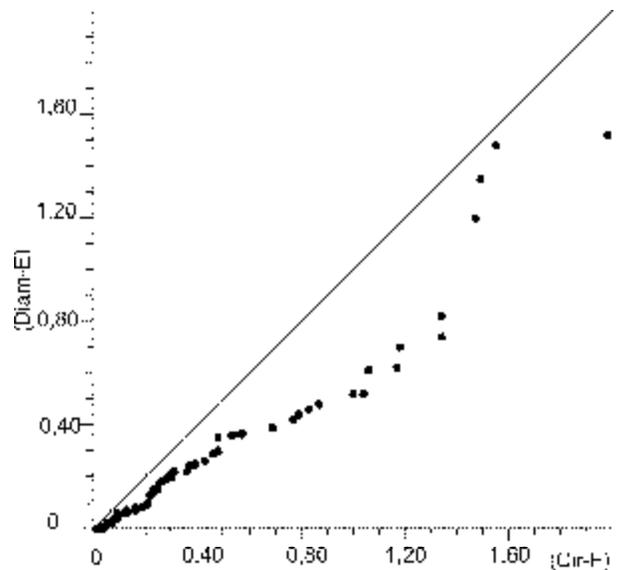


FIGURA 12. Histogramas dos furos (Diam-E) e (Cir-F).

TABELA 7. Teste t de Student.

	(Diam-E)	(Cir-F)
Média dos dados	-1,685	-1,31
Desvio Padrão	1,23	1,21
Número de amostras	68	74
Valor de t	1,827	



Furo Diamantado (Diam-E)	Furo Circulação Reversa (Cir-F)
Mín.: 0,00	Mín.: 0,010
25%: 0,060	25%: 0,126
Mediana: 0,180	Mediana: 0,260
75%: 0,365	75%: 0,570
Máx.: 6,500	Máx.: 3,300

FIGURA 13. Q-Q Plot dos furos (Diam-E) e (Cir-F).

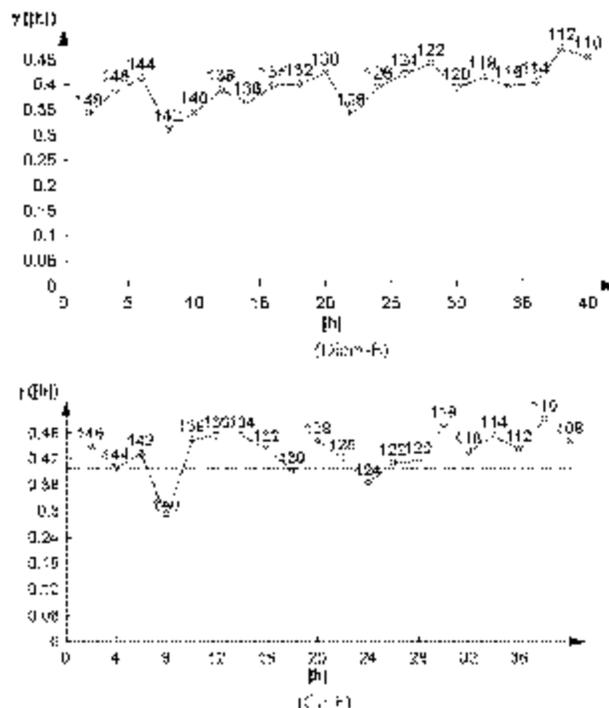


FIGURA 14. Variogramas ao longo dos furos (Diam-E) e (Cir-F).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas análises estatísticas e geoestatísticas obtidas nos três pares de furos gêmeos, pode-se afirmar que os teores de ouro obtidos nas sondagens diamantadas e os teores obtidos nas sondagens de circulação reversa, do mesmo par de furos gêmeos, são provenientes da mesma população. Os resultados obtidos nestes furos validam a utilização da sondagem de circulação reversa para o adensamento da malha de amostragem na área estudada. Salienta-se, contudo, que esta validação é aplicada especificamente para o depósito de São Francisco, onde foram realizados os testes estatísticos.

Deve-se observar que os resultados obtidos são provenientes de um tratamento estatístico, ou seja, trabalhou-se dentro de um espaço amostral de valores médios. Como exemplo, uma observação pormenorizada do gráfico de barras revela algumas amostras com notável discrepância dos teores avaliados, que poderiam ser melhor investigadas.

Nos variogramas utilizados para subsidiar a avaliação de uma possível contaminação ao longo (*down hole*) dos furos de circulação reversa, não se constatou contaminação, fato que inviabilizaria esta técnica, bem como a amostragem.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pela Bolsa concedida. À Mineração Santa Elina Indústria e Comércio S.A., por disponibilizar os dados desta pesquisa. Ao Prof. Emérito Paulo M. B. Landim pela revisão do artigo e sugestões apresentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FISHER, R.A. & YATES, F. **Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research**. Oliver & Boyd Ltd., 6th. Ed., 1963.
2. ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989, 561p.
3. KUYPER, A.B.; MACH, L.E.; WITNER, J.P.; HESTER, M.G. **Evaluation of reverse circulation & Core drilling at the Cove Deposit**. In: ECHO BAY MINES SAMPLING WORKSHOP, 1992, Juneau, Alaska. Arizona: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1992, Inc. n. 92-196.
4. PRENN, N.S. **Reserve calculations: an adventures in geofantasy**. In: ECHO BAY MINES SAMPLING WORKSHOP, 1992, Juneau, Alaska. Arizona: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1992, Inc. n. 92-196.
5. SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica**. Makron Books do Brasil Editora Ltda., 1956, 349 p.
6. SPIEGEL, M.R. **Estatística: resumo da teoria**. MacGraw-Hill do Brasil, 1975, 580 p.